

科技部補助

大專學生研究計畫研究成果報告

* *****
* 計 畫
* : 改質轉爐石於混凝土強度提升之應用研究
* 名 稱
* *****

執行計畫學生： 盧易聖
學生計畫編號： MOST 105-2815-C-110-016-E
研究期間： 105年07月01日至106年02月28日止，計8個月
指導教授： 李賢華

處理方式： 本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

執行單位： 國立中山大學海洋環境及工程學系（所）

中華民國 106年03月31日

摘要

隨工業技術的發展，鋼鐵的需求逐漸提升，但煉鐵高爐的所遺留的廢棄物產量也與日俱增。基於環境保護及物盡其用的精神，越來越多人將煉鐵所剩下的廢棄物拿來使用，轉爐石便是其中一個重要的應用。然而轉爐石中游離氧化鈣(f-CaO)以及氧化鎂(MgO)，其吸水後將造成的體積膨脹問題成為轉爐石使用上的問題，透過加入氧化矽進行轉爐石的改質，大幅降低膨脹的問題。

第二大金屬工業為煉鋁工程，煉鋁副產物——鋁渣成為可利用之廢棄物，而鋁渣的主要成分為氧化鋁(Al_2O_3)。其中氧化鋁的結構相當多種，又以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 最為安定。

為能增進改質轉爐石真正應用，本次研究將以改質轉爐石取代粗骨材添加於卜特蘭水泥中，並添加 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的細微粉末，部分取代細骨材於試體中，探究改質轉爐石、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 與卜特蘭水泥之間的新拌結果、膠結狀況及其物理性質。

單就未有任何奈米氧化鋁粉末取代細骨材的條件下，改質轉爐石取代天然骨材應用於混凝土上。在奈米氧化鋁粉末的添加下，於天然骨材組別中，當奈米氧化鋁粉末以 1.0% 重量取代改質轉爐石砂的強度表現最好；於改質轉爐石組別中，當奈米氧化鋁粉末以 1.0% 重量取代改質轉爐石砂的強度表現最好。在未添加奈米氧化鋁粉末的改質轉爐石的混凝土抗壓強度表現上，已經滿足 ACI 363-83 關於高強度混凝土的限制，而一般天然骨材混凝土則否，而少量奈米氧化鋁粉末取代可讓天然骨材混凝土抗壓強度達到此標準。

目錄

第一章 緒論	1
1.1 研究動機及目的	1
1.2 研究流程	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 波特蘭水泥	3
2.1.1 水泥類別	3
2.1.2 波特蘭水泥之成分與結構	4
2.1.3 水泥中各物質的水化反應	5
2.1.4 水泥水化反應的發展過程	8
2.1.5 硬固水泥之組成對水泥砂漿之影響	10
2.1.6 水泥砂漿微觀結構理論模式	14
2.2 轉爐石	15
2.2.1 製程概述	15
2.2.2 轉爐石的物化性質	16
2.2.3 轉爐石的化學成分	17
2.2.4 轉爐石的資源化	19
2.2.5 轉爐石的安定	20
2.3 氧化鋁	22
2.3.1 氧化鋁取得及應用	22
2.3.2 氧化鋁的相變及其結構	23
2.3.3 α -氧化鋁摻雜混凝土	25
第三章 研究方法與步驟	43
3.1 試驗參數	43
3.2 試驗材料	45
3.3 試驗項目及方法	47

3.3.1	細骨材之含水量、比重、面乾內飽和水量及表面水量之試驗	47
3.3.2	骨材標準篩分析	49
3.3.3	骨材單位重試驗	51
3.3.4	試體製作	52
3.3.5	標準水泥砂漿之流度	54
3.3.6	水泥砂漿之抗壓試驗	55
3.3.7	坍度實驗	56
3.3.8	抗壓試驗	57
3.3.9	劈裂試驗	58
第四章 實驗結果		82
4.1	第一階段實驗結果	82
4.1.1	水泥砂漿流度試驗結果	82
4.1.2	水泥砂漿抗壓試驗結果	82
4.1.3	第一階段試驗結果	83
4.2	第二階段實驗結果	83
4.2.1	坍度試驗結果	83
4.2.1	抗壓試驗結果	83
4.2.1	劈裂試驗結果	85
第五章 結論與建議		98
5.1	結論	98
5.2	建議	99
參考文獻		100
附件：第 38 屆海洋工程研討會暨科技部計畫成果發表會海 報論文比賽		

第一章 緒論

1.1 研究動機及目的

隨工業技術迅速的進步與發展，煉鐵工業成為支持工業進步主要動力，促使鋼鐵的需求提升，反觀之，煉鐵及煉鋼遺留的副產物產量與日俱增。年復一年，製鐵產生的大量副產物，讓爐體的運作將迫暫停。因基於環境保護及物盡其用的精神，許多工廠生產的副產物被適當推廣使用，爐渣成為一項重要應用，不僅解決工廠停擺在即的困窘，也可以將資源善盡利用，爐渣被受重視^[1]。

在煉鐵工業的副產品～爐渣，以高爐石與轉爐石最為大量，又以高爐石較普遍用於工程上，起因於高爐石成分近似卜作嵐水泥，可以和水發生水化反應產生膠結性，現多磨成粉部分添加於水泥製成「高爐水泥」；而轉爐石因為鋼鐵製程所遺留之副產物，成分略和高爐石有差異，成分中因為有氧化鈣遇水會膨脹，不管是磨成粉取代水泥，或是當作骨材添加於混凝土中使用，皆有因吸水後膨脹而造成結構物破壞的問題存在^[2]，欲增加轉爐石於土木結構工程，降低膨脹為當務之急。而經過加速不穩定成分的安定改質，改質後轉爐石已較未改質前穩定，膨脹問題也降低^[3]，但對於此一新的材料是否有其他的增強或其他工程狀況仍須探究。

故本次研究將針對改質後的轉爐石進行試驗，與天然骨材加以比對，了解其添加於混凝土中的工程性質進行研究，讓改質後的轉爐石能有更多機會在土木工程上的應用。

1.2 研究流程

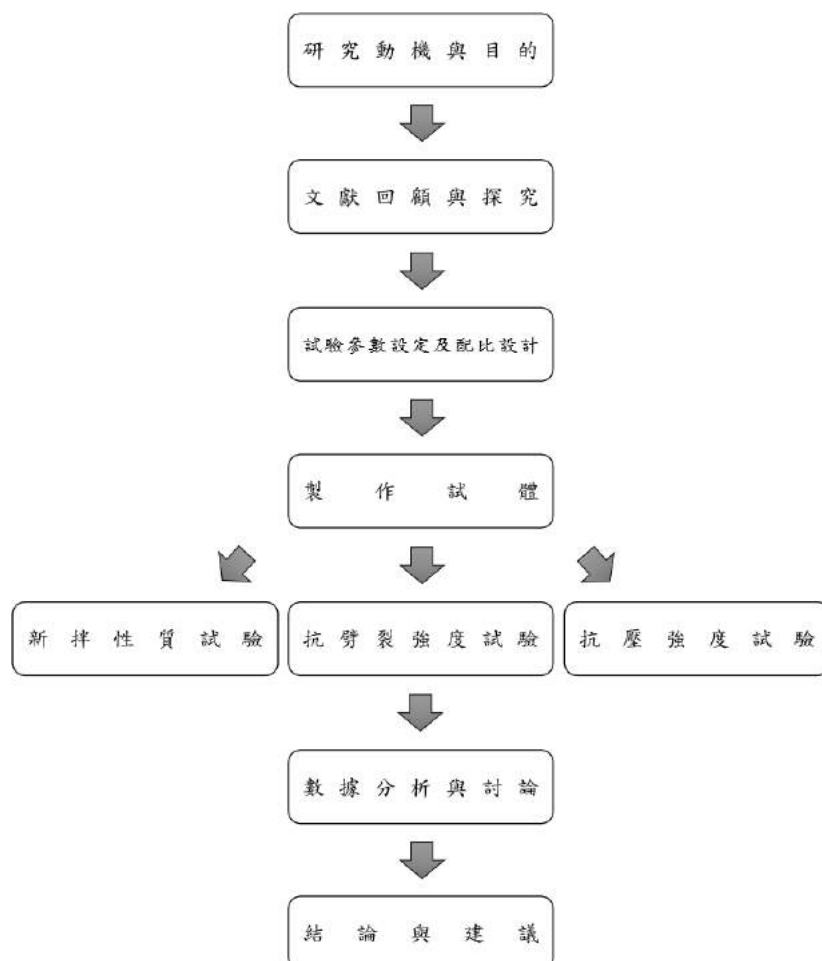
本次研究將分成二部分進行探究：

➤ 第一部分

由於轉爐石混凝土配比設計無法依照 *ACI* 的查表法進行強度設計水灰比，因此針對水灰比的設計，本研究將採用幾種水灰比進行新拌沙漿混凝土的流度、氯離子含量試驗，以及 $5\text{cm}\times 5\text{cm}\times 5\text{cm}$ 的正方體試體抗壓強度，進行結果分析，以求找到適當水灰比以利第三部分進行試驗。

➤ 第二部分

利用第二部分的水灰比結果進行設計，設計流程與 *ACI* 方法相同，以相比較混凝土再添加改質轉爐石後的混凝土新拌性質、圓柱試體強度變化。並利用氧化鋁微粉作為強度增強粉末，將粉末以重量百分取代方式，取代細骨材的用量，利用氧化鋁微粉的添加，探究是否能更近一步讓試體的強度更近一步提升。



第二章 文獻回顧

2.1 波特蘭水泥

2.1.1 水泥類別^{[4][5]}

水泥(Cement)是一種大量用在結構的材料，仰賴水泥的膠結性，可以將多種素材教結成塊，其中這些素材又以粗骨材(Coarse aggregate)和細骨材(Fine Aggregate)為主。水泥種類眾多，大致上又可以分成兩大類：^{[4][5][6]}

1. 非水硬性水泥(Non-hydraulic Cement)：

非水硬性水泥是最早被使用的水泥，這種水泥水化反應後的產物卻無法有效地阻水，但也顯示出這類水泥只要空氣中就可形成硬化固體，雖硬化後阻水能力不佳，卻可以抵抗化學侵蝕。非水硬性水泥主要由鍛燒石膏或者碳酸鹽類(例如：石灰岩)製成，這一類產品需在乾燥的環境下才能使其強度增加，且強度增加非常緩慢，也由於水化後需要長時間等待凝固，現在也很少使用。

2. 水硬性水泥(Hydraulic Cement)：

水硬性水泥和水起水化反應後，形成水合產物發生硬固，這樣的水合物不溶於水中，且相當穩定，強度持續提升，更可以有效地阻水。另外，若將水泥水合物持續在水中養護，會加速水泥水合物的硬固及強度，和非水硬性水泥產生截然不同的呈現，也成為現代土木工程中最主要的結構物材料。水硬性水泥種類眾多，包含：波特蘭水泥、混合水泥、速凝水泥……等。

在眾多的水泥種類中，又以波特蘭水泥為目前最為廣泛應用，波特蘭水泥係以水硬性矽酸鈣類為主要成分之熟料研磨而得之粉狀無機膠凝材料。本次試驗將以波蘭水泥為試驗材料。

2.1.2 波特蘭水泥之成分與結構^{[4][6][7][9]}

波特蘭水泥主要由鈣化物及含有矽酸鹽或二氧化矽(SiO_2)的材料，以適當的比例調配後，放入旋轉窯進行高溫燒結(Sinter)形成熟料(Clinker)，再將熟料與約4%~6%的石膏(gypsum)研磨成細微粉末形成水泥，如圖 2.1，其中常見的鈣化物又以石灰岩(limestone)為主，而主要含有矽酸鹽或矽鋁酸鹽等矽質多為黏土礦物(Clay)。

參考表 2-2，由於波特蘭水泥的成分及組成較為複雜，為了方便化學反應式的繕寫，習慣以縮寫化學式來表示這些化合物。參考表 2-3 整理，波特蘭水泥的主要成份有矽酸三鈣(C_3S)、矽酸二鈣(C_2S)、鋁酸三鈣(C_3A)及鐵鋁酸四鈣(C_4AF)，尚有少量的氧化鎂(MgO)、游離氧化鈣(f-CaO)...等化合物組成，而四種成分的組成仰賴燒結的初始原料比例、溫度、時間、壓力...等因素影響，其中 C_3S 和 C_2S 兩著佔波特蘭水泥成分約 75%，是影響波特蘭水泥強度的主要關鍵單礦物，以下即針對這兩種化合物的燒結及組成晶格進行描述：

1. 矽酸三鈣(Tricalcium silicate, C_3S)

工業製程中獲得 C_3S 是水泥主要成分，而 C_3S 結晶過程中會混有雜質(如： Al_2O_3 、 MgO ...等)在其中，這樣的產物我們可以稱為艾萊土(Alite)。 C_3S 根據製程溫度變化，會形成 7 種不同的晶體結構，其單位晶格變化如圖 2-2 以及，在低於 980°C 的單位晶格為三斜晶(Triclinic)，在 $980^\circ\text{C}\sim 980^\circ\text{C}$ 區間，其晶格為單斜晶(Monoclinic)，唯有些許晶格參數差異(T_1 、 T_2 、 T_3 及 M_1 、 M_2 、 M_3)，當燒結的溫度高於 1060°C 會轉變成菱方晶(Rhombohedral)構，參考表 2-4^[6]。

從圖 2-3 可知，在 C_3S 的結晶結構中，因為氧離子 O^{2-} 會受到鈣離子 Ca^{2+} 的庫侖力吸引，造成結晶出現較大的缺陷造成不對稱，形成類似蕭基缺陷(Schottky defect)，致使 C_3S 存有較高的內能^[4]。

2. β -矽酸二鈣(β -Tricalcium silicate, β -C₂S)

C₂S 也是波特蘭水泥中比例第二高成分，而不純的 C₂S 又稱為貝萊土(Belite)。C₂S 具有 5 種晶格(如圖 2-4 所示)，由高溫至低溫依序形成 α -C₂S \rightarrow α'_H -C₂S \rightarrow α'_L -C₂S \rightarrow β -C₂S \rightarrow γ -C₂S。水泥熟料燒結溫度高達 1420°C 時結晶成 α -C₂S，當溫度降至 1160~1420°C 時則會轉變形成 α'_H -C₂S 持續降溫至 675~1160°C 時再轉變為 α'_L -C₂S^[8]。伴隨著晶格的旋轉， α'_L -C₂S 冷卻至 650 °C 左右會轉變為 β -C₂S，溫度持續下降，最後熟料轉變為 γ -C₂S，因原子排列改變，使得晶格變大，讓熟料從堅硬固體急速崩裂為白色粉末，發生「粉化(dusting)」現象。粉化後以顯微鏡檢查，發現其中之 C₂S 均為 γ 型且含玻璃質極少，但在 650 °C 時將熟料淬火(Quenching)處理， β -C₂S 來不及讓晶格變化，使 β -C₂S 保存下來，且淬火處理後 C₂S 被結構較小的玻璃質結晶所包圍，阻止 β 相轉成 γ 相，故不至於發生粉化現象。然而 β -C₂S 為介穩型之水泥熟料，無法在 CaO-SiO₂ 的平衡像圖(圖 2-5)中發現，但卻有以下特性為^[9]：

- (1) 因為 β -C₂S 介穩態，此時吉布自由能(Gibbs-free energy)並非最低而穩定(參考圖 2-6)
- (2) 配位數不規則而活性高
- (3) 若有雜質介入或穩定劑介入其結構，則活性大
- (4) 孔隙少且活性比 C₃S 小故 β -C₂S 之水化速率較 C₃S 慢，但晚期強度逐漸增加，C₂S 含量較多之水泥其晚期強度可以提高。

2.1.3 水泥中各物質的水化反應^{[6][9][10][12]}

波特蘭水泥的主要成分 C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF 以及其他少量成份如游離石灰(f-CaO)、氧化鎂(MgO)等組成，在與水混合後便會發生水化反應

生成各種水化產物形成膠結材，也是水泥主要的強度來源，其主要成份之特性如表 2-3 所示^[10]。針對主要的四種化合物可以分類成矽酸鈣鹽類 (Calcium Silicate)及鋁酸鈣鹽類(Calcium Aluminate)兩種。這些物質會因為細度、化學成分、結晶結構的不同而擁有不同的水化能力。其中，矽酸鈣鹽類的水化反應對水泥之強度貢獻最為重要。以下將針對兩種類別之水化反應進行說明^[11]：

1. 矽酸鈣鹽類水化反應

矽酸鈣鹽類包括了矽酸三鈣(C₃S)與矽酸二鈣(C₂S)，其中，C₃S的水化反應速率較慢，但是反應期較長，是提供水泥砂漿早期強度與晚期強度的主要來源，其水化反應式如下：



而β-C₂S水化速率較矽酸三鈣稍慢，主要能提高水泥砂漿的晚期強度，其水化反應式如下：



C₃S與β-C₂S反應過程中放出的熱量不同，可參考2.1.2說明，由於C₃S晶格的原子堆積受到離子的影響，造成有較大的晶格缺陷，使得C₃S的晶格能較大，在水化反應產生的熱量也會比較多；相對的，β-C₂S是水泥燒結材料淬火後的產物，型態穩定，孔隙少，水化反應後的放熱也大幅下降。

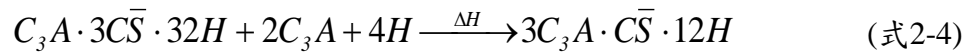
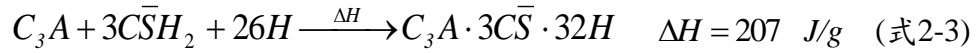
而上述兩反應式 2-1 及式2-2 皆可視為：



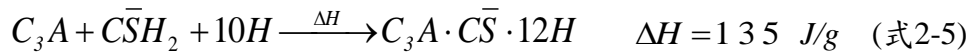
2. 鋁酸鈣鹽類水化反應

鋁酸鈣鹽類包括了鋁酸三鈣(C₃A)、鋁酸四鈣(C₄AF)，其中C₃A約佔總水泥重量之12%，其水化反應受石膏(C \bar{S} H₂)影響極大。由於鋁酸鹽類的反應速率遠大於矽酸鹽類，所以C₃A的水化熱比C₃S的水化熱高

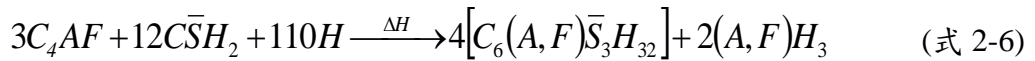
出許多，其水化速度過快，與水接觸幾分鐘後即會產生水化，且凝結時間短，易造成「閃凝(flash set)」，影響其他物質的反應不均，故應加入石膏調節與緩衝 C_3A 的反應速率，一般的波特蘭I型水泥皆會加入5~6%的石膏做為調整量，其初期水化反應式如下：



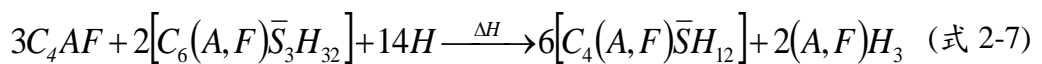
其中，式2-3的 $C_3A \cdot 3\bar{C}\bar{S} \cdot 32H$ 為鈣鉸石(Ettringite, AFt)，是一種穩定的水化反應產物，當式2-3的 $\bar{C}\bar{S}H_2$ 耗盡，相當於缺乏 SO_4^{2-} ，則剩餘的 C_3A 將變為不穩定狀態之 $C_3A \cdot \bar{C}\bar{S} \cdot 12H$ 為單硫鋁酸鈣(Monosulfate, AFm)，其反應如式2-4，故 C_3A 的總反應式為：



鋁酸鐵四鈣(C_4AF)之水化反應過程與 C_3A 類似，但是反應速率不如 C_3A 如此快速，水化熱也較少($\Delta H = 420 \text{ J/g}$)，且因收縮性及放熱量低之緣故，適用於水壩等需低水化熱之工程，故波特蘭水泥中若有大量 C_4AF 則可降低水化熱的產生，也可以減少因水化熱造成的水泥砂漿表面裂縫，其水化反應如下式：



↑
(似 AFt 結構)



↑
(似 AFm 結構)

2.1.4 水泥水化反應的發展過程^{[6] [12] [13] [14] [15]}

波特蘭水泥中每一種組成礦物，經過水化反應後會生成不同的水合產物，同時也會產生水化反應焓(即水化熱)，如 C_3S 、 C_3A 是屬於水化反應後，會產生較多的熱焓變化。而水化熱也會受到水泥粉體的細度影響，隨著粉體愈細，產生的水化熱也會增加；當然水泥的用量、養護的環境也會影響水化熱。典型的波特蘭水泥水化放熱曲線如圖 2-6，其水化過程大致可以分成：(1)水解階段(2)潛伏期(3)加速期(4)減速期(5)穩定期等五大階段，每階段主要反應說明如下：

I. 初始水解(Initial hydrolysis)

當水與水泥摻合一起時，鋁酸鹽類與石膏迅速溶解反應，而 C_3S 開始進行初期的水化反應，此時部分的氧化鈣(CaO)會從 C_3S 表面脫落進入水中，迅速分解產生大量的 Ca^{2+} 與 OH^- 離子，釋放大量熱能，溶液的 Ph 值也會迅速上升，這個現象生為水解。初期過程極短，一般水解在加水後 15 分鐘內完成，而 Ca^{2+} 離子支配水泥的初凝(Initial set)時間，此外， C_3A 和 C_4AF 溶於水中時，與石膏溶出的硫酸鹽類和水形成六角型針刺鈣鈣石(Aft)與及 C_3A 和 C_4AF 之雜相水合物，也創造出圖 2-6 的第一個放熱峰，有時我們稱之為「濕熱(heat of wetting)」。此時漿體仍呈現可流動之狀態，由化學反應控制本階段的反應動力。

II. 潛伏期(Induction or dormant period)

矽酸鹽類持續在水中解離， Ca^{2+} 與 OH^- 離子不斷累積，矽酸鹽類漸漸減少， Ca^{2+} 集中並達到過飽和狀態，觸發水合產物之成核現象(nucleation)，小部分的 C_3S 開始微弱之水化作用， $Ca(OH)_2$ 晶體與 C-S-H 膠體等早期水化物逐漸形成，放熱速率下降、黏滯性增加，Aft 與 Afm 繼續形成，開始對凝結時間及工作性造成影響，此階段末期開始初凝。本階段的反應動力由成核反應控制，事實上水化反應階段之劃分並不明朗，在潛伏階段的最後一小時內。

III. 加速期(Acceleration)

潛伏期一過，藉由成核反應產生的種核，加速 C_3S 水化反應，水化熱快速釋放，C-S-H 膠體與 CH 晶體大量形成，創造出圖 2-6 的第二個放熱峰； C_2S 也與水產生水化反應，產生類似 C_3S 的水化物，但反應速度緩慢，其熱能釋放自然不如 C_3S 那麼多。因形成大量的 C-S-H 膠體與 CH 晶體，過飽和之 Ca^{2+} 離子濃度下降，大量的水合產物生成、聚集並持續成長。此外，AFt 繼續形成且依照石膏與 C_3A 、 C_4AF 比例開始轉換成 AFm，放熱速率開始加快，快速形成之水合物填充水化空間，始漿體出現固化且空隙下降，水泥漿體也由塑性階段(Plastic) 進入剛性階段(Rigid)，早期強度開始出現，即由初凝進到終凝(final set)。終凝出現在此階段開始後 1~2 小時間。

IV. 減速期(Deceleration)

過加速期的峰值，水化速率逐漸降低，進入減速期，此時水化作用繼續由水泥顆粒表面向核心進行，反應動力由化學控制漸漸轉為擴散(Diffusion)控制。 C_3S 與 C_2S 繼續水化，使 C-S-H 膠體與 $Ca(OH)_2$ 晶體不斷成長， C_3S 的反應開始趨緩，AFt 逐漸轉換為 AFm， C_2S 的水化反應開始較為明顯，放熱速率逐步下降，而水合物的持續擴散作用，晶顆粒間彼此互相鍵結，幫助填塞水泥漿體的空隙，產生強度出現。

V. 穩定期(Steady state)

當與水拌合約 24 小時後進到穩定期，此階段放熱速率大幅減緩，水化產物形成趨於緩慢，水化反應仍以擴散機制繼續進行，漿體孔隙繼續減小，強度發展也開始趨緩成為穩定狀態，抗潛變(creep)能力在此時遞增，此時的強度是由孔隙數量與大小以及水化產物鍵結的行為決定，體積穩定性與耐久性逐漸增加。此時孔隙率及水合物鍵結型態是決定硬固漿體極限強度的因子。

當水泥顆粒吸附水分子時，由外表層先起水化，產生的水化物附著在水泥顆粒的表面，致使後繼水分不易滲入水泥顆粒內部，需藉水化後期的

擴散作用，水始能滲入，產生內部水化物。

2.1.5 硬固水泥之組成對水泥砂漿之影響

硬固後的水泥中，水泥進行水化反應後的水合產物(Hydration Products)，包含：C-S-H 膠體、Ca(OH)₂、鈣氫石(Aft)及、單硫型鋁酸鈣鹽類(AFm)及硫酸鈣鹽類等^{[4][12][15]}，這些物質的生成速度會隨著水化反應的階段而有所不同，其含量多寡會對水泥砂漿的物理性質有不同程度上的影響，也因此水合物分析將顯得格外重要，主要的四種水化產物、孔隙、水份等^[4]對水泥砂漿的影響如下及表 2-4 所述：

1. C-S-H 膠體

C-S-H 是一種錯綜複雜的固相物，由結晶欠完善的膠體組合而成，化學成分不固定，也難以分類，一般而言，其 $\frac{Ca}{Si}$ 比值會隨水化進行而變，其值約在 1.5~2.0 之間甚或更高，而在 100°C 以下所生成之水合矽酸鈣多是非完善的微晶體，水化開始生程 C-S-H(II)，隨後生程 C-S-H(I) 等，其生程之化合物可能為 C₃S₂H₅ 或 C₅S₆H₇ 等不定型(Amorphous) 晶型；在溫度 100°C 以上，壓力大於 1 大氣壓始能形成完整結晶，如托勃莫萊石(Tobermorite)、矽酸鈣石(Afwillite)、C-S-H(B)、C-S-H(A) 等^[6]。C-S-H 膠體為矽聚合(Silicate Polymerization)刺球狀連續母體(Continuous Matrix)(參考圖 2-8(A))，是控制水泥砂漿強度最重要的因素，約佔將體體積的五成到七成^[12]，是硬固後的水泥漿體強度的主要來源，膠體間由分子鍵作為鍵結，當水分改變會有晶格縮放的現象，而受到外力作用時，會發生內部錯位滑動造成潛變。C-S-H 膠體的比重為 2.3~2.6，大小約 1×0.1μm，厚度小於 0.01μm，隨著水泥砂漿本身齡期的增加，C-S-H 膠體間的緻密度也會增加，使得強度越來越高、發生變形的情形越來越少，但當空氣中二氧化碳 CO₂ 濃度過高時，可能會使 C-S-H 膠體碳化成為矽膠，此部份一般影響甚小。

2. Ca(OH)₂

氫氧化鈣的比重為2.24，為六角形片狀排列的結晶(參考圖 2-8(B))，佔漿體體積的 20~25%^[12]，主要功用在填充水泥砂漿孔隙，使漿體強度增加，但並非漿體強度的主要來源，氫氧化鈣 Ca(OH)_2 容易被水溶解產生孔隙，而氫氧化鈣 Ca(OH)_2 溶液充斥其中，稱為孔隙溶液，被釋放到結構體外層，在泌水處會出現白色水漬狀痕跡，稱為「白華」，同時也容易與環境中的硫酸鹽類反應，發生膨脹龜裂，使環境侵蝕結構體的機率增加並造成內部鋼筋腐蝕，在荷載時，由於 CH 晶體結構，容易沿著晶界發生剪力破壞，導致鋼筋或骨材粘結面滑移^[16]。整體而言 CH 晶體對漿體耐久性有不良影響。

3. 鈣釩石(AFt)

鈣釩石外貌呈六角針狀(參考圖 2-8(C))，大小 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ ，佔水泥漿體體積的 10~15%。由於比重較小(約 1.75)，在水化過程中體積易膨脹，導致 C_3A 的包覆層局部破壞，當石膏供應不足時，鈣釩石會逐漸轉變為單硫型水化鋁酸鈣(AFm)^[12]。

4. 單硫型水化鋁酸鈣(AFm)

AFm 的結晶成現六角薄板狀或不規則玫瑰狀結晶(參考圖 2-8(D))，比重約 1.95，大小約為 $1\times 1\times 0.1\mu\text{m}$ ，佔水泥漿體體積的 7%。AFt 與 AFm 皆有填充孔隙的效果。

5. 硫酸鈣鹽類

會與硫酸鹽及 C_3S 發生反應，造成體積的變化，對結構體的體積穩定與強度皆有不利影響，作用與氫氧化鈣 Ca(OH)_2 相同，用來填充水泥砂漿內部的孔隙，遇水則會造成鈣釩石(AFt)膨脹作用，一樣會造成結構的膨脹龜裂，為硫酸鹽侵蝕的主因。

6. 孔隙

C-S-H 膠體在反應初期會包覆在尚未水化的水泥顆粒表層，隨著反應進行，C-S-H 膠體體積逐漸變大，水泥顆粒則漸漸變小，直到水化反應結束，CH 晶體與 C-A-H 類進入並填充 C-S-H 膠體間的孔隙。

但是孔隙的填充率不可能達到 100%，造成硬固的水泥漿體的介面處和內部必然會存有孔隙，其形狀也相當不規則且獨立存在。孔隙依大小一般可以分為^[4]：

(1) 毛細孔隙(Capillary pores)

水泥漿體水化後 C-S-H 膠體與 CH 晶體交錯時未被孔隙溶液填所留下的空隙，一般大於 10nm(大多介在 10~50nm，會有少數 >100nm 的巨大毛細孔隙)，毛細孔系內一般狀況下含有水分，具有毛細作用。毛細孔隙主要受到水灰比、水化程度及水化空間之影響，當水灰比大於 0.42 時，多餘的水分形成毛細孔隙，而隨著水化作用的進行，毛細孔隙將逐漸被水化產物所填充。

(2) 膠體孔隙(Gel pores)

為水泥漿體中 C-S-H 膠體內結合水所佔空間，孔徑小於 10 nm。膠體孔隙的多寡與水灰比並無直接關係，主要受到 C-S-H 膠體含量的影響，於 C-S-H 單體表面形成針狀薄片結構結晶，當 C-S-H 單體交錯在一起時，便會形成緻密組織，但是其中仍會有無數細微孔隙。膠體孔隙對混凝土強度影響較小，一般佔總孔隙體積的 40~55%。

(3) 輸氣孔隙(Air entrained)

輸氣孔隙的產生是由於在拌合過程中添加了化學藥劑(輸氣劑等)，孔隙尺寸均一，約為 0.05mm~1.25mm，一般形狀皆為橢圓，若輸氣孔隙具有連通性，則稱為連通孔隙，大量連通孔隙的存在對於抵抗環境中的有害離子有不好的影響。

(4) 搗實孔隙(Compaction pores)

澆灌時搗實不均或是骨材的因素而形成，尺寸無一致性，對有害離子以及結構物整體強度均有非常不良的影響。

影響孔隙的因素，大體上就是決定水泥砂漿強度的因素，孔隙量的多寡與水泥砂漿的強度成反比，孔隙越多，強度越低；不同水灰比

在相同養護條件下，越高水灰比者孔隙率也越高，同時對耐久性、收縮、潛變等物理性質也都有不同程度的負面影響，簡單來說，品質越好的水泥砂漿，其孔隙越少，也就是緻密度越高，不容易讓環境中的硫酸鹽與水分進入水泥砂漿內部。此外，養護齡期、養護溫度、摻料的使用等，皆對孔隙的數量有所影響，其中養護齡期的增加對於孔隙率的降低有正面幫助，隨著養護齡期增加，水泥之水化作用比較完全，使得大型孔隙減少，轉為小型孔隙而硬固後的水泥漿體中。

Bentur 等人研究指出，養護溫度越高，可以小幅度降低總孔隙率，細部來看，是讓大孔隙增加、中小孔隙減少，另外養護溫度臨界值為 65°C ，超過將造成總孔隙率增加，使孔隙結構更大^[17]。Metha 研究指出，使用飛灰作為摻料時，孔隙率有增加的趨勢，但多屬於小孔隙，使用卜作嵐材料對於提高整體結構物的緻密度有正面幫助^[18]。

7. 水分

硬固水泥漿體中，水分以不同形式存在其中，依據其與固相組成之作用情況，可分為毛細孔水(capillary water)、吸附水(adsorbed water)、層間水(interlayer water)及化學鍵結水(chemically bound water)，參考圖 2-9。其中，前三種可歸類為物理結合水(physically bound water)。各種水分之特性分述如下^[4]：

(1) 毛細孔水(capillary water)

存在於毛細孔隙內，又稱為自由水(free water)。依照其在水泥漿體內之行為，可再分細為兩類：存在於 $10\sim 50\text{ nm}$ 孔徑內之毛細水，失去後會造成水泥漿體的收縮；及存在於 $>50\text{ nm}$ 孔徑內的水，移除後並不會造成體積的變化。

(2) 吸附水(adsorbed water)

因水分子物理吸附作用，此種水分極靠近漿體固態物質並吸附在其表面上。當相對濕度小於 30% 時，漿體內大部分的吸附水將逸失，這是造成水泥漿體乾縮的主要因素。

(3) 層間水(interlayer water)

存在於 C-S-H 膠體之層狀結構間，只有在極度乾燥的環境中(相對濕度小於 11%)才會散失，當層間水散去時 C-S-H 膠體才會產生乾縮現象。

(4) 化學鍵結水(chemically bound water)

又稱為結晶水(crystalline water)。結晶水是經由化學鍵結所形成，屬於水合物的一部分，以 OH^- 狀態存在，在晶格上有固定晶格點，和其他元素有確定的含量比例。結晶水不因乾燥而散失，只有在受到高溫的情況下，鍵結被破壞而逸散。

化學鍵結水與物理結合水通常很難嚴格地被區分，為了研究工作的方便，多數文獻將水泥漿體中之水分分為可蒸發水(evaporable water)及非蒸發水(non-evaporable water)(如圖 2-10)^[19]：

- 可蒸發水(evaporable water)

經由 O-dry($100\pm 5^\circ\text{C}$ 烘箱乾燥)或 D-dry(-79°C 乾冰乾燥)可去除的水，其包括毛細孔水、膠孔水(gel water)及 C-S-H 膠體中部分的結晶水。

- 非蒸發水(non-evaporable water)

經由 O-dry($100\pm 5^\circ\text{C}$ 烘箱乾燥)或 D-dry(-79°C 乾冰乾燥)後，加熱至 $1000\pm 50^\circ\text{C}$ (燒失狀態)時才失去的水。有些文獻^[20]將非蒸發水視同化學鍵結水，其將水泥漿體內部之水分區分為：毛細孔水、吸附水及化學鍵結水(圖 2-11)。實際上加熱至燒失狀態時，C-S-H 膠體中部分的稱結晶水亦會散失，因此非蒸發水會略少於化學鍵結水，但差異不大。

2.1.6 水泥砂漿微觀結構理論模式

對於水泥砂漿的微觀結構，多位學者提出了不同的理論模式，圖 2-12 為三種常見的水泥砂漿模擬結構^[21]：

1. Power-Brunauer model 是漿層狀組織模擬為規則排列之直線板層，如

圖 2-12(a)所示，當層間水分子處於相對濕度很低的情形時減少，體積因此改變，為不可逆之變形。

2. Feldman-Sereda model 認為層間組織結構為不規則形式之排列，如圖 2-12(b)所示，層與層間孔隙隨著孔隙含水量而改變，為可恢復之變型。
3. Munich model 忽略微結構內部之化學組成結構，如圖 2-12(c)所示，主要由許多粒子組成，粒子間之束縛能受到水量多寡之影響，含水量越多，粒子間之凡德瓦鍵結力減少，且吸附在粒子表面之水會因為增加之分離壓力進而減弱其束縛能。

2.2 轉爐石

2.2.1 製程概述^{[1] [24]}

爐石是由一貫作業煉鋼廠冶煉鋼鐵過程中的副產品—爐渣製作而成，在生產鋼鐵之原料中，添加之鐵礦原料、黏土礦物與灰石進行反應，而灰石加熱後分解出石灰與熱融的殘於砂石反應形成爐渣。參考圖 2-13，一貫作業煉鋼廠系指原料、煉鐵、煉鋼到最後軋成各式鋼鐵產品，皆在同一工廠完成，一路由鐵礦砂經由高爐煉出生鐵，在從生鐵經由電弧爐、轉爐煉鋼。這些爐渣副產品一般又可分為高爐石(Blast Furnace Slag, BF)和轉爐石(Basic Oxygen Furnace Slag, BOF)。通常冶煉一噸生鐵即自高爐排出約 310 公斤之冷卻固體物，即為高爐石，而轉爐石係鐵水由轉爐煉鋼時會產生約 130 公斤之爐渣製成，由於煉鋼溶渣倒出時無法完全與鋼液分離乾淨，故轉爐石中常含有鐵份，另為了保證能去除鋼液中的雜質，常加入過量的石灰，故在吹煉完成後，轉爐石中也常含有未反應的石灰(Free CaO)^{[22] [23]}，根據中鋼公司 2014 年統計資料，轉爐石的年產量為 111.6 萬噸，2015 年更高達 114.0 萬噸^[24]。

2.2.2 轉爐石的物化性質

煉鋼爐石因為原料添加、製程條件等不同，每一批同一煉鋼爐生產的爐石會有些許的不同。爐石可視為多種礦物組成的固熔體，隨化學成份的變化而有所不同，其性質也和化學成份有著密切的關係。一般而言，轉爐石屬於煉鋼爐石的一種，其普遍具有下列性質^{[25][26]}：

1. 密度

轉爐石含鐵量較高，其密度較高爐石大，一般約為 $3.1-3.6 \text{ g/cm}^3$ 。

2. 單位容積重量

轉爐石之單位容積重量不但受到成份的影響，還與粒度有關。一般而言，通過#80 篩的爐石粉，電弧爐爐石為 1.62 g/cm^3 左右，轉爐石為 1.74 g/cm^3 左右。

3. 耐磨性

由於轉爐石含鐵成份不少，比重大、密度高而較為耐磨。以耐磨指數表示，標準砂為 1，高爐石為 0.96，而轉爐石為 0.7。由於轉爐石較耐磨，充當路面材料時較高爐石為佳。而在洛杉磯磨耗試驗中，其損失量約落在 11%~25%，較天然砂石低。

4. 活性

由圖 2-4 可知，在高溫熔融狀態下，石灰會與融渣反應生成水泥原料。而 C_3S 、 C_2S 等為活性礦物，具有水硬膠凝性。當轉爐石

$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_3}$ 之比值大於 1.8 時，便含有 60-80% 的 C_3S 、 C_2S ，並且隨

著比值(鹼度)提高， C_3S 含量也增加，當鹼度高於 2.5 的轉爐石與 10% 的石膏研磨，其強度可達一般水泥之程度。因此， C_3S 、 C_2S 含量高的高鹼度轉爐石，可作為水泥生產原料和製造建材製品。

5. 穩定性

轉爐石含游離氧化鈣($f\text{-CaO}$)、 MgO 、 C_3S 、 C_2S 等，這些組成在

一定條件下都具有不穩定性。鹼度高的熔渣在緩緩冷卻時， C_3S 會在 $1250^{\circ}C$ 到 $1100^{\circ}C$ 時緩緩分解為 C_2S 和 $f-CaO$ ；而 C_2S 在 $675^{\circ}C$ 時， $\beta-C_2S$ 晶相會變為 $\gamma-C_2S$ ，並且發生體積膨脹，其膨脹率達 10%，詳細原因如 2.1.2 說明。

另外，轉爐石吸水後， $f-CaO$ 會消解為氫氧化鈣 $Ca(OH)_2$ ，體積將會膨脹 1~3 倍， MgO 會消解為氫氧化鎂 $Mg(OH)_2$ ，體積膨脹增加約 0.77 倍。因此含有 $f-CaO$ 、 MgO 的常溫轉爐石是處於不穩定狀態，只有當 $f-CaO$ 、 MgO 消解完成或含量很少時，才會穩定。

2.2.3 轉爐石的化學成分

煉鋼爐石的化學成份如表 2-5 所示，文獻中曾對各主要化學成份所扮演的角色描述如下^[27]：

1. 氧化鈣(CaO)

參考圖 2-14，氧化鈣為水泥及爐石之主要的成份，一般而言 CaO 含量越高，其活性越大，但是含量過多反而會使活性降低。這是因為過高的 CaO 含量會使爐石產生大量析晶(沈澱)現象，而降低活性，尤其在較慢的冷卻速度時，則會有粉化(dusting)現象發生而大大的降低爐石的活性。

轉爐石因 $\frac{CaO}{SiO_2}$ 比率偏高，易析出游離氧化鈣($free-CaO$)，游離氧

化鈣會吸收大氣中之水分與二氧化碳(CO_2)而發生風化作用，發生此風化作用的同時會伴隨體積膨脹。轉爐石成分也因為具高含量 CaO ，具有親油性質，故吸油率較高，容易與瀝青膠泥結合，增加包覆能力，並降低水分侵入之機會^[28]。

2. 氧化矽(SiO_2)

此成份對於形成玻璃質結構有密切關係，然而由於爐石中 CaO 與 MgO 之總含量常太少，並不足以使 SiO_2 充分結合成玻璃質，所以 SiO_2 量多時反而使活性降低。

3. 氧化鎂(MgO)

大多數之氧化鎂與氧化矽及氧化鈣結合成穩定型化合物，因此晶化成方鎂石(Periclase)的機率很小。只要氧化鎂的成分小於 20%，則無一般水泥由於方鎂石而產生健度問題的顧慮。同時 MgO 氧化物的存在可使爐石的顯微結構較開放而增加活性度。

4. 氧化亞錳(MnO)

一般氧化亞錳的存在會影響到水淬轉爐石的健度，所必須限制其含量。而在水淬轉爐石中成份含量約佔 3.2%。

5. 硫(S)

硫一般在爐石中呈硫化物存在(如 MnS，CaS 等)，但在 MnO 存在之情況下 MnS 產生的機率大於 CaS，而 MnS 與水作用會發生體積膨脹現象，而使結構物強度降低，因此高爐熟料內的硫含量有限制(一般硫的含量範圍為 1~2.5%)。

6. 氧化鐵(FeO，Fe₂O₃)

轉爐石中含鐵量較高，但由於高溫轉爐渣經水淬冷卻時，爐渣中的鐵與水中之氧氣化合，而形成氧化鐵(FeO)和三氧化二鐵(Fe₂O₃)，故在水淬轉爐石中純鐵含量較氣冷轉爐石少，也因純鐵不易研磨，所以水淬轉爐石之磨損率比氣冷轉爐石高。純鐵、氧化鐵及三氧化二鐵在水淬轉爐石之化學成分中，約佔 15 -25%。

7. 其他雜質

轉爐石內可能有其他各類雜質的存在，如同水泥生產一般，由於其量甚少，一般認為只會使爐石微結構更加「開放」，進而增加活性。

另外根據美國 Wang(2010)及加拿大 Giseseler(2000)的研究整理指出轉爐石含有 CaO、SiO₂、FeO、MgO、Al₂O₃ 等化合物，僅只比例上有差異，而從結果可發現，轉爐石的礦物組成及氧化物的成分與波特蘭水泥很相似，惟有轉爐石的鐵氧化物的成分比例較高，這與轉爐石的製程與來源有極大

關聯，也因為含有較高的鐵氧化物，這可能與轉爐石擁有較高的耐磨性，另外，由成份來看，推測轉爐石的回脹過程，可能還有水化反應的存在，呼應 2.2.2 轉爐石的活性分析。

2.2.4 轉爐石的資源化

隨著環保及資源再生的意識高漲，如何將工業副產品轉化為工業用材料，將是國內各產官學共同努力的目標。煉鋼副產物資源化應用已成為全球大力推行的主要方針，應用層面廣及土木工程、水利工程、填地材料、環境優化...等各層面^[28]。針對中鋼與各先進國家在煉鋼爐渣資源化方面的近況，整理如表 2-6^[51]。2015 年在日本主要應用包含道路工程約 31.2%、土地改良用達約 4.3%、港灣海事工程約 1.3%、其他陸上土木工程用(如機場，扣除道路工程)達 29.2%^[29]。美國鋼爐渣應用主要包含道路基、底層、面層用約 46.8%、瀝青混凝土用平均約達 12.1%、填地使用 19.3%^[30]。

近幾年來，日本更將鋼鐵爐渣應用於海洋生態保育方面，由蔡敏行的研究整理中，其可歸納為二大類^[31]：

1. 控制爐渣冷卻速率改變爐渣結晶相，將此爐渣磨成細粉，撒到基礎生產力貧瘠之海域如南極區或赤道海域當營養鹽。
2. 將爐渣取代混凝土材料如粗骨材、細骨材與水泥等，利用生產工廠所排放的 CO₂ 廢氣，固化爐渣製作成人工魚礁，並投放於沿海附近與都市含氮廢水配合作成培育漁業資源。

在 2000 年時，由 University of Otago, Dunedin, New Zealand 的 Philip W.Boyd 教授所領導的一個研究小組，發表將 8.6 公噸的鐵化合物注入南極洋。在他們將含鐵營養物注入海洋的六週後，人造衛星便在海面上偵測到一大片以這些含鐵營養物維生的浮游植物群落，面積長 150 公里，寬 4 公里。這一大片浮游植物群落至少維持兩週以上，所積聚的藻碳至少達 600 至 3000 公噸。利用鐵化合物刺激會吸收 CO₂ 的海中浮游植物群落生長，來達到降低導致地球溫室效應的 CO₂ 含量的目的^[32]。

在國內應用於路面鋪設約達 18%，如：整地、縣市道路、高速公路瀝

青路面鋪設與停車場等；港灣海事工程約有 59%，如：南星計畫(大林蒲填海計畫)^[28]，由中鋼公司 2015 環安報告書中副產物資源化資料所示，參考表 2-7，近年鋼鐵業推行「搖籃到搖籃」(Cradle to Cradle)，使廢棄物成為可再利用資源。但針對中鋼轉爐石資源化再生利用，楊貫一曾提出下列看法^[23]：

1. 轉爐石利用的困難：

由於轉爐石中鐵份的存在，會增加機械設備的磨損及故障，也由於轉爐石的硬度高，故不易研磨成粉。轉爐石中也常含有未反應的石灰(f-CaO)，吸水後會造成轉爐石顆粒的膨脹崩壞，將影響到爾後的再利用範圍。另外，在黃正忻的研究報告中亦發現轉爐石粒料於基底層滾壓後經 2~3 個月，其面層即產生破壞之膨脹現象^[33]。

2. 轉爐石的處理及應用：

轉爐石由於膨脹問題尚未能有效解決，故一般僅將之做初步的填平底窪地的整地處理。另外也有少部份則回收添加高爐，作為調整成分之用途。為能提升轉爐石之處理效率與利用價值，中鋼公司委託其子公司中聯處理轉爐石，以較高效率的破碎磁選設備處理氣冷轉爐石。從表 2-8 中，更可以看出轉爐石的特性及應用在土木工程範疇。

2.2.5 轉爐石的安定

一般轉爐石因含有游離氧化鈣(f-CaO)以及氧化鎂(MgO)，其吸水後將造成的體積膨脹問題，吸水後 f-CaO 會水化為氫氧化鈣($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$)，其體積將會膨脹至原本體積 2~4 倍，MgO 會水化為氫氧化鎂($\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$)，體積膨脹增加約 77%^[2]，這會使得轉爐石結構崩壞、不穩定，此即一般所說之回脹性，致使轉爐石在工程上之應用受到莫大限制；另外，轉爐石鐵份的存在會增加機械設備的損耗及故障率，且轉爐石硬度高，不易將轉爐石原料研磨成粉末使用，總合以上問題，台灣目前轉爐石僅做為填平窪地、填海造陸等利用，也有少部分回收添加於高爐內做為調整成分之用途。

為解決轉爐石之回脹性問題，近年內陸續發表出許多改善方法之研究成果，以下將說明幾項常用之安定化方式^{[23][34]}：

1. 氣淬法

以高壓氣體將高溫熱熔沖碎，冷卻成粒渣，其優點為游離氧化鈣(f-CaO)未釋出，因此游離氧化鈣含量少。但缺點是渣性不佳時，流動性差，容易結成紅渣造成砂瀑。

2. 水淬法

可分為室內水淬法及室外水淬法，利用壓力水泵噴出高壓水柱將經高溫熱融之轉爐渣沖碎，經冷卻成粒渣，優點與氣淬法相同，缺點易結成紅渣造成砂爆。

3. 餘熱自解法

一般是利用 400~800°C 的高溫煉爐鋼渣淋水後，產生熱應力及 f-CaO 吸水(水蒸氣)消解後產生的體積膨脹應力等使煉爐鋼渣冷卻、龜裂及粉化。煉鋼爐渣的粉化率(粒徑小於 10mm 的粉渣含量)與煉鋼爐渣 f-CaO 含量有關，一般含 4% f-CaO 的煉鋼爐渣，粉化率約為 35~40%，並隨著 f-CaO 含量增加而增加。餘熱自解法有以下幾種方式：渣堆自解、渣桶自解、封閉倉常壓自解、密封罐加壓自解。優點是沒有粉塵問題，缺點是若 f-CaO、MgO 含量高時蒸氣用量大，成本相對提高。

4. 淺盤水淬法

將轉爐渣倒入特製的大盤中，熔渣自流成渣餅後噴水使之急速降溫，渣餅龜裂成大塊渣，當渣溫降至約 500°C 時，把渣塊倒進受渣車進行第二次噴水冷卻，渣塊持續龜裂粉化，最後等渣塊溫度降至 200°C 時再把渣塊由受渣車倒入渣池中進行第三次冷卻，渣塊進一步龜裂粉化，水渣由池中取出脫水後即可送去加工，此法對熔渣處理方變、安全性高，但安定性較差。

5. 快速處理法

利用 CO₂ 和溫水對轉爐渣進行快速安定化處理，CO₂ 可來自石灰窯廢氣或其他來源，在溫度 250°C 下經過 48 小時處理，轉爐石之膨脹率可從 5.1% 降至 0.2%。

6. 熱潑法

將爐渣先以渣桶運送到熱潑場，再將熔渣倒在坡度 3-5% 的熱潑床上，待熔渣自流成渣餅稍冷後，噴水使之淬火，爐渣餅因溫度造成殘留應力而龜裂成塊狀，待溫度降至 300~400°C 時，於其上潑第二層，重複上述動作。當渣層總厚度達 500~600mm 時用推土機推起，並磁選出大塊殘鋼，剩餘塊渣即可送去加工。此為目前中鋼公司採用的安定方式，優點為熔渣處理方變，但效果不佳且安定較差。

7. 熱渣改質法

為了降低 f-CaO 和 MgO 的膨脹影響，在轉爐剛倒出爐渣時，爐渣為液態渣的狀態，以噴吹管吹入氧氣繼續加熱爐渣，使爐渣中殘留之 FeO 氧化為 Fe₂O₃，並吹入矽砂或玻璃細粉等改質劑，令其與 f-CaO、MgO 反應形成穩定的矽酸鹽化合物(2CaO + SiO₂ → 2CaO · SiO₂)，或與 Fe₂O₃ 反應形成 2CaO · Fe₂O₃ (2CaO + Fe₂O₃ → 2CaO · Fe₂O₃)，最後將轉爐石中的不安定成分予以消解。經過熱渣改質後的轉爐石(後稱改質轉爐石)其殘餘膨脹率小於 0.4%、游離 CaO、MgO 趨近於零，鹽基度(Basicity)由 4.6~5.7 下降至 2.3~2.5，物理機械性質(如磨損率、硫酸鈉健度、加州承載比 CBR、熱壓膨脹，摩氏硬度 5.5~6.5)皆優於未改質之轉爐石與天然用粒料^{[3][35]}。其改質後的物理性質比較表請參考表 2-7，化學成分比較表請參考表 2-8。

2.3 氧化鋁

2.3.1 氧化鋁取得及應用

鋁在自然界中大多是以氧化物存在，也可形成種類廣泛的氫氧化物。在 1880 年代奧地利的拜耳(Bayer)首先將鋁礦製成氧化鋁(Alumina, Al₂O₃)及氫氧化鋁(Gibbsite, Al(OH)₃)，稱為拜耳法。此法有效地降低氧化鋁的生

產成本，也由於氧化鋁在地球上的蘊藏量僅次於氧化矽，因其取得容易且製作技術純熟，氧化鋁被認為是第 2 大的工業原料礦物，成為現今工業界廣泛運用的材料之一。金屬鋁也是以熱處理過的氧化鋁為原料，溶解在熔融的冰晶石中，再用電解法在陰極還原而得^{[36][37]}。

提煉金屬鋁或是廢棄鋁製品經過提煉金屬鋁後，其所產生的鋁渣為二次鋁渣，其主要成份為氧化鋁(Al_2O_3)、氮化鋁(AlN)及少量之金屬鋁，若直接棄置將會有很大的污染問題^[4]。而氧化鋁是所有結構陶瓷及精密陶瓷中最常用的材料，表 2.1 可知，具有耐高溫、高強度、耐磨、耐化學性及高絕緣性特點，使之成為現代工業中極具重要性的材料^[38]。

氧化鋁可廣泛應用於包括 IC 基板、高強度的材料、電子陶瓷、生醫陶瓷和催化劑(catalysts)以及晶圓之磨料等，此外可以利用凱氏長晶法(Kyropoulos method)將氧化鋁原料熔化生長出高品質的藍寶石單晶(Sapphire)，用來作為發光二極體(LED)的基板，以及精密軸承與光學元件和高功率雷射的透鏡材料。具有潛在的商業價值與前瞻性，值得研究探討與發展^{[38][39]}。

2.3.2 氧化鋁的相變及其結構^{[37][38][39]}

目前已經確定的氧化鋁型態有 α 、 χ 、 η 、 δ 、 κ 、 θ 、 γ 、 ρ 、 β 等 9 種晶格構型，其中 β - Al_2O_3 不是純粹的氧化鋁，其組成中含有鹼金屬離子的 $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O})_{11}\text{Al}_2\text{O}_3$ ，仍習慣視之為氧化鋁的一種。由於氧化鋁中，氧的堆積方式有二種：六方最密堆積(HCP)的 ABAB...型以及面心立方最密堆積(FCC)的 ABCABC...型；而鋁的配位方式亦有二種：氧八面體(Octahedral)格隙位置與氧四面體(Tetrahedral)格隙位置，以這些組合成氧化鋁構造的多樣性^{[38][39]}。

氧化鋁的相變化過程起於不同原料，其相變化路徑有些許不同，但最終皆以穩定的 α 型氧化鋁程現，參考圖 2-15。在傳統燒結製程中，當溫度增加至 $950\text{-}1250^\circ\text{C}$ ， γ 型氧化鋁會相轉變為 α 型氧化鋁，成為最終的穩定

相，而轉變過程中 δ 和 θ 為中間相。僅 α 型具有熱穩定性，其他結晶型態皆為氫氧化鋁熱分解成 α 型氧化鋁過程中呈現的過渡結晶型態。在獲得最終穩定相 α - Al_2O_3 前，會產生許多不同的過渡結晶型態，且均為不可逆 (irreversible) 之反應，各種氧化鋁之結晶相如下所述^{[39][40]}：

1. γ - Al_2O_3

如圖 2-16 所示， γ - Al_2O_3 晶體為具有尖晶石或類似尖晶石的構造，氧原子在 FCC 位置，而鋁離子則不規則填充在四面體及八面體之格隙位置，至於陽離子空位的乃隨機分布於結構當中。此結構使 γ - Al_2O_3 硬度不高，具有較大的表面積，亦有較良好的吸附力和催化活性，也較 α - Al_2O_3 活潑，易溶於酸或鹼溶液，又叫活性氧化鋁^{[41][45]}。 γ - Al_2O_3 於常溫下含有少量水，藉由加熱脫水之後，其晶格常數會產生變化，因此可以認定是表面吸附水的情況。所以在不同溫度會產生近似 *Tetragonal* ($c/a=0.977$) 或是近似 *Cubic* 結構 ($c/a=0.995$) 之變化。

2. δ - Al_2O_3

如圖 2-17 所示， δ - Al_2O_3 與 γ - Al_2O_3 同為尖晶石結構。可考慮將 γ - Al_2O_3 作為正方晶時， δ - Al_2O_3 之晶格常數比為 $c=3a$ 或是 $c=3/2a$ 。 δ - Al_2O_3 是位於尖晶石結構中八面體配位的位置上，並且以平行 c 軸方向，以旋轉對稱方式呈現有秩序排列。

3. θ - Al_2O_3

θ - Al_2O_3 是加熱生成物，它是屬於單斜晶系，如圖 2-18 所示。結構中氧離子具有相當傾斜的 FCC 方式排列，Al 的 $\frac{1}{2}$ 是位於 4 配位，另外 $\frac{1}{2}$ 是位於 6 配位的位置。以 AlO_4 四面體共角以及 AlO_6 八面體共邊之方式連接。

4. α - Al_2O_3 ^[41]

α - Al_2O_3 剛玉的主成份，也為氧化鋁的最終穩定相，屬於六方晶 *Hexagonal*，單位晶胞含有 30 個原子，密度為 3.98g/cm^3 ，其特性如

表 2-10 所示。其中氧原子之排列為 HCP，鋁原子則填充於 $\frac{2}{3}$ 的八面體配位位置。構造中氧原子以 ABAB 的最密堆積方式排列。如圖 2-19 所示， $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的 c 軸是由六層氧原子所組成，氧原子層的重疊方式為鋁原子分佈的 3 層週期以及氧原子六方最密堆積的 2 層週期所構成。所以單位晶格具有 6 層鋁原子八面體位子，可以形成共點、共角以及共面的構造。結構中鋁原子與氧原子形成強固的離子鍵，莫氏硬度為 9，因此硬度極高。因為晶體結構，使得 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的熔點和硬度都很高，且不溶於水，也不溶於酸或鹼，耐腐蝕且電絕緣性好，可做為研磨材料和耐火材料。

2.3.3 α -氧化鋁摻雜混凝土

在過去的文獻顯示， $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末有利於混凝土之強度和使用性能的提高，且隨著 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末的粒徑增加，其抗壓強度逐漸下降，反觀，隨著 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末的粒徑減少，其活性越高，分散性越好，促使混凝土的分散性和減水效果越好^[42]。

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末加入量在 14% 以前，混凝土漿體黏度隨 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末加入量增加而上升，是因混凝土漿體的稠度增加，流動度下降；當 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末加入量達到 14% 時，微粉填充毛細孔的作用加強，使未膠結的水增加，混凝土漿體結構減弱，黏度下降；當 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末加入量達 18% 以後，過多微粉的參與作用，使得混凝土漿體中懸浮顆粒的濃度和總吸附性增加，黏度又上升。又隨著 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末加入量的增加，其抗壓強度呈上升趨勢，體積密度增加，顯孔隙率降低^[43]。倘若 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末達到奈米級(平均粒徑約 15 nm)，當其取代細骨材比例達 1% 時，其強度可以達到最佳，而隨著 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 奈米級粉末的添加，坍度持續下滑，可能是和細微粉末的表面積較大有關係^[44]。

表 2-1 水泥中化學的簡寫符號

縮寫	完整化學式
C	CaO
S	SiO ₂
A	Al ₂ O ₃
F	Fe ₂ O ₃
\bar{S}	SO ₃
H	H ₂ O
CH	Ca(OH) ₂

表 2-2 波特蘭水泥主要成份特性

組成成分		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
化學式		3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃
學名	中文	矽酸三鈣	矽酸二鈣	鋁酸三鈣	鐵鋁酸四鈣
	英文	Tricalcium Sicate	Dicalcium Sicate	Tricalcium Aluminate	Tetracalcium Alumino Ferrite
結晶狀態		單斜體	單斜體	立方體	長方體
水化反應性質	水化速度	快	慢	最快	中等
	早期強度	良好	低	最佳	低
	晚期強度	良好	最佳	低	中等
	水化熱	中等	低	最高	中等
	主要水化產物	C-S-H膠體、Ca(OH) ₂	C-S-H膠體、Ca(OH) ₂	鈣氫石、單硫鋁酸鈣	單硫鋁酸鈣

表 2-3 水泥主要成份特性表

成份	含量	特性	ASTM C150 規定
C ₃ S	25~60%	是混凝土產生強度主要的因素，對於早期強度貢獻大，但水化過程中會產生高水化熱。	於低熱水泥中含量需小於 35%
C ₂ S	15~50%	提供混凝土晚期強度，含量較多時會影響混凝土早期強度，水化熱低，對於混凝土體積穩定性有幫助。	於低熱水泥中含量需大於 40%
C ₃ A	4~12%	活性大且水化速度快，加速水化早期的凝固，易因瞬凝而降低工作性；水化熱高，對於混凝土體積穩定性影響大。	含量不宜過多，除早強水泥外，其餘皆小於 8% 以下
C ₄ AF	5~12%	水化反應最慢，故水化熱低，早期強度亦低；抗硫性也差。	抗硫水泥應小於 20 %

表 2-4 硬固水泥漿體之成份及特性^[49]

組成成份	C-S-H 膠體	氫氧化鈣 Ca(OH) ₂	硫酸鈣鹽類		毛細孔隙	未水化部分
			鈣鈣石	單硫型鋁酸鈣		
體積百分比 (%)	55	20	10	--	10	5
密度(kg/m ³)	2000	2250	1750	1950	0	3180
尺寸 (μm)	1.0x0.1	0.01~1	0.5~10	1x1x0.1	>100 Å	~1
晶體外觀	刺球狀之連續母體	六角型薄片狀	六角型細長針狀	六角薄片狀與不規則玫瑰撞	--	--
結晶行為	極差	很好	好	尚可	--	--

表 2-5 轉爐石之化學成份

化學物質	含量 ¹ (%)	含量 ² (%)	含量 ³ (%)	含量 ⁴ (%)
氧化鈣 (CaO)	42~52	40~52	42	35~49
二氧化矽 (SiO ₂)	10~20	10~19	15	8~18
氧化亞鐵 (FeO)	15~35	10~40	24	17~35
氧化錳 (MnO)	3~10	5~8	5	1~5
氧化鎂 (MgO)	1~8	5~10	8	1~10
三氧化二鋁 (Al ₂ O ₃)	0.5~3	1~3	5	0.5~7
五氧化二磷 (P ₂ O ₅)	1.5~4	0.5~1	0.8	1~3
硫 (S)	0.25	<0.1	0.08	—
氧化鉻 (Cr ₂ O ₃)	< 2	—	—	0~0.5
CaO/ SiO ₂	4	—	—	—
Free-CaO	3~13	—	—	—

資料來源：

- 1 .Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure (SAM-06-DE05) .
- 2 .Turner Fairbank Highway Research Center, Material Description for Steel Slag.
- 3 .National Slag Association, Steel Slag-A Premier Construction Aggregate.
- 4 .中鋼、中龍 98、99 年度統計資料。

表 2-6 為先進鋼鐵國家在煉鋼爐渣資源化近況統計表

資源化用途	資源化數量之分佈(%)					
	歐盟 EUROSLAG (2007)	日本 SLG		德國 FEhS (2006)	美國 NSA (2007)	澳洲及 紐西蘭 ASA (2008)
		電爐渣	轉爐渣			
廠內回收 (包括渣、殘銑及殘鋼)	4	2.3	15.2	13.4	-	-
工程 材料	道路石料		35.4	19.8	51.3	
	瀝青混凝土骨材			43.9	14.4	48
	鐵道渣	45	-	-	2.3	
	地基改良		4.3	5.5	4.4	13.3
	土木工事		34.5	47.4	18.8	12
	混凝土骨材		1.6	3.5	-	
	港灣/堤岸工程	2	-	-	3.7	-
製 造 原 料	水泥原料		0.9	5.6	-	6.7
	加工用原料	37	9.8	0.2	-	-
肥料/土壤改良	2			4.8	-	-
其他(下游販售殘銑等)	-	2.7	1.1	-	-	-
掩埋/堆置	7	8.4	1.6	10.2	-	-
堆存	3	-	-	0.8	12	20
合計	100	99.9	99.9	100	100	100
總量(萬噸)	4550	526	1076	584	780	340

資料來源：日本爐渣協會(SLG)、美國爐渣協會(NSA)、德國鋼鐵爐渣研究協會(FEhS)、
澳亞爐渣協會(ASA)及歐洲爐渣協會(EUROSLAG)。

表 2-7 2015 中鋼副產物年產量

種類	產出特性	年產量 (萬噸)	百分比 (%)	廠內回 收(%)	廠外回收 (%)	資源化用途
高爐石	高爐將原料熔煉成鐵水時產出	278.9	49.7	2.0	98.0	水淬後生產爐石粉，或氣冷後作為各類工程材料。
轉爐石	鐵水經過轉爐精煉成鋼液時產出	114.0	20.3	13.3	86.7	回收殘鋼及部份作為燒結工場原料，其餘作為整地、臨時道路、瀝青混凝土骨材及混凝土助劑。
脫硫渣	鐵水經過脫硫處理後產出	32.0	5.7	0.0	100.0	回收殘鐵後用於整地、臨時道路、土壤改良材料、低強度混凝土及水泥製造原料。
集塵灰	製程除塵系統收集的粉塵(包括煤灰)	34.1	6.1	97.7	2.3	除了煤灰與礦泥拌混後作為水泥製造原料、以及轉底爐產出的氧化鋅粉直接外售日本提煉鋅金屬之外，其餘全部用為廠內的煉鐵原料。
礦泥	含有礦物粉塵的廢水經過處理、濃縮及脫水後的產物	38.3	6.8	86.1	13.9	電鍍鋅線產出的高鋅礦泥直接外售日本提煉鋅金屬，其餘優先在廠內回收做為煉鐵原料，無法回收者則外售水泥廠做為水泥製造原料。
銹皮	生產過程中鋼鐵表面除銹產生之氧化鐵副產物	30.5	5.4	99.7	0.3	回收做為煉鐵原料。
廢耐火材	高溫設施汰換下來的殘餘耐火材料	8.1	1.4	53.4	46.6	回收殘鋼及部份作為煉鋼助熔劑、渣桶保護材外，其餘供應商逆向回收作為耐火材原料。
營建棄土	營建工程產出的土方	7.3	1.3	0.0	100.0	南星計畫 101 年關閉，102 年棄土作為土資場材料。
石灰石泥餅	石灰石經水洗及脫水產出的塊狀物	1.0	0.2	100.0	0.0	回收做為煉鐵原料。
其他	包括爐石鋼、冷凝鐵、脫硫渣鐵、煤灰、橡膠墊子、廢油脂、冷軋廢油、廢油桶、鋅渣等	17.5	3.1	52.2	47.8	主要是廠內回收，其餘由供應商逆向回收、外售、執行機關回收及處理廠家處理等。

表 2-8 天然骨材、轉爐石、改質轉爐石各項物理性質比較表^{[24][52]}

	天然粒料	轉爐石(渣盤料)	改質轉爐石
洛杉磯磨損率(%)	24.2	16.6	7.4~10.1
硫酸鈉健度 (%)	≤3	1.33	0.2
虛比重 (Bulk Density)	2.63	3.44	3.45
面乾內飽和比重	2.64	3.45	3.46
扁平率 (%)	7.1	0.4	2.6
浸水膨脹率(%) (ASTM D4792)	0	1.5~3.5	0
加州承載比 C.B.R.	--	108	343
熱壓膨脹(%)	--	有風險，須磨細且適量 添加	每批改質零失敗，則無 風險
Vicker's Hardness(Hv)	--	450	580
Mohr's Hardness	--	5.0-6.0	5.5-6.5

表 2-9 轉爐石、改質轉爐石各項化學成分比較表^{[24][52]}

Typical chemical properties										
Items	pH	Dioxin (ng I-TEQ/g)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Tot. Fe(%)	MnO (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)
轉爐石	12.1-12.4	<0.001	35-49	8-18	17-35	1-5	1-10	0.5-7.0	1-3	0-0.5
改質轉爐石	11.5	--	42.25	18.21	27.31	2.79	5.95	3.14	P:1.0	0.21
天然碎石	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

表 2-10 α -Al₂O₃ 基本性質

Properties	Value
Density	3.98g/cm ³
Crystal Structure	Hexagonal (HCP) (a=4.758Å、c=12.991Å)
Hardness	1520~2000 kg/mm ²
Compressive Strength	2GPa
Flexural Strength	895MPa
Young's modulus	435GPa
Melting Point	2040°C

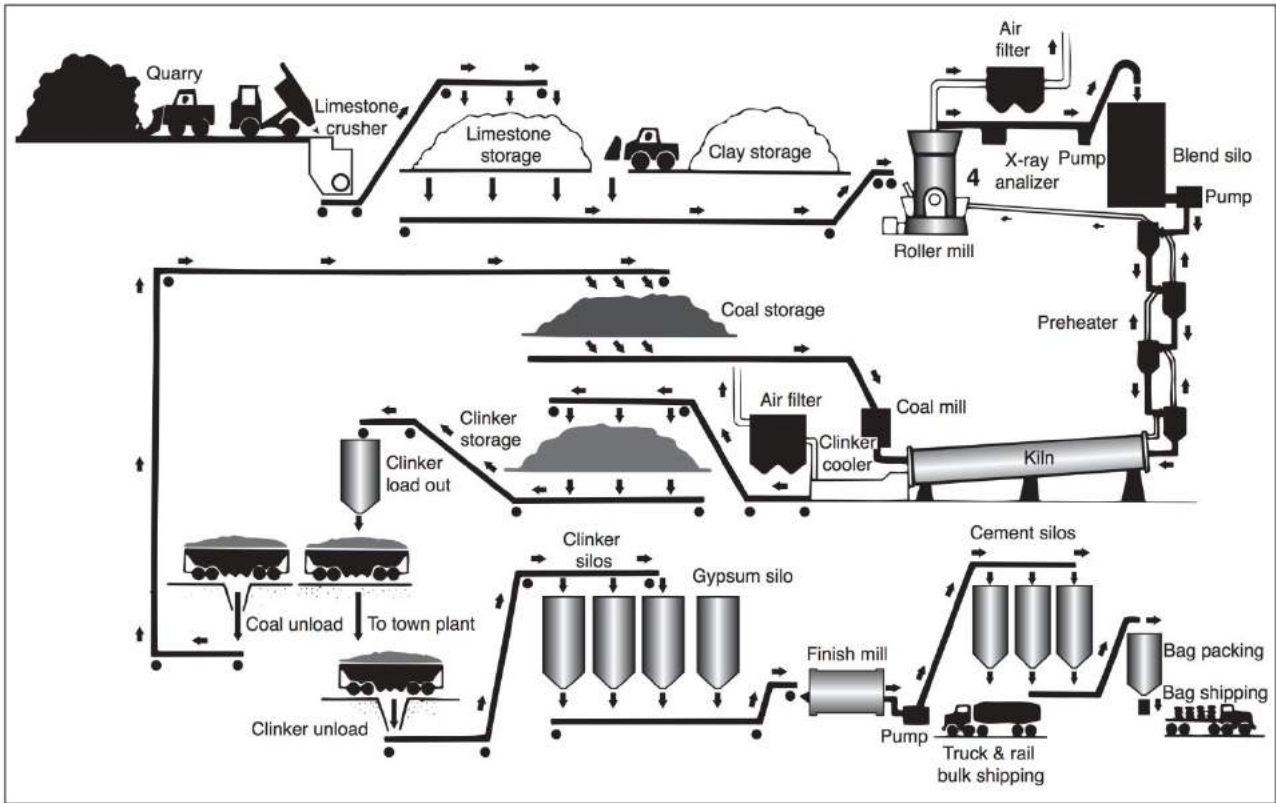
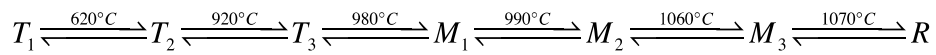


圖 2-1 波特蘭水泥燒結製作流程^[4]



(T= Triclinic, M= Monoclinic, R=Rhombohedral)

圖 2-2 C_3S 的相轉變^[15]

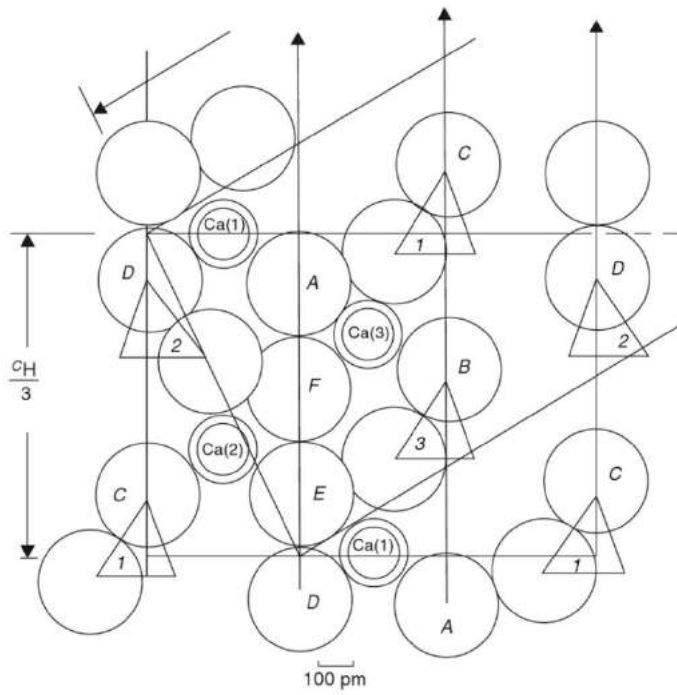


圖 2-3 C_3S 微結構圖^[4]

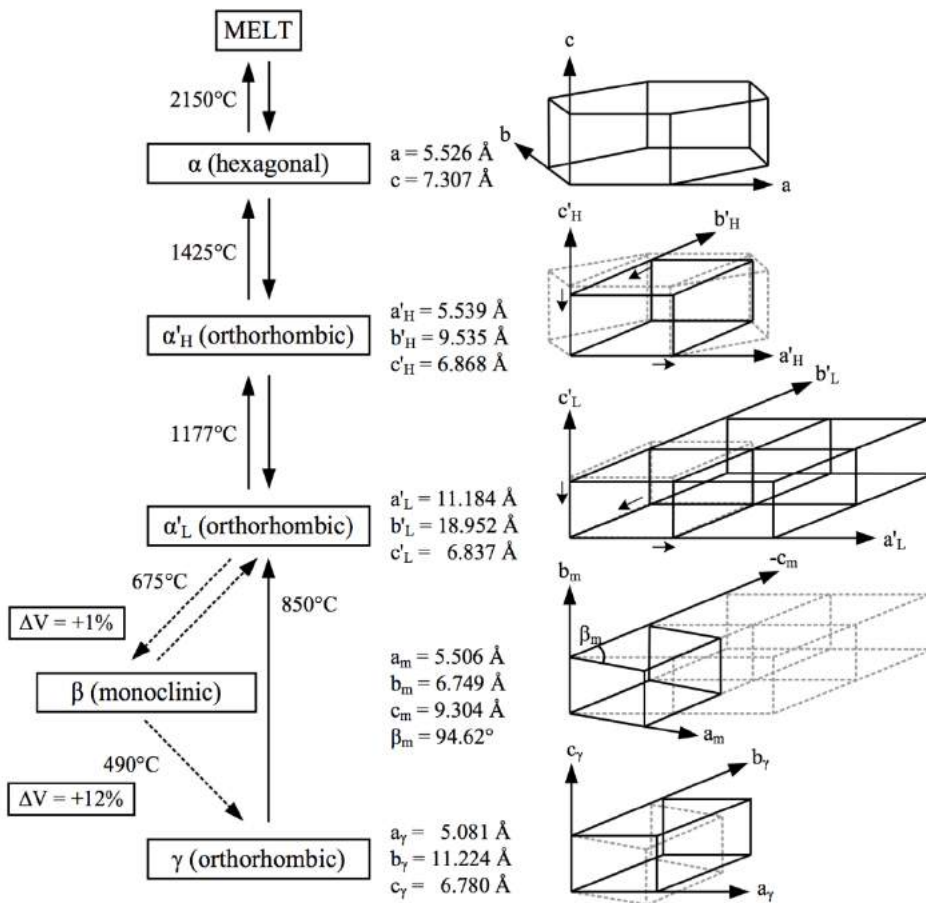


圖 2-4 C_2S 相轉換微結構圖^[7]

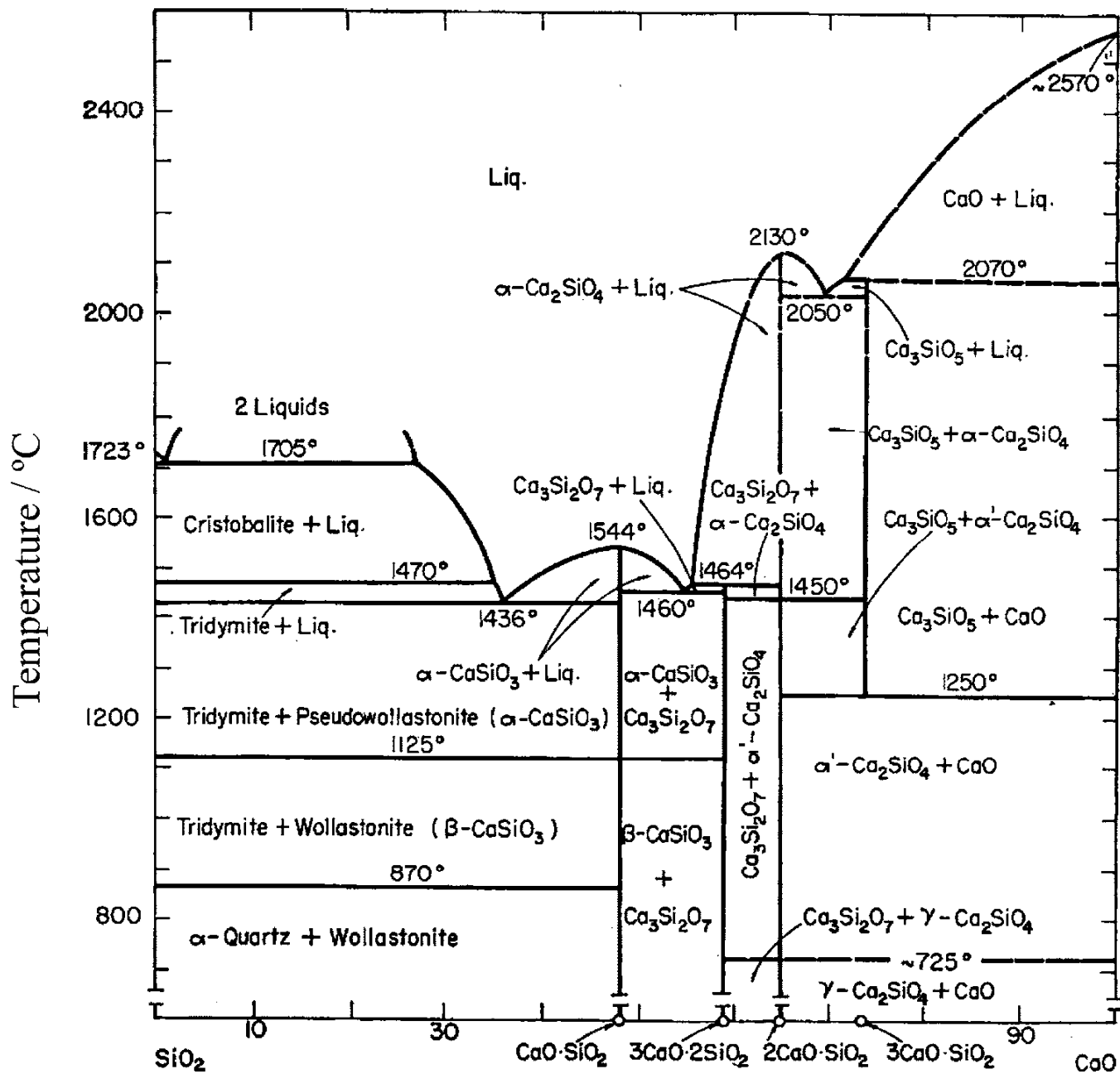


圖 2-5 CaO-SiO₂ 二元系統相平衡圖^[45]

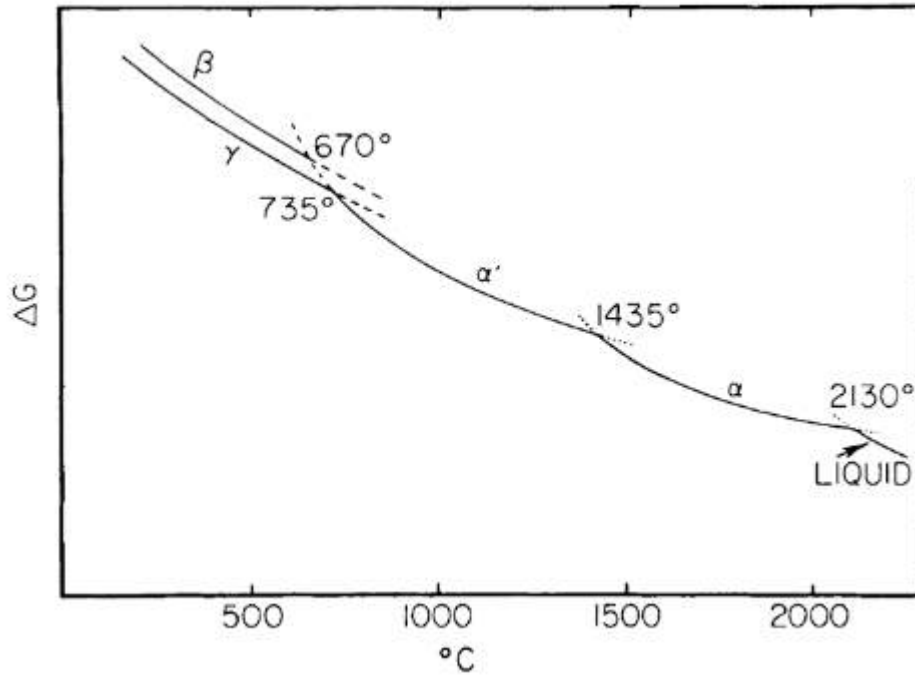


圖 2-6 C_2S 相轉換之各階段 Gibbs free energy 變化^[45]

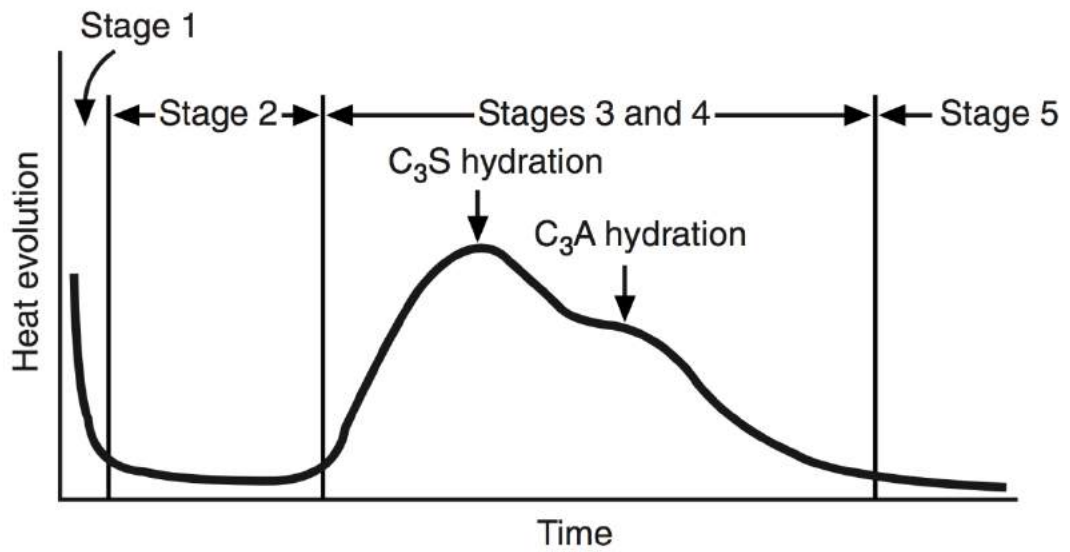
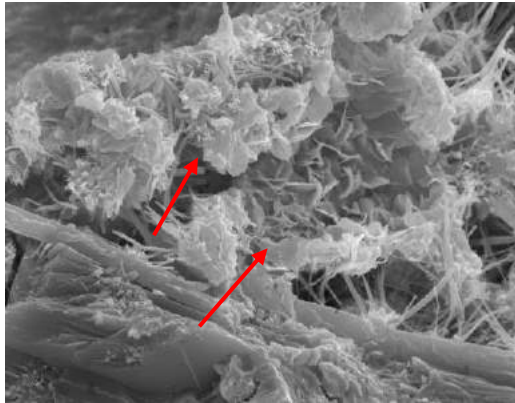
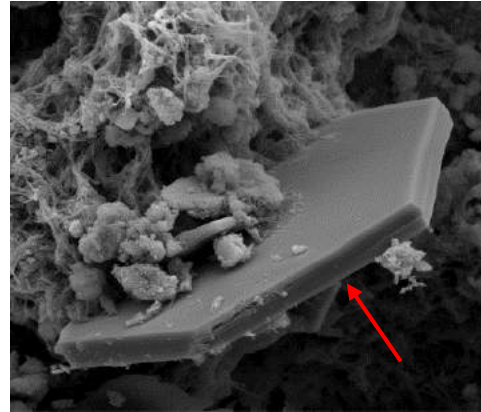


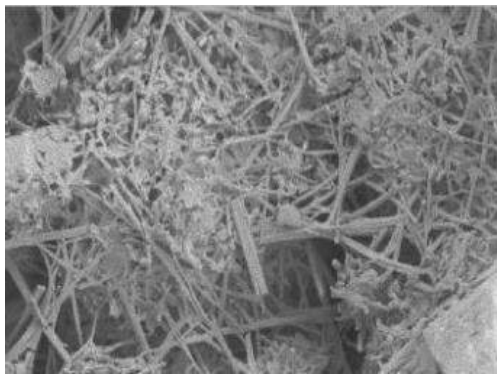
圖 2-7 波特蘭水泥變化^[46]



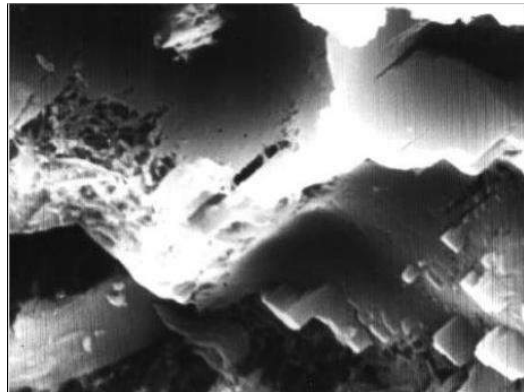
(A) C-S-H 膠體



(B) CH 晶體



(C) 鈣氫石



(D) 單鋁硫酸鈣

圖2-8 典型水泥水化產物之SEM照片^[48]

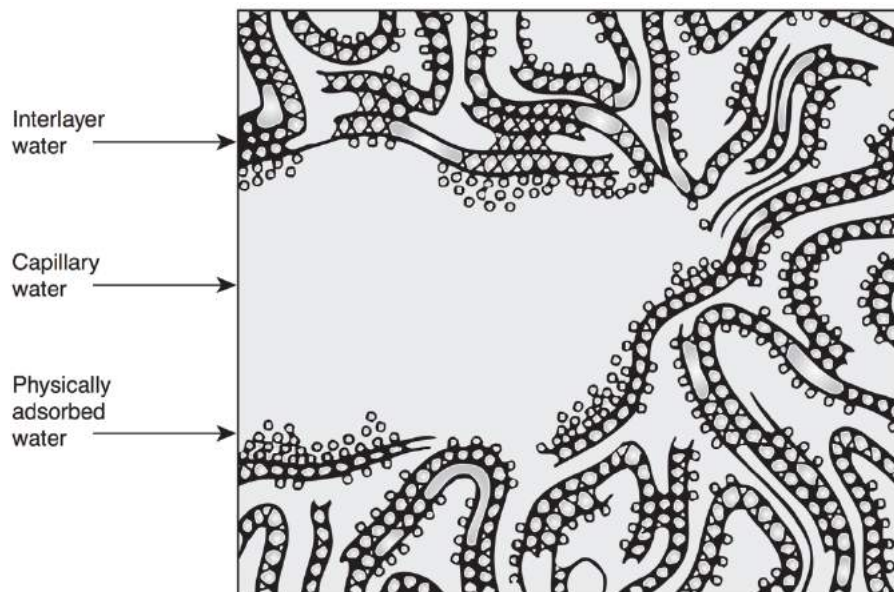
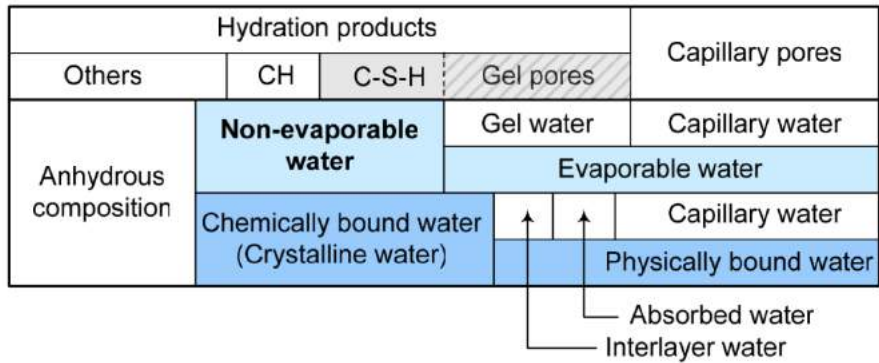


圖2-9 水泥孔隙水示意圖^[4]



Method to remove:

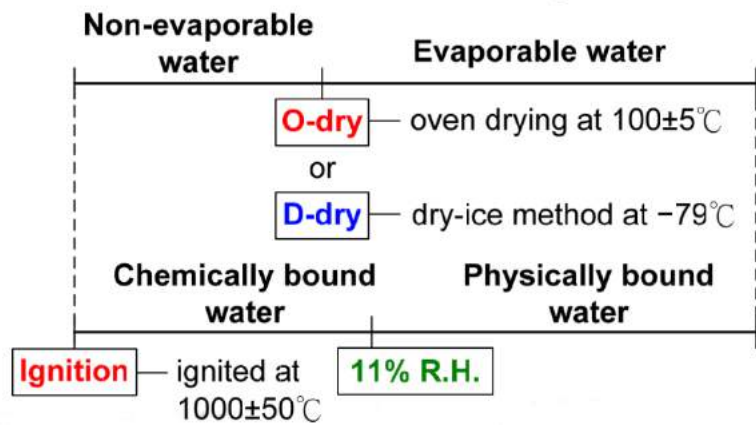


圖2-10 水泥漿體中水分之定義及移除方式

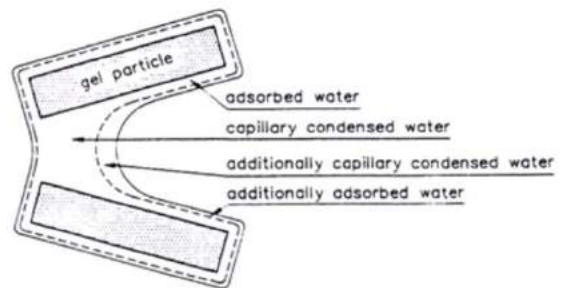
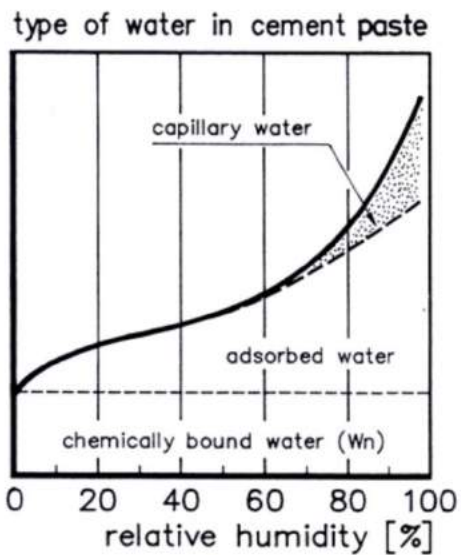


圖2-11 水泥漿體中水分之分類^[20]

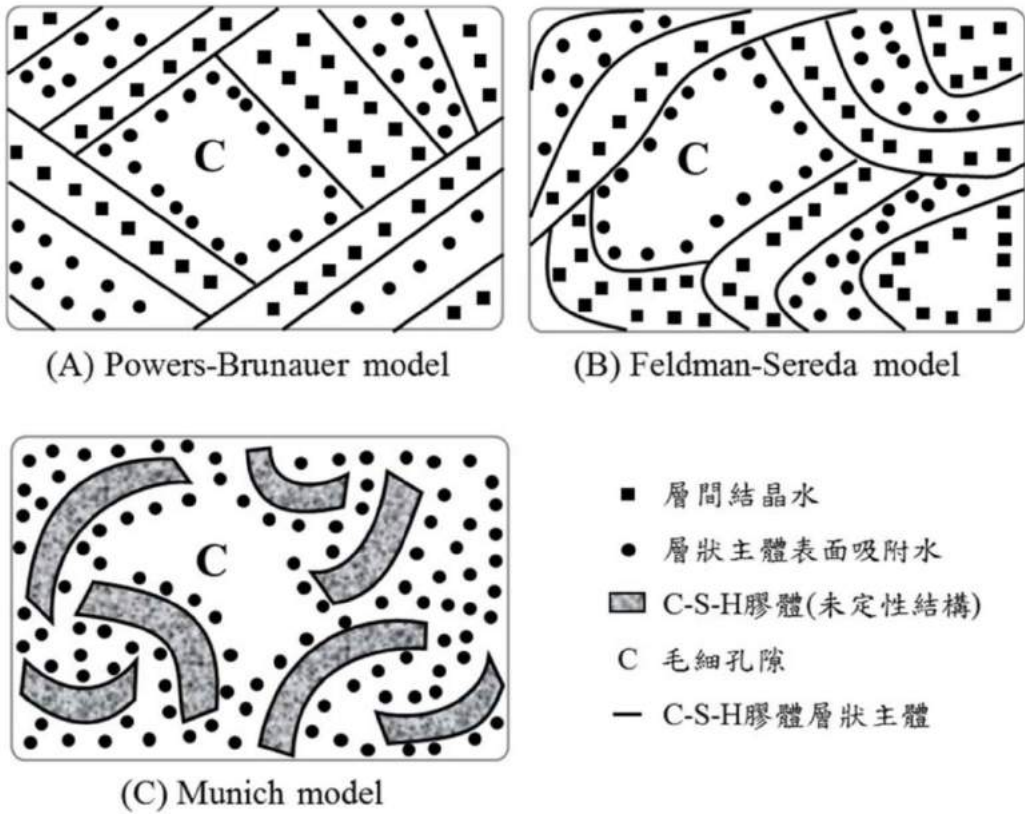


圖2-12 水泥砂漿微觀結構理論模式示意圖^[1]

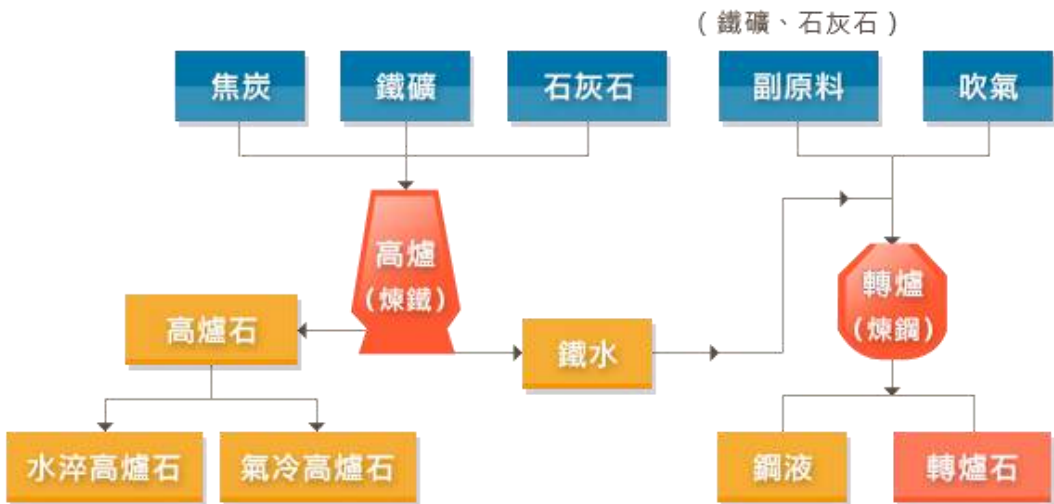


圖2-13 轉爐石產出流程圖^[3]

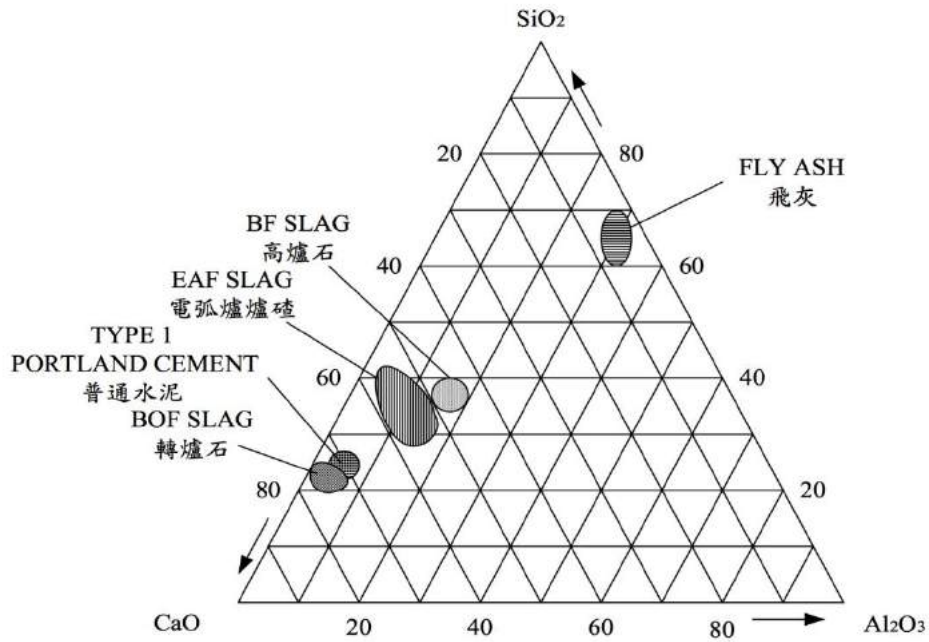


圖2-14 CaO-SiO₂-Al₂O₃系統圖^[25]

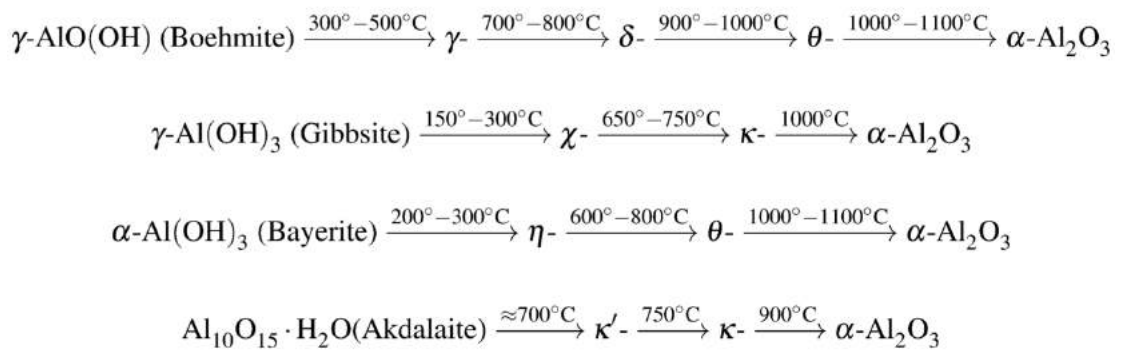
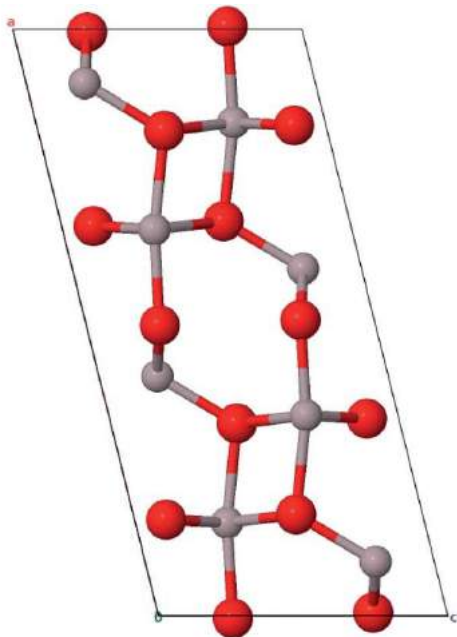
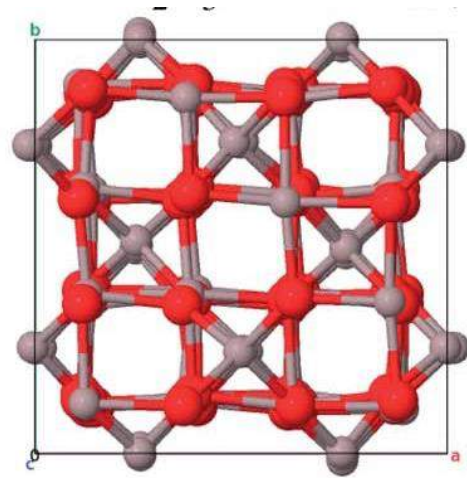


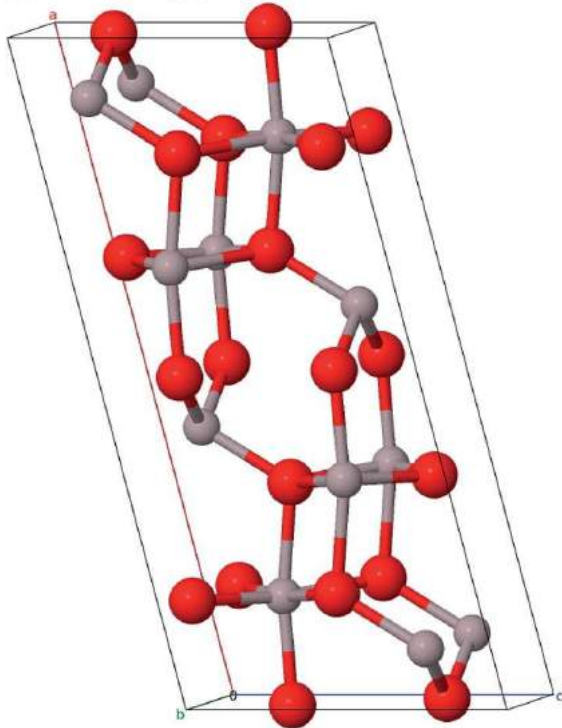
圖2-15 Al₂O₃相變化簡要圖^[50]



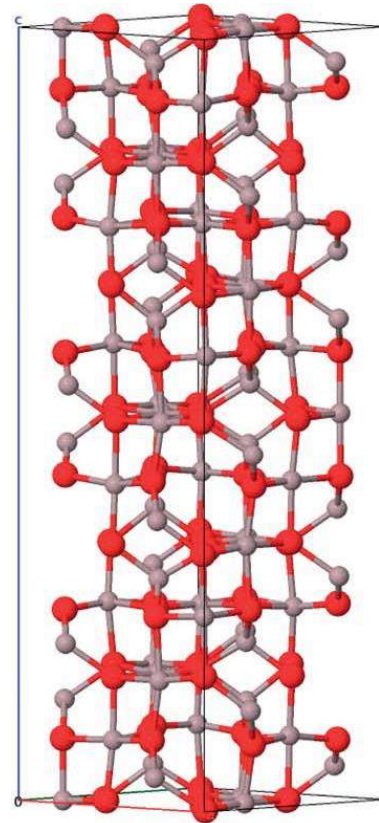
(a) δ -FE- Al_2O_3 , view along $\langle 001 \rangle$



(a) View along $\langle 010 \rangle$



(b) Perspective



(b) δ -FE- Al_2O_3 , perspective

圖 2-16 γ - Al_2O_3 單位晶胞^[50]

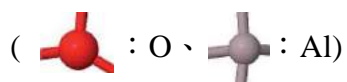
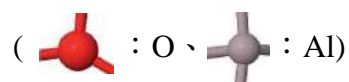
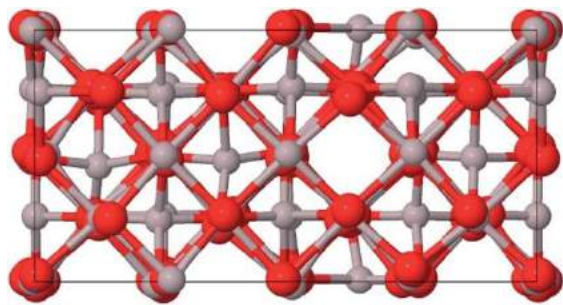
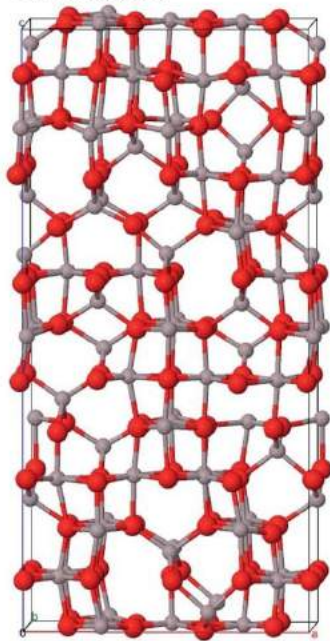


圖 2-17 δ - Al_2O_3 單位晶胞^[50]



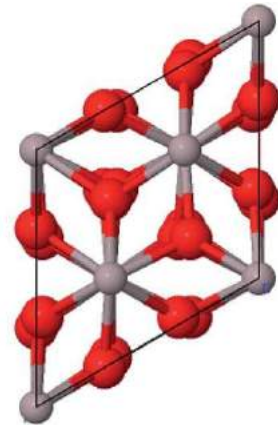
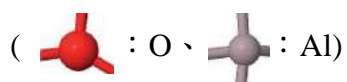


(a) View along $\langle 001 \rangle$

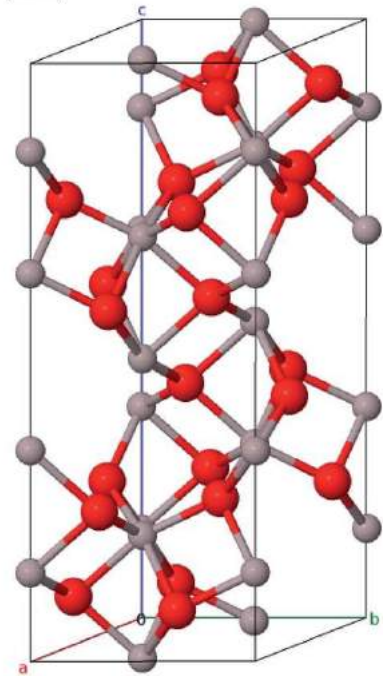


(b) Perspective

圖2-18 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 單位晶胞^[50]

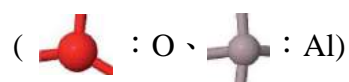


(a) View along $\langle 001 \rangle$



(b) Perspective

圖2-19 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 單位晶胞^[50]



第三章 研究方法與步驟

3.1 試驗參數

一般結構混凝土主要由粗骨材、細骨材、水泥漿體組成，其力學性質取決於骨材與水泥漿體材料兩大部分，透過水泥漿體包覆骨材表面，作為骨材與骨材間的黏結，並利用細骨材合併漿體填充粗骨材顆粒之間的孔隙，而水泥漿體更進一步填充各骨材間的孔隙，成為一具有力學強度之構材。對於混凝土而言，骨材種類、骨材粒徑及形狀、水灰比以及漿體使用量皆為混凝土設計的重要參數。以下說明各參數之設計概念：

3. 骨材種類

本研究在骨材的選擇上以「熱渣改質轉爐石（後稱改質轉爐石）」為骨材，一方面可以將資源利用最佳化，解決副產物過量的問題，另一方面系因改質轉爐石含有些許金屬成分^[16]，因此強度較天然河床砂石膏，改質轉爐石中殘餘極少量的 f-CaO 和 MgO 吸水後仍會轉變為 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，另因轉爐石含有二氧化矽(SiO_2)，會被水泥漿體以及自身少量的矽酸鹽類反應後所產生氫氧根離子(OH^-)破壞，進一步形成「鹼—矽膠體」($\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，而此膠體遇水會吸水膨脹之情形，即所謂「鹼—骨材反應」。細骨材則是部分以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的細微粉末取代，大部分仍選用改質轉爐石製成的細骨材，透過 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的細微粉末能使微小的孔隙能被填充，達到試體強度增強。

4. 骨材粒徑及形狀

在單位體積內，使用不同粒徑之骨材堆疊時，骨材粒徑較大者的顆粒數會少於較小粒徑的骨材，意味著骨材與骨材間的接觸點也有差異，而接觸點的多寡對於力學性能的影響；骨材自細至粗級配均勻，不讓某種粒徑之材料超出規定範圍，而導致不佳之工作度。

又骨材愈近乎圓球形，骨材間的互制力及磨擦力，不若角狀形骨材大，所製成混凝土之工作度愈佳。若將骨材形狀視為圓形顆粒的理想狀

態下，可知骨材與骨材經過緊密堆疊後，無論是任何骨材粒徑大小，在單位體積中堆疊所產生的總孔隙體積差異不大。但粒徑大的骨材所堆疊產生的孔隙會比粒徑小的骨材堆疊產生的孔隙來的大，即骨材間的孔隙大小，與骨材本身粒徑大小為正相關，如圖 3-1 所示。

本次實驗選用三種細骨材：天然細骨材、改質轉爐石細骨材、標準細骨材來進行本次的第一階段試驗的細骨材。在第一階段試驗的轉爐石粗骨材的粒料選用，分為 6 分轉爐石(15 mm ~19.0 mm)、3 分轉爐石(8mm~15mm)、2 分轉爐石(3.5mm~8mm)三種。從過去文獻中，取樣以重量比 6 分轉爐石：3 分轉爐石：2 分轉爐石=4：4：1 可讓粗骨料達優良級配^[52]。

5. 水灰比

混凝土的設計除考慮力學性質，亦須注意其工作性，當水灰比過低，致使混凝土漿體拌合困難，且將體過於乾硬亦會造成澆灌上之困難，可能使整體結構不均質，促成結構上的脆弱面，造成實驗力學強度下降。反之，若水灰比過高，漿體流動性高，在澆灌過程因自重而垂流，造成結構體之上半部漿體裹覆不完全，下半部近乎被漿體填充，此一材料內部不均現象，可能導致實驗力學強度的下降。

根據混凝土的配比設計及流動性試驗的經驗，選擇流動性較適中的 0.35、0.4、0.485、0.5 做為第一階段試驗之初始水灰比，在選定第一階段流動性較適中的水灰比進行第二階段試驗，並依試驗情形調整。

6. 漿體使用量

骨材間孔隙主要由水泥漿體填充膠結，不同的漿體使用量，成為影響混凝土力學強度的重要因數。漿體使用量愈高，骨材間的孔隙就會愈少，使得整體結構更緻密，且使用較多之漿體，能充分且有效的包覆骨材表面，對於混凝土的力學強度有正相關影響。

7. 配比設計

(5) 第一階段試驗：

本階段的水灰比採用 ASTM C109-80、CNS1010 之配比設計，採用水泥：砂(砂骨材)=1：2.75 進行設計，並採用四種水灰比依序為 0.35、0.4、0.485 及 0.5 進行水量的調整，搭配標準細骨材、天然細骨材及改質轉爐石細骨材，進行試驗，在試驗中找到工作性適中與強度兼顧的水灰比，已進行第二階段試驗。

(6) 第二階段試驗：

本次使用 ACI 211.3 之「體積法」去設計不同比例添加的混凝土，探討添加前後試體其強度變化狀況，體積法之配比設計步驟流程如圖 3-2 所示。故根據改質轉爐石之利用及氧化鋁粉的添加與否分為以下幾種配比：

- A. 設計以重量比 6 分轉爐石：3 分轉爐石：2 分轉爐石=4：4：1 取代天然粗骨材及波特蘭水泥來施作。
- B. 設計 α -Al₂O₃ 細微粉末部分取代細骨材總重量分別為 1.0%、1.5%、2.0% 之混凝土試體，搭配天然骨材及波特蘭水泥來施作。
- C. 設計 α -Al₂O₃ 細微粉末部分取代細骨材總重量分別為 1.0%、1.5%、2.0% 之混凝土試體，搭配 6 分轉爐石：3 分轉爐石：2 分轉爐石=4：4：1 取代天然粗骨材及波特蘭水泥來施作。

3.2 試驗材料

1. 水泥

本研究使用台灣水泥公司所生產之波特蘭第 I 型水泥，符合 CNS 61 規範。其物理性質如表 3-1，化學性質如表 3-2。

2. 拌合水

本研究採用國立中山大學海洋環境及工程學系結構材料實驗室之自來水做為拌合用水。符合 CNS 1237 混凝土拌合用水之要求。

3. 天然骨材

本研究採用之天然骨材為高雄市城誠隆建材行購買，粗骨材及細骨材皆來自屏東縣里港的河床天然砂石，外觀如圖 3-3 所示。根據規範 CNS486、CNS 1163 分析之，性質均符合 CNS1240 之要求，相關試驗內容請參考 3.3.1~3.3.3，結果請參考表 3-5、3-8、3-9、3-16。

4. 標準細骨材

本研究採用符合 ASTM C778 要求之 20~30 標準砂，外觀如圖 3-4 所示。根據規範 CNS486、CNS 1163 分析之，相關試驗內容請參考 3.3.1~3.3.3，結果請參考表 3-6、3-8、3-9、3-16。

5. 轉爐石

本研究使用中聯資源工程所提供之轉爐石，取其粗骨材的三種粒徑(二分石、三分石與六分石)以及細骨材當作本研究之使用。化學成分如表 3-3、物理性質如 3-4 所示。外觀如圖 3-5、3-6 所示。根據規範 CNS486、CNS 1163 分析之，相關試驗內容請參考 3.3.1~3.3.3，結果請參考表 3-7、3-8、3-9、3-11、3-16。

6. α -Al₂O₃ 奈米粉末

7. 採用台灣船鈞股份有限公司進口之 α -Al₂O₃ 奈米粉末。其外觀如圖 3-7 所示，物理性質如表 3-11 所示。

3.3 試驗項目及方法

3.3.1 細骨材之含水量、比重、面乾內飽和水量及表面水量之試驗

➤ 參考規範：

ASTM C-128，ASTM C-566，CNS 387，CNS 1240，ASTM C-70，CNS 487 CNS 489

➤ 實驗目的：

求出細骨材之實際含水量、比重、面乾飽和水量與表面水量，作為配比拌合時的參考。比重值以面乾內飽和之細骨材為準。細骨材之比重一般約在 2.6~2.7 之間，比重較大者吸水率較小，其耐久性與強度表現皆較為優秀。

骨材表面水量會影響到骨材之單位體積重，顆粒越小者其影響程度越高，乃由於骨材表面之水膜會阻止顆粒間互相接處，且水分會佔去整體體積，而減少單位體積率。

➤ 實驗步驟：

1. 含水量測定：

- (1) 用四分法秤取試樣約一公斤記為 W_1 。
- (2) 置入烘箱(參考圖 3-8)，於 $110\pm 5^\circ\text{C}$ 烘乾 24 小時至恆重。
- (3) 取出秤其重量記為 W_2 (取試樣之旅盤須先烘乾後置於室溫下使冷卻至室溫)。

2. 面乾內飽和時含水量測定：

- (1) 將試體浸水 24 小時(水面需淹過試體)。
- (2) 取出攤放於不吸水平台以風扇吹乾。
- (3) 隨時以手緊握試體，確認試體乾燥程度，當達到微乾程度時關閉電風扇。

(4) 將試體分兩層裝入圓錐鐵模(參考圖 3-9)後提起，圓錐鐵模提起時，若是體保持原狀則繼續重複 b、c 步驟，直至圓錐鐵模提起時不能保持原狀而自然崩塌，此時試體為面乾內飽和狀態。

(5) 秤其重量為 W_3 。

3. 比重測定：比重瓶法

(1) 將清水裝入比重瓶(參考圖 3-10)中至規定刻度，秤其重量為 W_4

(2) 倒出約一半之水量，以漏斗倒進呈面乾內飽和狀態之 100g 砂樣試體，搖動比重瓶以逐出內部氣泡。

(3) 再加水至規定刻度後秤其重量為 W_5 。

➤ 公式計算：

1. 各含水乾重之百分比：

$$(1) \text{ 含水量 } M' = \frac{w_1 - w_2}{w_2} \times 100\%$$

$$(2) \text{ 面乾飽和水量 } M's = \frac{w_3 - w_2}{w_2} \times 100\%$$

$$(3) \text{ 表面水量 } M'o = M' - M's = \frac{w_1 - w_3}{w_2} \times 100\%$$

2. 各含水量對面乾飽和狀態的百分比：

$$(1) \text{ 含水量 } M = \frac{w_1 - w_2}{w_3} \times 100\%$$

$$(2) \text{ 表面水量 } M_0 = M - M_s = \frac{w_1 - w_3}{w_3} \times 100\%$$

3. 比重計算：

$$\text{比重 } \rho_r = \frac{100}{(100 + w_4) - w_5}$$

3.3.2 骨材標準篩分析

➤ 參考規範：

CNS 486，ASTM C-136

➤ 實驗目的：

本實驗之目的為以篩分法來決定粗細骨材之粒徑分布。藉由骨材篩分析可以得知粒料組成的情況，並依此定義細度模數，作為混凝土配比設計依據。

藉由篩分析可以瞭解粗骨材之最大粒徑，同時可篩選適當尺寸的粒料作為拌合使用，一般混凝土所使用之骨材，細骨材之細度模數(F.M.)為 2.3~3.1 之間；粗骨材則以 5.5~7.5 為佳。

➤ 實驗步驟：

1. 試體準備：

將試體於 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾至恆重。

2. 試體秤取：

以四分法秤取規定所需之試樣，規定如下：

(1) 細骨材：

(a) 通過#8 篩佔 95% 以上---最少 100g。

(b) 通過#4 篩佔 85% 以上且通過#8 篩在 5% 以下---最少 400g。

(2) 粗骨材

依照其最大尺寸決定其量。

3. 篩之選取：

依下表選取各篩連同底盤及頂蓋，依照孔徑大小相疊，由大至小，最下層為底盤。

4. 篩分析：

(1) 倒入試樣置於篩分析機(參考圖 3-11)上篩動。

- (2) 當一分鐘內通過任一篩之量不超過停留在該篩量的 1% 時(通常約五分鐘以上)，即停止篩動。
- (3) 秤取停流於各篩上之量。

3.3.3 骨材單位重試驗

➤ 參考規範：

CNS 1163，ASTM C-29

➤ 實驗目的：

本實驗之目的在於測定粗、細或混合骨材的單位體積重及骨材間隙之體積，以決定骨材組織與級配性質，經常作為混凝土配比設計中骨材用量之參考。

➤ 實驗步驟：

1. 試樣準備：

試樣須先於 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 下烘乾，並依取樣法取樣後充分混合。

2. 單位重量之測定：

3. 搗實法(Rodding Procedure)

本法適用於骨材最大顆粒為 $4\text{cm}(1\frac{1}{2}'')$ 以下。試樣分三次裝入量筒(參考圖 3-12)，每次 $\frac{1}{3}$ 並以搗棒搗平，再均勻夯實 25 次。最上一層夯實後以搗棒刮平，秤其重 W 。

➤ 公式計算：

1. 骨材單位重

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (\text{Kg/L} = \text{t/m}^3)$$

W =試樣重(Kg)

V =量筒容積(L)

2. 實體積比 = $\frac{\gamma}{\rho_c} \times 100\%$

空隙率 = $(1 - \frac{\gamma}{\rho_c}) \times 100\%$

ρ_c =骨材容積比重(BSG)

3.3.4 試體製作

1. 配比設計

(1) 第一階段：水泥砂漿試體

依照 ASTM C109-80 之規定，以取水泥與砂比例 1：2.75 及適當水量備用。配比請參考表 3-12。

(2) 第二階段：混凝土圓柱試體

取第一階段適當水灰比，依照 ACI 211.3 之「體積法」去設計，配比請參考表表 3-13。

2. 試體拌合

(1) 第一階段：水泥砂漿試體

依照 CNS3655 規範進行拌合。先將砂漿拌合機(參考圖 3-13)潤濕，置入細骨材乾拌以中速拌合 30 秒後，再加入水泥與水均勻拌合，並用刮刀(參考圖 3-14)刮入拌合盆壁沾黏的水泥砂漿，最後以中速拌合 60 秒後完成水泥砂漿，取出進行試體製作。

(2) 第二階段：混凝土圓柱試體

依照 CNS1230 規範進行拌合。先將鼓式拌合機(參考圖 3-)潤濕，再將轉爐石細骨材加進拌合機中乾拌 30 秒後，再加入水泥、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 細微粉末均勻拌合，再加入水與轉爐石均勻拌合，並用刮刀刮入拌合盆壁沾黏的水泥砂漿，最後以中速拌合 60 秒後完成水泥砂漿，取出進行試體製作。

3. 試體製作

(1) 第一階段：水泥砂漿試體

將 5cm×5cm×5cm 的正立方體鐵模(參考圖 3-16)內層擦拭乾淨，並塗以一層礦物薄油脂。拌合後之水泥砂漿試體分兩層填入正立方鐵模，每層於 10 秒內搗實 4 遍，每遍 8 次，共 32 次，填模時

間不能超過 2.5 分鐘，最後用刮刀將多餘之砂漿刮除並抹平表面。

(2) 第二階段：混凝土圓柱試體

將 $\Phi 12 \times 24 \text{cm}$ 圓柱鐵模(參考圖 3-17)內層擦拭乾淨，並塗以一層礦物薄油脂。將拌合完成之水泥砂漿分三層填入圓柱鐵模，每層以搗棒搗實 25 次，再以木槌敲擊模側，最後用刮刀將多餘之砂漿刮除後，並抹平表面。

4. 拆模

試體製作完成後，放置於陰涼乾燥處等待 24 小時後進行拆模，拆模後的方塊(參考圖 3-18)及圓柱(參考圖 3-19)放入養護水槽中進行養護，直至試驗所需齡期(養護用水需為飽和石灰水，水體需保持乾淨勿有雜質，水溫須維持 $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$)。

3.3.5 標準水泥砂漿之流度

➤ 參考規範：

ASTM C230

➤ 實驗目的：

測定水泥砂漿終於標準流度值 100%～115%之狀況下之水量。

➤ 實驗步驟：

1. 將流度台表面及流度模殼(參考圖 3-20)內層擦拭乾淨，並塗以一層薄油脂，將流度模殼置於流度台中央。
2. 將依 ASTM C109-80 拌合後之砂漿，分兩層填入流度模殼並以搗實。
3. 用刮刀將流度模殼多餘之砂漿刮除後，將流度台表面及流度模殼外層之滲出水份擦乾。
4. 將流度模殼垂直向上拉起，開動流度儀開關，於 15 秒內震落 25 次，每次落距為 20 公分，
5. 利用流度測量卡尺以 45° 平分線之間隔，分四次量測流洩後之砂漿直徑。
6. 將四次測量值漿加即為流度值，以百分率表示之。

➤ 公式計算：

$$\text{砂漿流度值}\% = \frac{\text{四次測量平均值} - \text{模殼底面之內直徑}}{\text{模殼底面之內直徑}} \times 100\%$$

3.3.6 水泥砂漿之抗壓試驗

➤ 參考規範：

CNS 1010 ASTM C109

➤ 實驗目的：

測定不同水灰比之水泥砂漿抵抗壓力之性質，亦可以藉此決定第二階段實驗之水灰比。

➤ 實驗步驟：

1. 將 5cm×5cm×5cm 的正立方體鐵模內層擦拭乾淨，並塗以一層礦物薄油脂。
2. 將拌合後之砂漿，分兩層填入正立方鐵模，每層於 10 秒內搗實 4 遍，每遍 8 次，共 32 次，全部填模時間不能超過 2.5 分鐘。
3. 用刮刀將流度模殼多餘之砂漿刮除後，並抹平表面。
4. 24 小時後取出放入飽和石灰水中養護至規劃齡期。
5. 取出試體式樣並拭乾表面，將試體放置於萬能材料試驗機(參考圖 3-21、3-22)上進行試驗，萬能材料試驗機設定為每秒 0.72~2.8 kgf/cm² 之加壓速度，當試體破壞程度達最大荷重後停機。
6. 記錄最大荷重值代入公式計算，每組配比做三次測試取其平均。

➤ 公式計算：

$$\text{抗壓強度 } f_c = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (\text{Kg f/cm}^2)$$

P：抗壓試驗最大荷重(kgf)

A：試體受力面積=25 (cm²)

3.3.7 坍度實驗

➤ 參考規範：

ASTM C143 CNS 1176

➤ 實驗目的：

測定新拌混凝土的稠度，間接決定混凝土的流動性

➤ 實驗步驟：

1. 坍度錐內側及表面及平板表面用濕布擦拭後置於水平之平板上，並以腳踏緊，以免底部發生滲水。
2. 將新拌試料分三層填入坍度錐，每一層約全體積之 $\frac{1}{3}$ ，每一層均搗實 25 次，至填滿為止。試料填充時間需在兩分鐘內完成。
3. 將充滿混凝土的坍度錐上面用刮刀刮平後，將坍度錐垂直向上拉起，拉上 300mm 的時間約 2~3 秒，立即以測量尺量取混凝土坍下之高度，坍度即為坍下後之高度與原有高度之差。

➤ 公式計算：

坍度(Slump)=原來高度－坍下後高度

3.3.8 抗壓試驗

➤ 參考規範：

CNS1232 CNS1129

➤ 實驗目的：

測定不同裹漿配比之骨材用於透水混凝土的抗壓強度，探討不同養護齡期對混凝土強度的發展情形。

➤ 實驗步驟：

1. 將以達規劃齡期試體取出並拭乾，以 CNS1129 將試體表面蓋平或利用打磨機磨平(參考圖 3-23)。
2. 將蓋平或磨平處理後試體放置於抗壓機上進行試驗，抗壓機設定為每秒 1.4~3.4 kgf/cm^2 之加壓速度，當試體破壞程度達最大荷重之 80% 時停機。
3. 記錄最大荷重值代入公式計算，每組配比做三次測試取其平均。

➤ 公式計算：

$$\text{抗壓強度 } f_c = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (Kgf/cm^2)$$

P：抗壓試驗最大荷重(kgf)

A：試體受力面積(cm^2)

D：試體平均直徑(cm)

3.3.9 劈裂試驗

➤ 參考規範：

CNS3801

➤ 實驗目的：

測定不同裹漿配比之骨材用於透水混凝土的抗壓強度，探討不同養護齡期對混凝土強度的發展情形。

➤ 實驗步驟：

1. 準備圓柱試體劈裂試驗用之定位架，於底座加上寬約 25mm、厚度 3.2mm 的合板條作為下承壓條(Plywood)，使定位架圓柱的承載面積加大，涵蓋整個試體的長度。
2. 取出養護至規劃齡期之試體，拭乾試體表面，將試體橫置於下承壓條。
3. 於試體上方加上下承壓條及定外假的輔助承壓板(Supplementary bearing bar)，完成劈裂前準備(參考圖 3-24)。
4. 將完成準備的劈裂架上的試體，放置於萬能材料試驗機中央進行試驗，試驗機以每分鐘 7~14(kgf/cm²)的承載速率進行劈裂試驗。
5. 萬能材料試驗機設定為每秒 1.4~3.4 kgf/cm² 之加壓速度，當試體破壞不再承受壓力，記錄最大加載荷重，。
6. 記錄最大荷重值代入公式計算，每組配比做三次測試取其平均。

➤ 公式計算：

$$\text{劈裂強度 } T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (\text{Kgf/cm}^2)$$

P：抗壓試驗最大荷重(kgf)

L：試體長度(cm)

D：試體平均直徑(cm)

表 3-1 水泥之物理性質 (台灣水泥公司提供)

試驗項目	CNS 61-R2001	試驗值
Air cement mortar	Max:12.0	7.2
Fineness	Min:2800	3310
Soundness	Max:0.80	0.05
Compressive Strength (kgf/cm²) (Mpa)		
3 days	Min:126(12.35)	210(20.60)
7 days	Min:197(19.31)	282(27.66)
28 days	Min:281(19.54)	384(37.67)
Times of setting (Vicat test)		
Initial	Min:00:45	02:30
Final	Max:08:00	03:50

(台灣水泥公司提供)

水泥型號	波特蘭第 I 型水泥	
化學成份	CNS 61	試驗值
二氧化矽(SiO ₂)	--	20.7
氧化鐵(Fe ₂ O ₃)	--	5.4
氧化鋁(Al ₂ O ₃)	--	3.2
氧化鈣(CaO)	--	63.9
氧化鎂(MgO)	Max 6.0	2.0
三氧化硫(SO ₃)	Max 3.5	--
燒失量(L.O.I)	Max 3.0	1.0
不溶殘渣(Ins.Res)	Max 0.75	0.1
矽酸三鈣(C ₃ S)	--	51.0
矽酸二鈣(C ₂ S)	--	21.3
鋁酸三鈣(C ₃ A)	--	8.9

表 3-2

鋁酸鐵四鈣(C₄AF)

--

9.8

水泥

之化學成分

3-3 改質轉爐石之化學組成

化學成分	含量(%)
CaO	42.25
MgO	5.95
SiO ₂	18.21
Al ₂ O ₃	3.14
Fe Total.	27.31
P ₂ O ₅	1.0
MnO	2.79
Ti ₂ O	--
K ₂ O	--
pH	11.5

表 3-4 轉爐石物理特性

骨材種類 \ 項目	(砂+盆)	(砂+盆)	空盆重 W ₄ (g)
	氣乾重 W ₁ (g)	乾重 W ₃ (g)	
六分石	1406.5	1402.5	432
三分石	1503.5	1501.5	505
二分石	1549.5	1534.5	553

表 3-5 天然細骨材篩分析實驗結果

項目 Mesh	篩重 W_1 (g)	搖篩後 (篩+砂)重 W_2 (g)	留篩重 $W_3 = W_2 - W_1$ (g)	遺留百分比 $\frac{W_3}{W_4}$	累積百分比	通過百分比	ASTM C33 要求
#4	449	450.5	1.5	0.37%	0.37%	99.63%	95%~100%
#8	354.5	374.5	20	4.97%	5.34%	94.66%	80%~100%
#16	322	371.5	49.5	12.30%	17.64%	82.36%	50%~85%
#30	315	413.5	98.5	24.47%	42.11%	57.89%	25%~60%
#50	323.5	448	124.5	30.93%	73.04%	26.96%	10%~30%
#100	282.5	361.5	79	19.63%	92.67%	7.33%	2%~10%
#200	269.5	292.5	23	5.71%	98.39%	1.61%	0%~5%
底盤	353.5	360	6.5	1.61%	100.00%	0.00%	
$\Sigma W_3 = W_4 =$			402.5				

$$F.M. = 0.37\% + 5.34\% + 17.64\% + 42.11\% + 73.04\% + 92.67\% = 2.31$$

表 3-6 標準細骨材(符合 ASTM C109 規範)材篩分析實驗結果

項目 Mesh	篩重 W_1 (g)	搖篩後 (篩+砂)重 W_2 (g)	留篩重 $W_3 = W_2 - W_1$ (g)	遺留百分比 $\frac{W_3}{W_4}$	累積百分比	通過百分比	ASTM C33 要求
#4	449	449	0	0.00%	0.00%	100.00%	95%~100%
#8	355	355	0	0.00%	0.00%	100.00%	80%~100%
#16	322	322	0	0.00%	0.00%	100.00%	50%~85%
#30	313.5	315.5	2	0.50%	0.50%	99.50%	25%~60%
#50	322	717.5	395.5	98.26%	98.76%	1.24%	10%~30%
#100	282	286.5	4.5	1.12%	99.88%	0.12%	2%~10%
#200	270.5	270.5	0	0.00%	99.88%	0.12%	0%~5%
底盤	353.5	354	0.5	0.12%	100.00%	0.00%	
$\Sigma W_3 = W_4 =$			402.5				

$$F.M. = 0.00\% + 0.00\% + 0.00\% + 0.50\% + 98.76\% + 99.88\% = 1.99$$

表 3-7 改質轉爐石細骨材篩分析實驗結果

項目 Mesh	篩重 W_1 (g)	搖篩後 (篩+砂)重 W_2 (g)	留篩重 $W_3 = W_2 - W_1$ (g)	遺留百分比 $\frac{W_3}{W_4}$	累積百分比	通過百分比	ASTM C33 要求
#4	449	458	9	2.22%	2.22%	97.78%	95%~100%
#8	355	436.5	81.5	20.10%	22.32%	77.68%	80%~100%
#16	322	432.5	110.5	27.25%	49.57%	50.43%	50%~85%
#30	312.5	384	71.5	17.63%	67.20%	32.80%	25%~60%
#50	322	366.5	44.5	10.97%	78.18%	21.82%	10%~30%
#100	281.5	320	38.5	9.49%	87.67%	12.33%	2%~10%
#200	270.5	300.5	30	7.40%	95.07%	4.93%	0%~5%
底盤	353	373	20	4.93%	100.00%	0.00%	
$\Sigma W_3 = W_4 =$			405.5				

$$F.M. = 2.22\% + 22.32\% + 49.57\% + 67.20\% + 78.18\% + 87.67\% = 3.07$$

表 3-8 細骨材比重測定

項目 骨材種類	取樣重 $W_1(g)$	(水+瓶) 重 $W_2(g)$	(水+瓶+砂) 重 $W_3(g)$	比重 $\frac{W_1}{W_1+W_2-W_3}$
天然細骨材	100	771	833.5	2.667
標準細骨材	100	771.5	834.5	2.703
矽質細骨材	100	771.5	832.5	2.564
改質轉爐石 細骨材	100	772	837.5	2.899

表 3-9 細骨材含水量測定

項目 骨材種類	(砂+盆) 氣乾重 $W_1(g)$	(砂+盆) 面乾飽和 重 $W_2(g)$	(砂+盆) 乾重 $W_3(g)$	空盆重 $W_4(g)$	氣乾含水量 $\frac{W_1 - W_3}{W_1 - W_4}$ 100(%)	面乾飽和含水 量 $\frac{W_2 - W_3}{W_1 - W_4}$
天然細骨 材	1406.5	1425	1402.5	432	0.412	2.318
標準細骨 材	1503.5	1507	1501.5	505	0.201	0.552
矽質細骨 材	1515	1522	1516.5	513.5	0.105	0.699
改質轉爐 石細骨材	1549.5	1574.5	1534.5	553	1.528	4.075

表 3-10 轉爐石粗骨材物理性質

	單位重(kg/m ³)	比重
六分石	1954	3.39
三分石	1986	3.40
二分石	1998	3.36

平均粒徑(nm)	純度(%)	比表面(m ² /g)	體積密度(g/cm ³)	晶型	顏色
200	99.999	15	1.24	α	白色

表 3-11 α-氧化鋁定性分析

表 3-12 砂漿方塊試體配比設計(第一階段)

	W/C	Cement (g)	Water (g)	Fine Aggregate (g)	Compensatory Water (g)
TNA	0.35	500.0	175.0	1375.0	26.0
TNB	0.4	500.0	200.0	1375.0	26.0
TNC	0.485	500.0	242.5	1375.0	26.0
TND	0.5	500.0	250.0	1375.0	26.0
TSA	0.35	500.0	175.0	1375.0	5.0
TSB	0.4	500.0	200.0	1375.0	5.0
TSC	0.485	500.0	242.5	1375.0	5.0
TSD	0.5	500.0	250.0	1375.0	5.0
TBA	0.35	600.0	210.0	1650.0	39.0
TBB	0.4	600.0	240.0	1650.0	39.0
TBC	0.485	600.0	291.0	1650.0	39.0
TBD	0.5	600.0	300.0	1650.0	39.0

Comment:

T N A

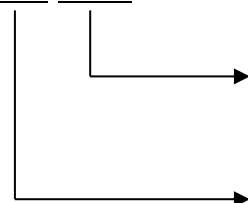
- Different Water - Cement Ratio (A : 0.35 , B : 0.4 , C : 0.485 , D : 0.5)
- Different Fine Aggregate
N : Natural Fine Aggregate ,
B : Improved BOF Fine Aggregate,
S : ASTM Grand Fine Aggregate
- Text Serise

表 3-13 圓柱試體配比設計(第二階段)

	W/C	Cement (Kg/m ³)	Water (Kg/m ³)	Coarse Aggregate (Kg/m ³)			Fine Aggregate (Kg/m ³)	α - Al ₂ O ₃ Nano-Powder (Kg/m ³)
				$\frac{3}{4}$ " (Kg/m ³)	$\frac{3}{8}$ " (Kg/m ³)	$\frac{1}{4}$ " (Kg/m ³)		
B40A00	0.4	482.00	192.80	600.86	600.86	150.21	773.06	0
B40A10	0.4	482.00	192.80	600.86	600.86	150.21	765.33	7.73
B40A15	0.4	482.00	192.80	600.86	600.86	150.21	761.46	11.60
B40A20	0.4	482.00	192.80	600.86	600.86	150.21	757.60	15.46
N40A00	0.4	482.00	192.80		1063.49		673.77	0
N40A10	0.4	482.00	192.80		1063.49		667.03	6.74
N40A15	0.4	482.00	192.80		1063.49		663.66	10.11
N40A20	0.4	482.00	192.80		1063.49		660.29	13.48

Comment:

B40 A20



 Substituted α - Al₂O₃ Nano-Powder for Fine Aggregates (in Weight Percent)
 A20= Substituted 2.0wt% α - Al₂O₃ Nano-Powder for Fine Aggregates
 A15= Substituted 1.5wt% α - Al₂O₃ Nano-Powder for Fine Aggregates
 Different Aggregate in Water-Cement Ratio, W/C=0.4
 N : Natural Aggregate ,
 B : Improved BOF Aggregate

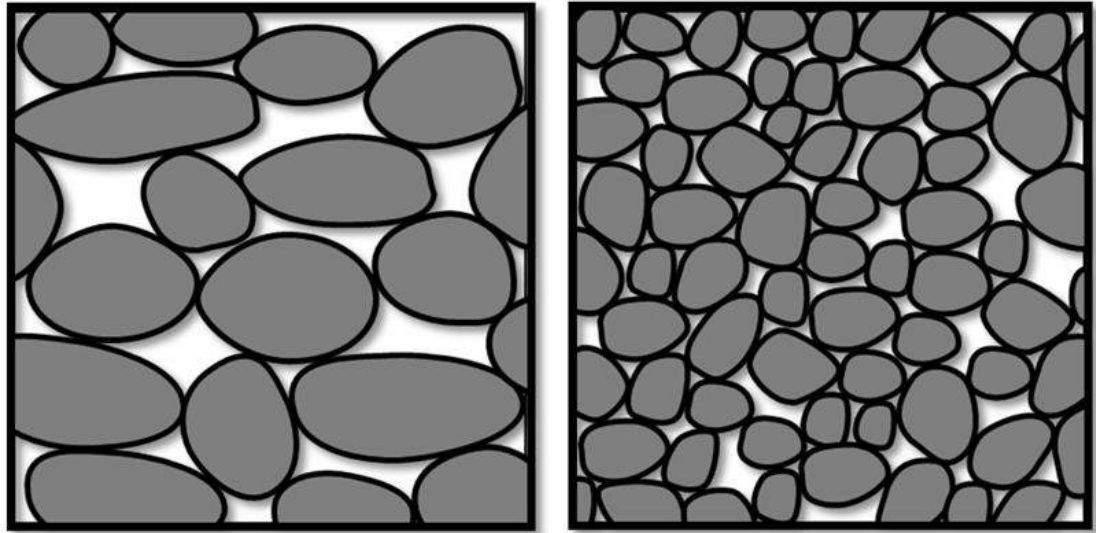


圖 3-11 不同粒徑骨材之孔隙示意圖

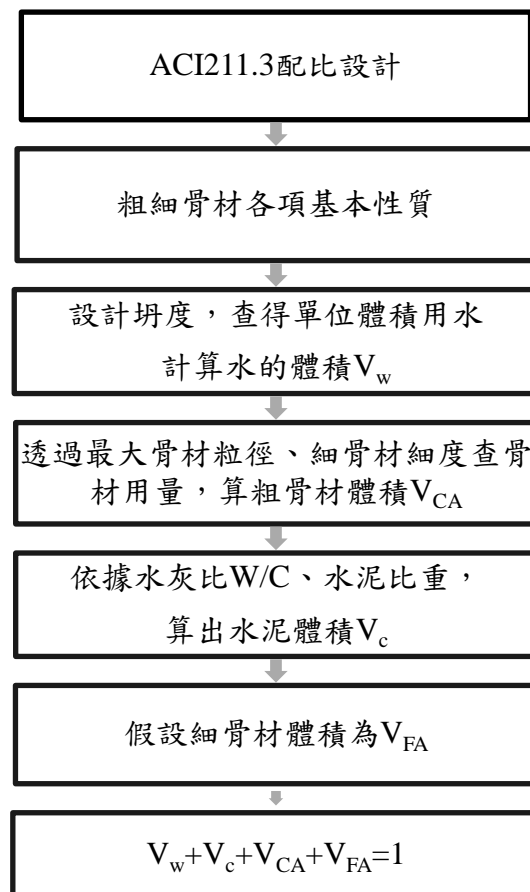


圖 3-12 體積法之配比設計步驟流程圖



(a)

(b)

圖 3-13 天然骨材 (a)細骨材(砂) (b)粗骨材



圖 3-14 標準細骨材(符合 ASTM C778 規定)



(a)六分石

(b)三分石

(c)二分石

圖 3-15 改質轉爐石粗骨材



圖 3-16 改質轉爐石粗骨材



圖 3-17 Nano- α Al₂O₃ Powder



圖 3-18 烘箱



圖 3-19 細骨材面乾飽和實驗圓錐

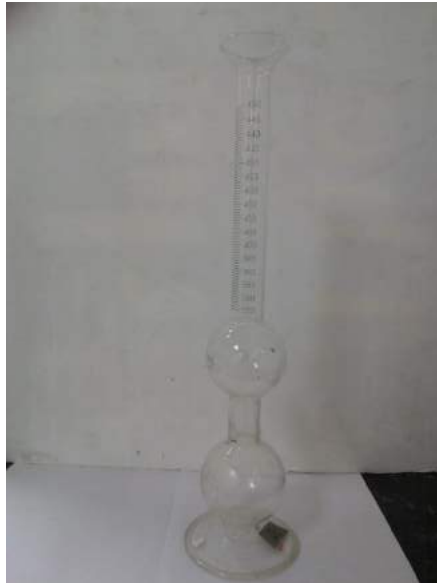


圖 3-20 勒沙特列比重瓶



圖 3-21 細骨材粒徑分析-搖篩機



圖 3-22 量筒



圖 3-23 砂漿拌合機



圖 3-24 刮刀



圖 3-25 鼓式拌和機



圖 3-26 5cmx5cmx5cm 的正立方體鐵模



圖 3-27 $\Phi 12 \times 24\text{cm}$ 圓柱鐵模



圖 3-28 砂漿試體



圖 3-29 圓柱試體



圖 3-30 砂漿流度試驗儀



圖 3-31 萬能材料試驗試驗機



圖 3-32 抗壓試驗機控制板



圖 3-33 混凝土試體表面打磨機



圖 3-34 混凝土試體劈裂架

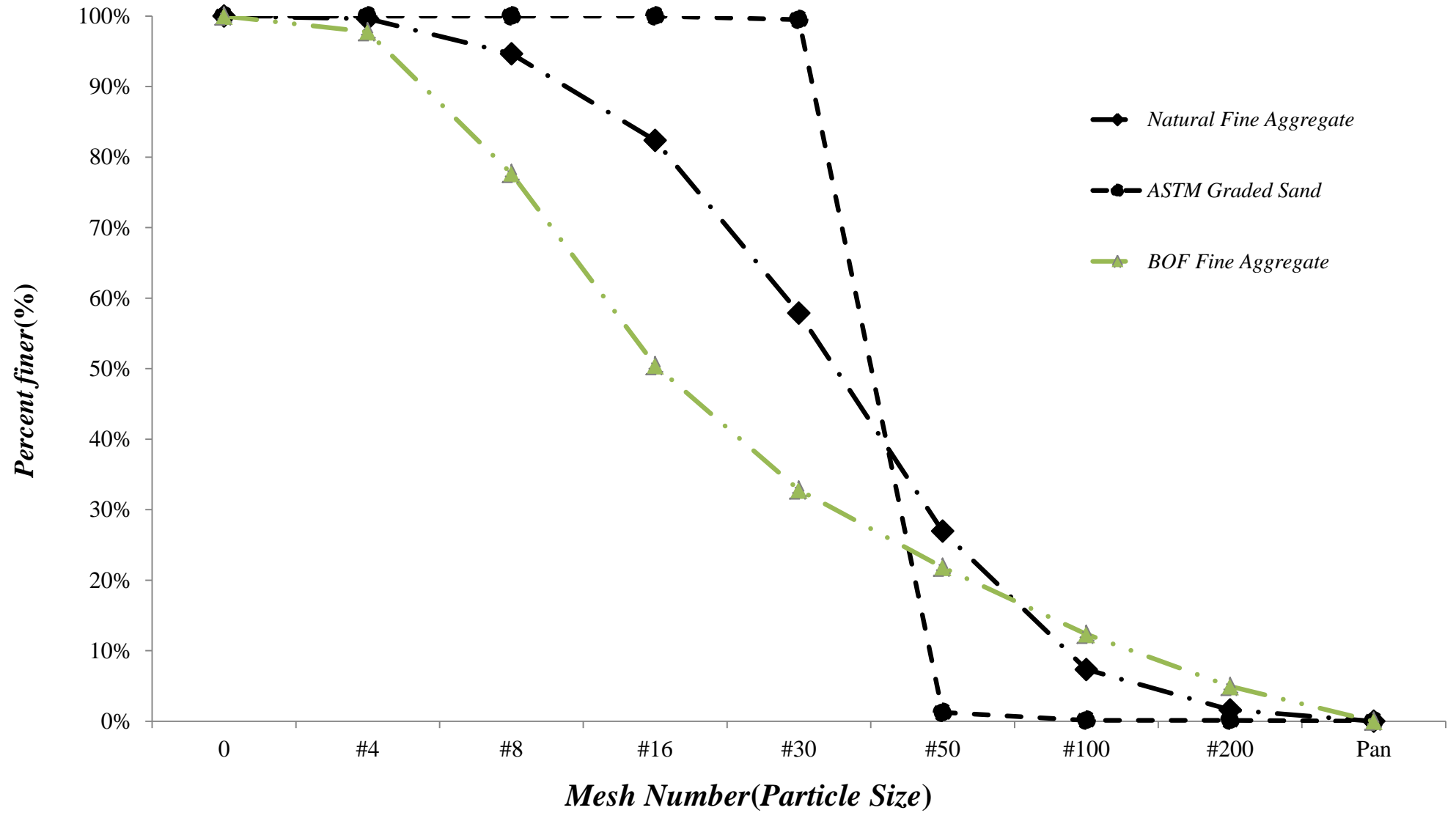


圖 3-35 細骨材篩分析曲線

第四章 實驗結果

4.1 第一階段實驗結果

4.1.1 水泥砂漿流度試驗結果

本研究中各設計配比砂漿流度實驗數據整理如表 4-1 所示。從實驗結果發現，當水灰比越低，新拌砂漿的流度越差，水灰比在 0.35 和 0.4 的狀態下，除了改質轉爐石細骨材的流度比較大，工作性比較好之外，另外兩種細骨材的工作性不佳，造成試體不易搗實。

4.1.2 水泥砂漿抗壓試驗結果

本研究中各設計配比抗壓強度實驗數據整理如表 4-2 所示。根據表中結果，固定組別不同水灰比，繪製圖 4-1~圖 4-3；固定水灰比不同種細骨材，繪製圖 4-4~圖 4-7。從圖 4-1~圖 4-3 來看，天然骨材在低水灰比(組別 TNA、TNB)的強度比高水灰比(組別 TNC、TND)來得低，推測其影響是：

- (1) 來自於流度太低，工作度不佳以致於搗實狀況不理想
- (2) 水量不足以至於水泥水化未完全。

而 TNB 曲線表現在 7 天強度有降低，推測和漿體工作性及分層搗實有關係，因工作性差造成搗實的層間交結狀況不良，以至於有下降的狀況；而在標準細骨材(組別 TSA~TSD)可以觀察到，不管是何種水灰比，其強度增加趨勢很接近，且在 28 天後的強度近乎維持穩定，可見對標準細骨材而言，水灰比在 0.35~0.5 區間，水灰比的高低對於強度影響不大，推測其可能是因為標準細骨材的細度較小，而且粒徑分佈較集中，細骨材在砂漿中的分佈較為均勻，所以在填充時也能讓試體中漿體和細骨材分布很均勻；在改質轉爐石細骨材(組別 TBA~TBD)的表現上，可以發現水灰比的高低有影響試體強度，且在整體的工作性，都比其餘兩種細骨材的工作性佳，推測雖在吸水率表現上改質轉爐石細骨材比其餘兩者高，但因改質轉爐石細骨材結晶緻密，但內部也有不少孔隙，雖然在短時間內吸水速度較慢，以致於其工作性較佳，也讓試體間的空隙會較少，試

體填充整體較佳。從圖 4-4~圖 4-7 表現上，明顯可以發現改質轉爐石細骨材的試體抗壓強度比其他兩者強，推測是因為改質轉爐石細骨材的本體在出產過程中含有金屬成份，抗壓強度本來就較高，再加上工作性佳讓搗實狀況很好，所以讓整個試體的抗壓強度可以更提升。

4.1.3 第一階段試驗結果

綜合水泥砂漿及抗壓強度之結果，在低水灰比的狀況由於推測因為水量不足，以至於水泥未能完全水化提供強度，而在水灰比 0.4 的情況下，在強度較高及工作性較佳。考慮上述兩大因素，在第二階段的配比設計，係依照本階段實驗結果進行設計。

4.2 第二階段實驗結果

4.2.1 坍度試驗結果

本研究中各設計混凝土配比之新拌混凝土的坍度，實驗數據整理如圖 4-8 所示。從實驗結果在改質轉爐石的各組別坍度落差不大，唯獨在 B40A15(奈米氧化鋁 1.5%取代細骨材)的坍度較大。而在天然骨材的各組別中，在添加奈米氧化鋁的組別坍度明顯上升，尤其以 N40A15(奈米氧化鋁 1.5%取代細骨材)坍度較大，具有良好的工作性。推究整體結果，再添加奈米氧化鋁的新拌式體中，因為本次選用的奈米氧化鋁粉末的構型相當安定，在新拌階段不會吸水。而就改質轉爐石的各組別與天然骨材的各組別，在坍度的表現上皆是在奈米氧化鋁 1.5%取代細骨材(即 B40A15 和 N40A15 兩組配比)表現較佳，具有較好的工作性質。

4.2.1 抗壓試驗結果

本研究中各設計配比的混凝土抗壓結果，實驗數據整理如表 4-3 所示，並依照其結果分成天然骨材組別與改質轉爐石組別，並繪出其強度成長趨勢，參考圖 4-9 及圖 4-10。

參考圖 4-9，在天然骨材的組別中，發現在有添加奈米氧化鋁粉末的配比 N40A10 及 N40A15 強度的表現上都較未添加的 N40A00 配比來的高，但是在

奈米氧化鋁粉末添加量較高的組別 N40A20 強度卻有明顯下降。另外可以發現，自從 7 天養護齡期之後，強度增強的幅度已經明顯趨緩，整體來看可以發現在第 28 天的強度皆比 3 天養護齡期高，然而在 N40A20 在第 7 天的養護齡期抗壓強度明顯上升許多，但在 28 天養護齡期強度有明顯折減，合理推測在添加奈米氧化鋁粉末之後的試體強度應都有增強，然而在強度較高的混凝土試體，在統計的角度上其標準差會比較大，在取樣的偏差上會比較明顯，這可能也會是導致本次實驗結果在 28 天養護齡期的抗壓強度較 7 天養護齡期的折減的原因，但仍然可以看出其在 28 天的養護齡期強度仍然高於 3 天的養護齡期。

參考圖 4-10，在改質轉爐石的組別中，可以看到整個強度發展趨勢是隨著齡期增加而上升。另外，整個趨勢看來，可見有添加奈米氧化鋁粉末的配比強度都比未添加的 B40A00 配比较高，每個配比的抗壓強度趨勢發展線都在 B40A00 配比之上，可見適量的添加奈米氧化鋁粉末在改質轉爐石的配比中式可以增強試體強度。細究添加量而言，可以發現奈米氧化鋁粉末取代轉爐石細骨材比例達 2.0% 之際，此時的抗壓強度是比較低，但仍然比未添加奈米氧化鋁粉末的配比较高。又可以從圖 4 的趨勢看，會發現 B40A15 在強度的趨勢成長是比較可觀，而 28 天齡期強度較 3 天齡期的強度表現增加許多，然而 B40A10 在前期 3 天及 7 天的養護齡期表現上與 B40A15 相當，但在 28 天齡期卻出現折減，推測這樣的強度表現除了取樣上的問題外，不排除大於從某比例的奈米氧化鋁粉末取代細骨材後，會使強度不能有效提升。

綜合天然骨材組別和改質轉爐石的組別，從表 4-的結果來看，會發現改質轉爐石組別強度發展到 28 天養護齡期都高於天然骨材組別，這除改質轉爐石中有一定比例的金屬鐵，也因為改質轉爐石已經解決轉爐石化學反應後膨脹的問題，故改質轉爐石配比試體才沒有發生有自生裂縫等狀況。在兩種骨材的配比設計中，可以發現在 A20 為奈米氧化鋁粉末取代轉爐石細骨材比例達 2.0% 的配比上，試體的強度都有出現明顯折減，合理推論在過量的取代細骨材下，不能達到強度增加，但在 A10 和 A15 兩種奈米氧化鋁粉末的取代比例不同，都會讓混凝土的強度比未添加前的強度提升，又以 A10 在天然細骨材的強度表現較

佳，A15 在改質轉爐石細骨材的強度表現最佳。

參考混凝土結構設計規範，1.7 中提到結構混凝土不能小於 170Kgf/cm^2 ，相當於 17.161MPa ，預力混凝土不能小於 210Kgf/cm^2 ，相當於 20.593MPa ，在參考 ACI 363-83，對於高強度混凝土 7 天強度必須大於 294kgf/cm^2 ，相當於 28.830MPa ，在本次的配比設計上轉爐石配比強度明顯高出許多，未來可以朝向調高水灰比，可以讓水泥用水量充足，水泥可以完全水化，讓水泥的膠結狀況更加，而在天然骨材的組別在未添加奈米氧化鋁粉末前強度未達此標準，但在 N40A10 及 N40A15 兩組配比上有達到要求，未來可以考慮以少量的添加奈米氧化鋁粉末，可以使試體抗壓強度上升。

4.2.1 劈裂試驗結果

本研究中各設計配比的混凝土劈裂試驗結果，實驗數據整理如表 4-4 所示，並依照其結果分成改質轉爐石組別與天然骨材組別，並繪出其強度成長趨勢，參考圖 4-11 及圖 4-12。另根據 ACI318-99 規範中：

$$f_{spt} = 0.56\sqrt{f_c} \quad \text{式 4-1}$$

式 4-1 中的劈裂強度(f_{spt})與抗壓強度(f_c)單位皆為 MPa。

利用式 4-1，找出劈裂強度(f_{spt})與抗壓強度(f_c)的理想關係曲線(如圖中虛線 ACI318-99 所示)，並畫在圖 4-13 及圖 4-14，可以看出本研究之劈裂強度試驗結果，在相同抗壓強度下，大多的試體劈裂強度試驗值較曲線低，意即在相同的抗壓強度下，劈裂強度的實驗值比理論值低，但也相當接近，表示本研究之試體抗張強度為合理範圍。

表 4-1 砂漿流度試驗結果

試體	W/C	參數 1	參數 2	參數 3	參數 4	流度(%)
TNA	0.35	-	-	-	-	太乾
TNB	0.4	6.0	6.4	5.8	5.5	23.7
TNC	0.485	22.8	23.8	24.0	23.5	94.1
TND	0.5	23.2	21.8	22.0	23.8	90.8
TSA	0.35	6.0	5.8	6.2	6.2	24.2
TSB	0.4	15.0	15.3	14.0	14.0	58.3
TSC	0.485	27.2	27.8	28.6	29.1	112.7
TSD	0.5	32.5	31.5	32.0	33.0	129.0
TBA	0.35	17.6	18.3	17.5	17.3	70.7
TBB	0.4	25.8	26.7	26.1	25	103.6
TBC	0.485	-	-	-	-	>115
TBD	0.5	-	-	-	-	>115

試體編號	3 days	7 days	28 days	56 days
	平均抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)
TNA	11.219	12.951	15.612	19.074
TNB	24.994	17.874	29.080	30.293
TNC	25.955	30.544	33.748	38.717
TND	25.432	27.164	29.047	31.852
TSA	24.183	29.002	34.140	35.265
TSB	25.844	30.067	34.879	34.585
TSC	25.255	28.675	33.643	34.251

表 4-2 砂漿抗壓試驗結果

TSD	26.498	28.531	34.984	36.108
TBA	57.290	65.365	74.040	76.204
TBB	53.825	61.873	72.929	69.617
TBC	43.215	50.171	58.938	65.129
TBD	38.056	42.489	49.661	54.041

表 4-3 混凝土抗壓試驗結果

試體編號	3days		7 days		28 days	
	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強 度(MPa)	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強 度(MPa)	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強 度(MPa)
N40A00-1	27.863		25.794		25.049	
N40A00-2	25.617	26.736	30.414	26.908	24.814	24.531
N40A00-3	26.727		24.515		23.730	
N40A10-1	33.702		38.291		28.184	
N40A10-2	28.787	29.288	30.058	31.677	26.484	30.986
N40A10-3	25.374		26.684		38.291	
N40A15-1	26.441		33.303		385.126	
N40A15-2	22.806	23.331	27.152	29.389	266.955	30.021
N40A15-3	20.746		27.712		266.366	
N40A20-1	27.048		30.830		22.494	
N40A20-2	26.788	28.009	24.441	27.554	23.366	25.431
N40A20-3	30.192		27.391		30.434	
B40A00-1	29.880		30.457		35.337	
B40A00-2	31.372	29.253	27.204	32.351	33.775	33.579
B40A00-3	26.506		39.392		31.625	
B40A10-1	26.541		470.851		34.148	
B40A10-2	30.466	28.914	509.908	41.953	36.343	35.403
B40A10-3	29.737		384.801		35.719	
B40A15-1	33.745		434.315		48.344	
B40A15-2	28.219	33.459	417.994	41.651	31.101	39.006
B40A15-3	38.412		415.182		34.573	
B40A20-1	41.735		38.750		40.945	
B40A20-2	37.393	39.565	33.073	34.884	34.352	37.637
B40A20-3	39.570		32.830		37.614	

表 4-4 混凝土劈裂試驗結果

試體編號	3days		7 days		28 days	
	劈裂強度 (MPa)	平均劈裂強 度(MPa)	劈裂強度 (MPa)	平均劈裂強 度(MPa)	劈裂強度 (MPa)	平均劈裂強 度(MPa)
N40A00-1	2.785		2.034		3.116	
N40A00-2	2.696	2.554	2.710	2.685	2.499	2.765
N40A00-3	2.180		3.312		2.681	
N40A10-1	2.857		2.754		3.080	
N40A10-2	2.812	2.588	3.702	3.135	2.383	2.678
N40A10-3	2.095		2.948		2.572	
N40A15-1	2.904		3.345		2.199	
N40A15-2	2.629	2.846	2.712	2.846	3.562	2.794
N40A15-3	3.005		2.483		2.621	
N40A20-1	2.908		3.403		2.989	
N40A20-2	2.652	2.504	2.401	2.702	2.621	2.659
N40A20-3	1.953		2.303		2.368	
B40A00-1	2.716		2.714		3.200	
B40A00-2	3.177	2.687	3.236	2.831	3.177	3.065
B40A00-3	2.168		2.544		2.819	
B40A10-1	2.999		3.772		4.216	
B40A10-2	2.885	2.756	2.766	3.360	4.621	4.363
B40A10-3	2.383		3.543		4.251	
B40A15-1	3.874		3.707		3.789	
B40A15-2	2.710	3.073	2.825	3.376	3.638	3.649
B40A15-3	2.635		3.595		3.520	
B40A20-1	3.270		2.521		3.709	
B40A20-2	3.575	3.309	4.170	3.673	4.684	4.119
B40A20-3	3.082		4.329		3.965	

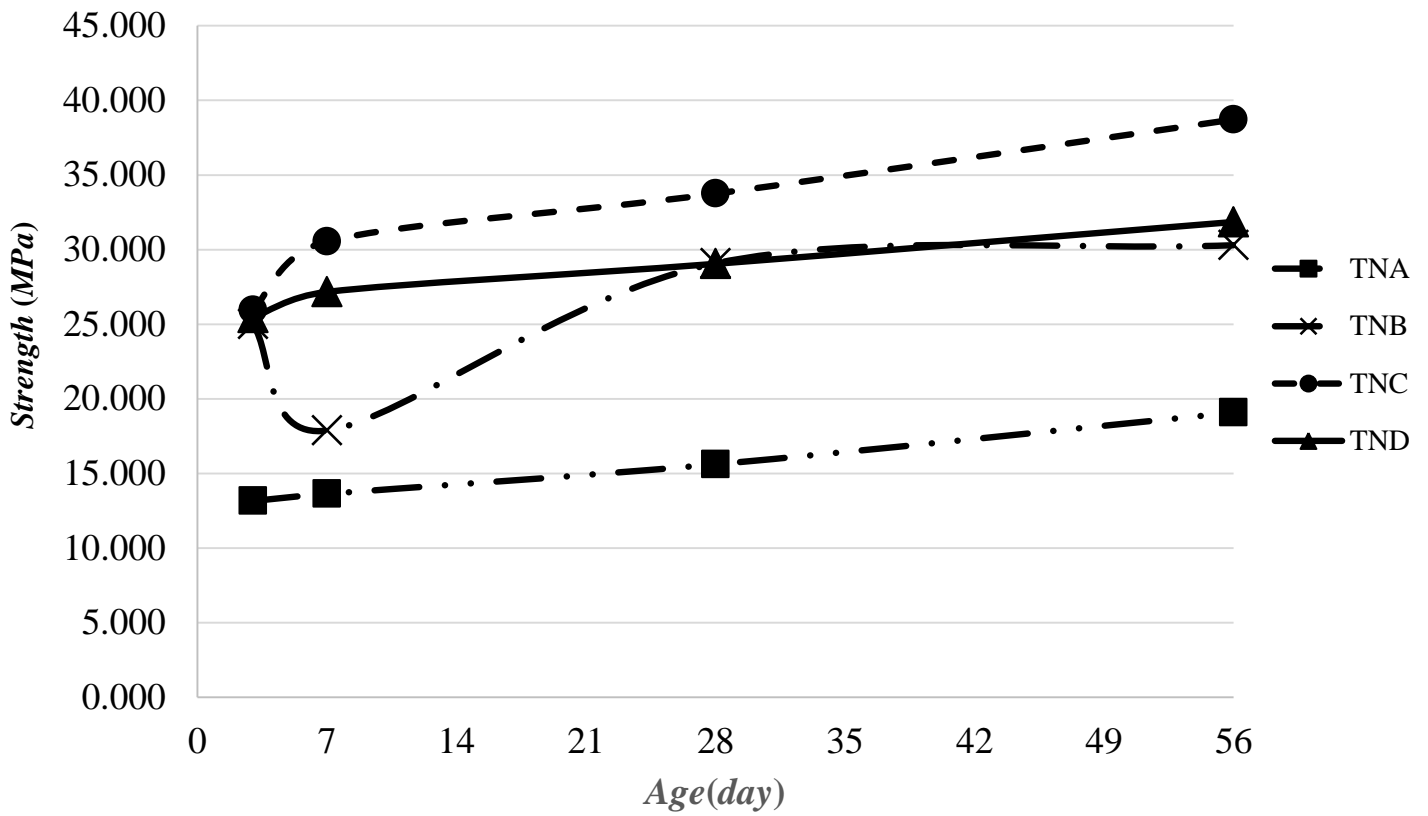


圖 4-1 天然細骨材砂漿抗壓試驗結果

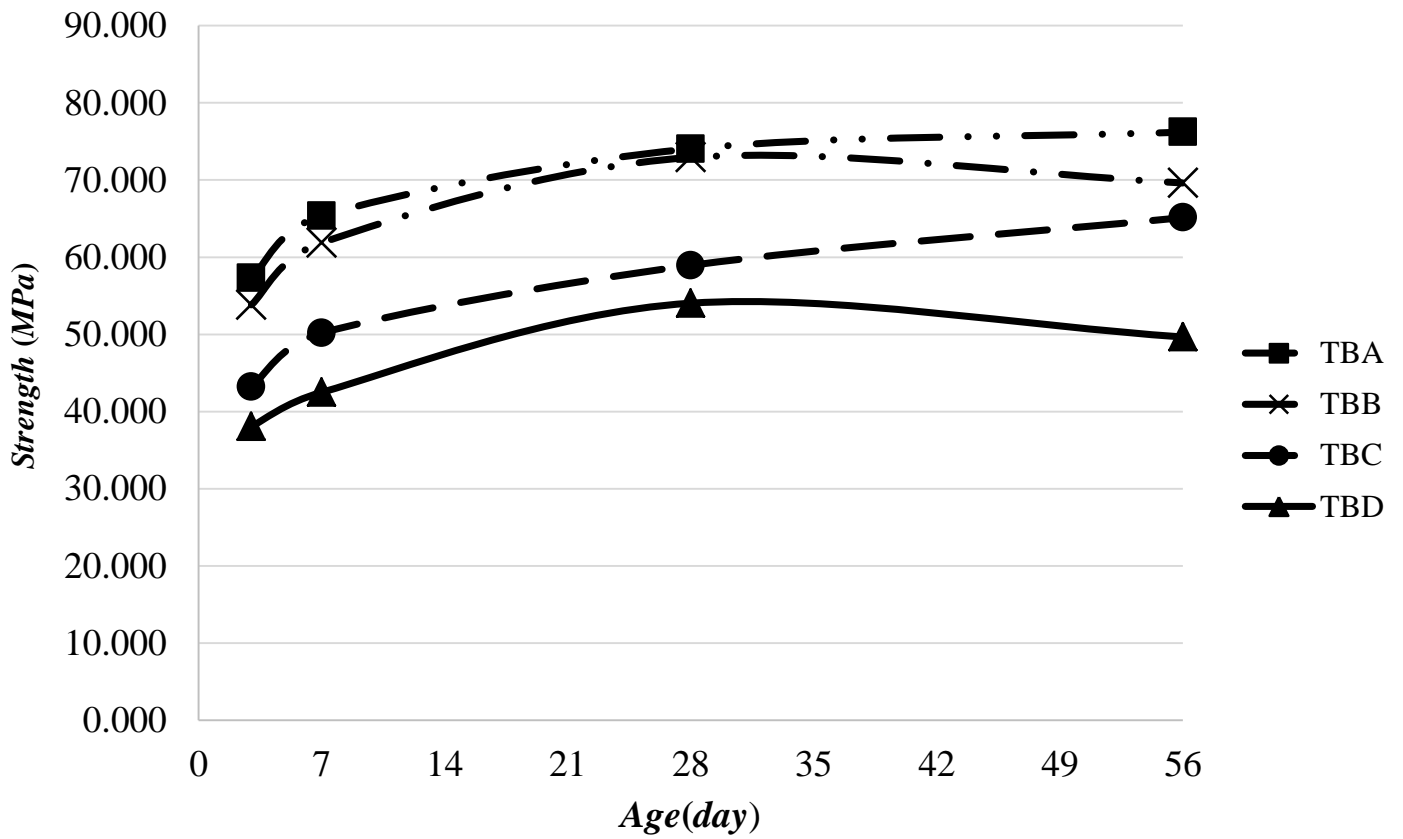


圖 4-2 改質轉爐石細骨材砂漿抗壓試驗結果

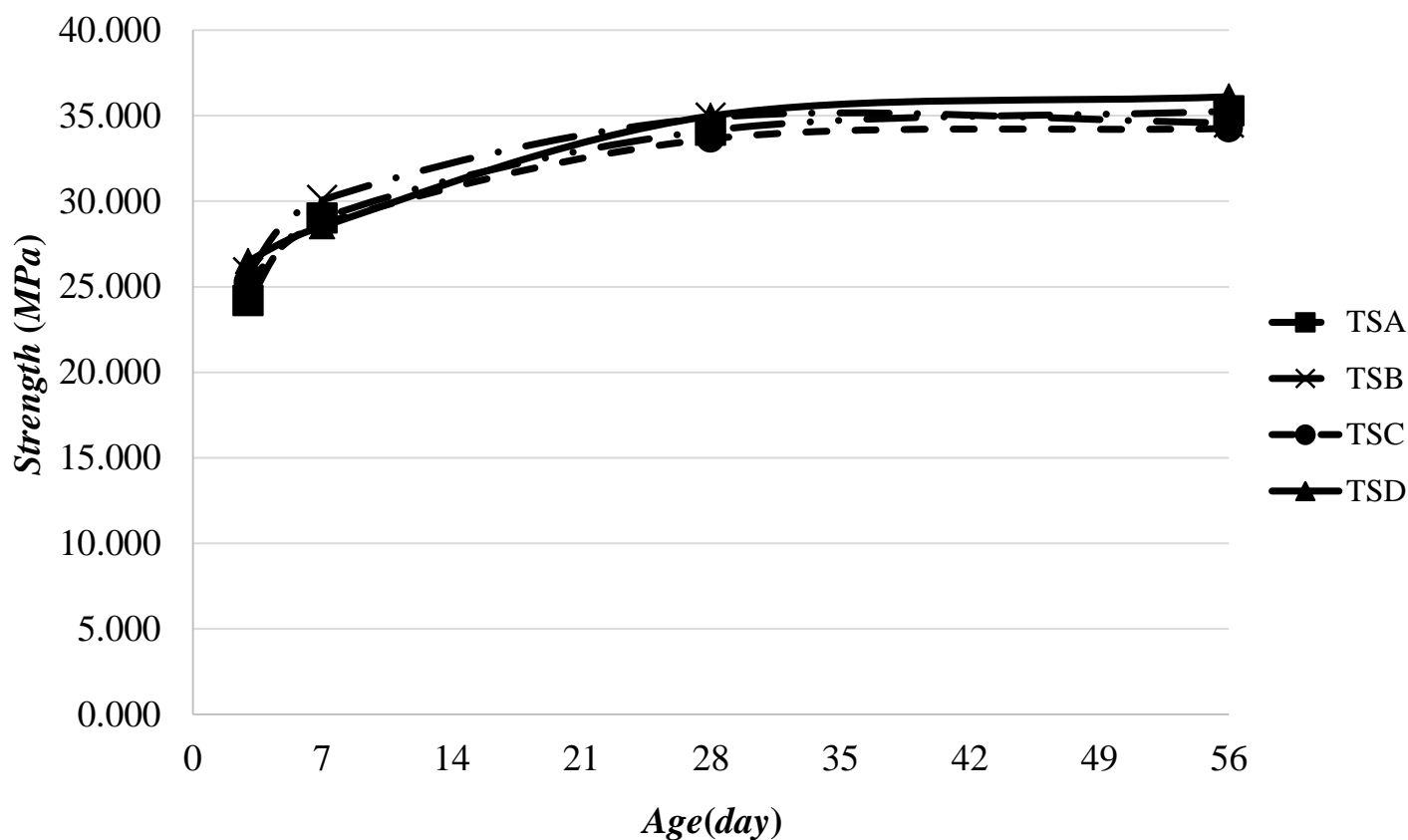


圖 4-3 標準細骨材砂漿抗壓試驗結果

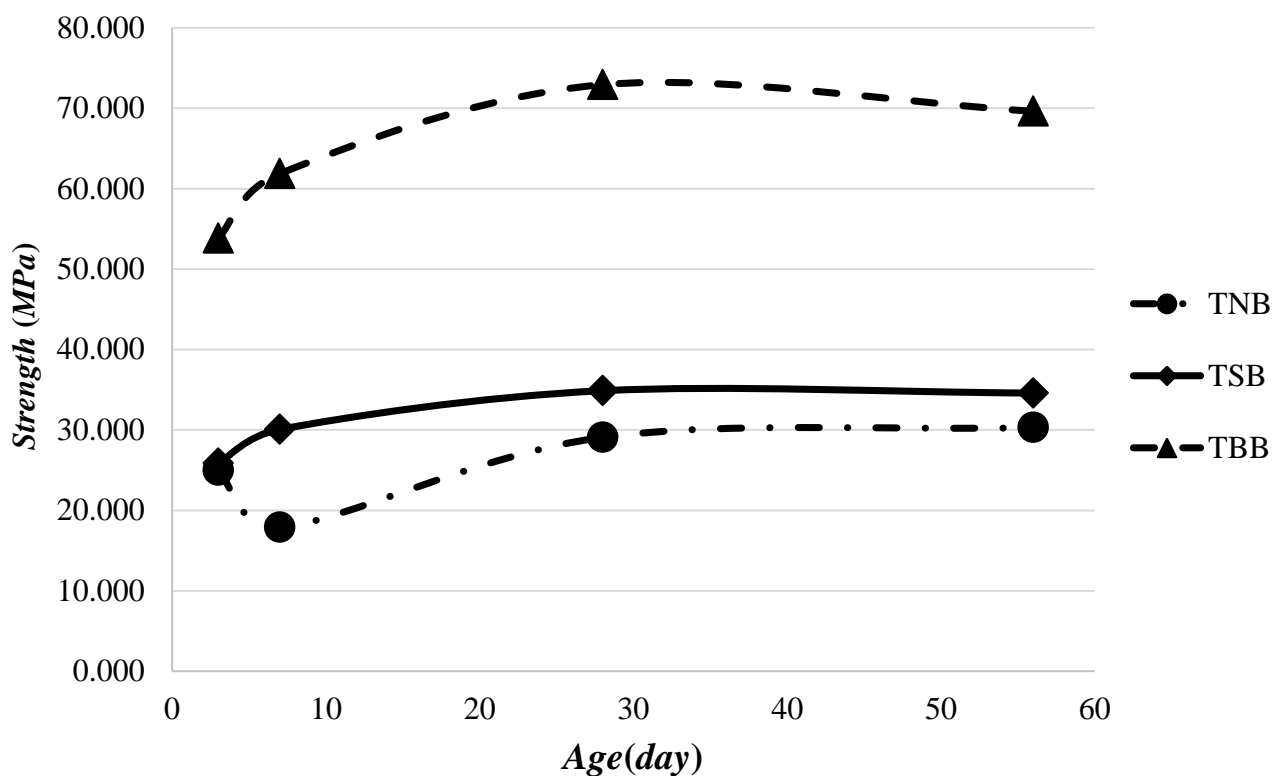


圖 4-4 在水灰比=0.35 各種細骨材砂漿抗壓試驗結果

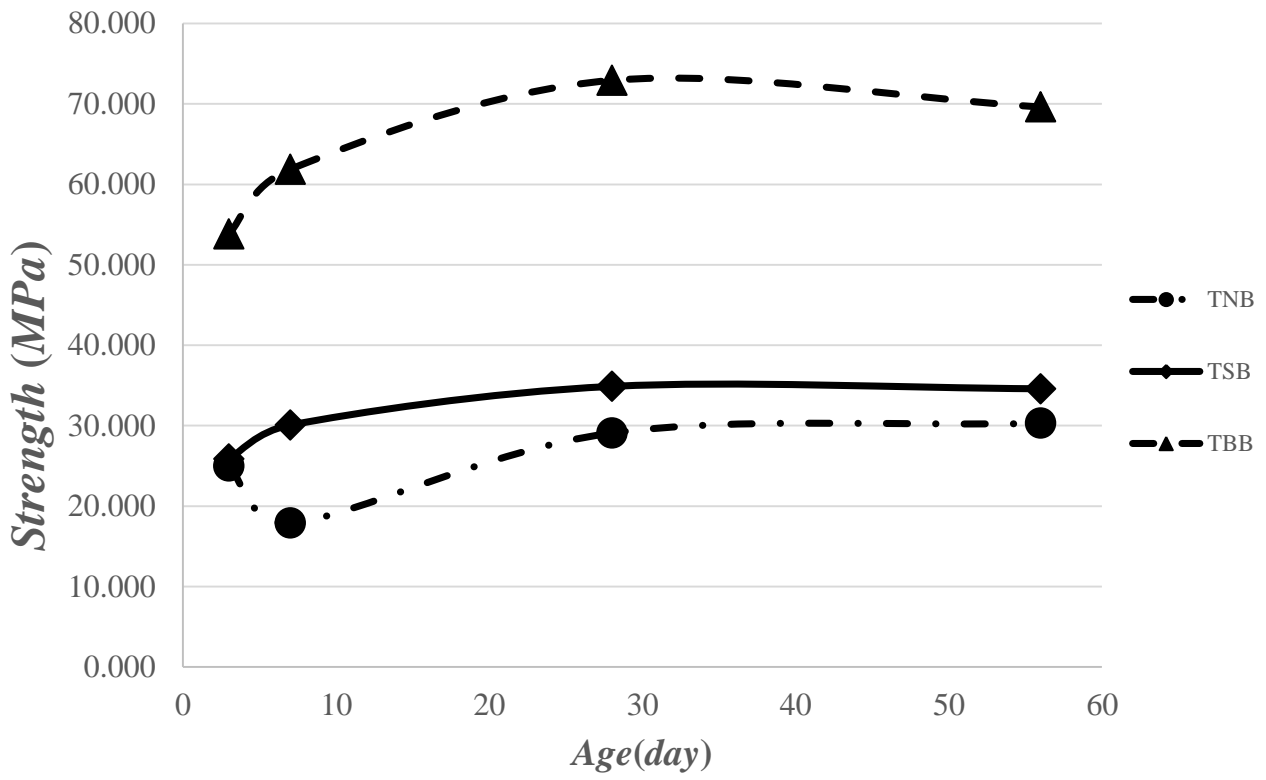


圖 4-5 在水灰比=0.4 各種細骨材砂漿抗壓試驗結果

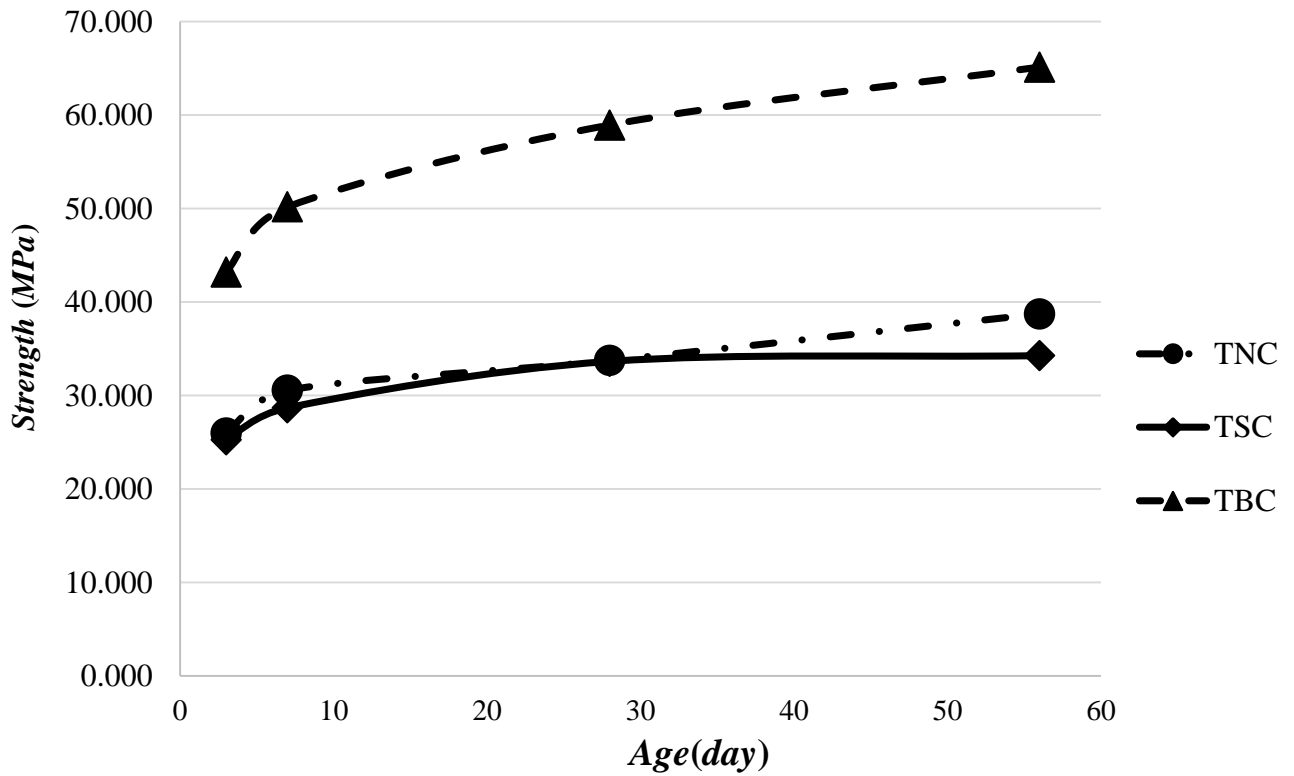


圖 4-6 在水灰比=0.485 各種細骨材砂漿抗壓試驗結果

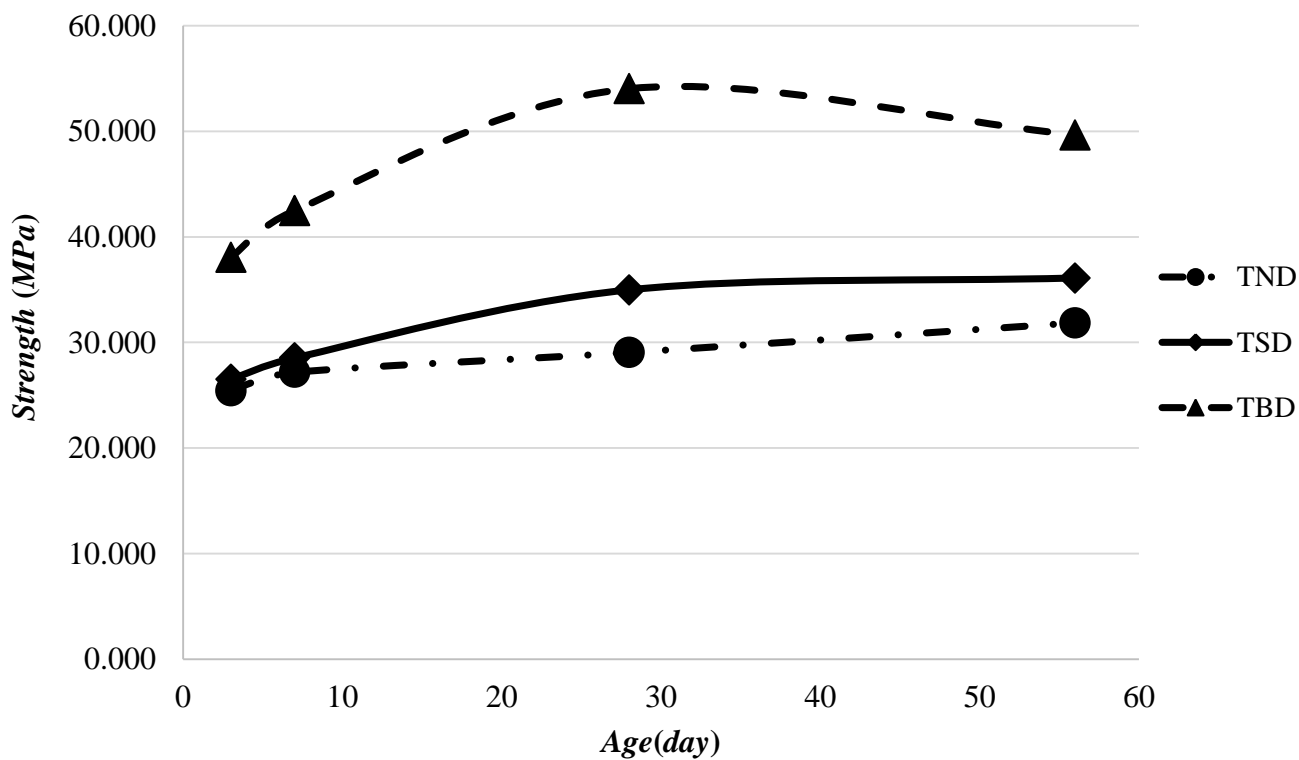


圖 4-7 在水灰比=0.5 各種細骨材砂漿抗壓試驗結果

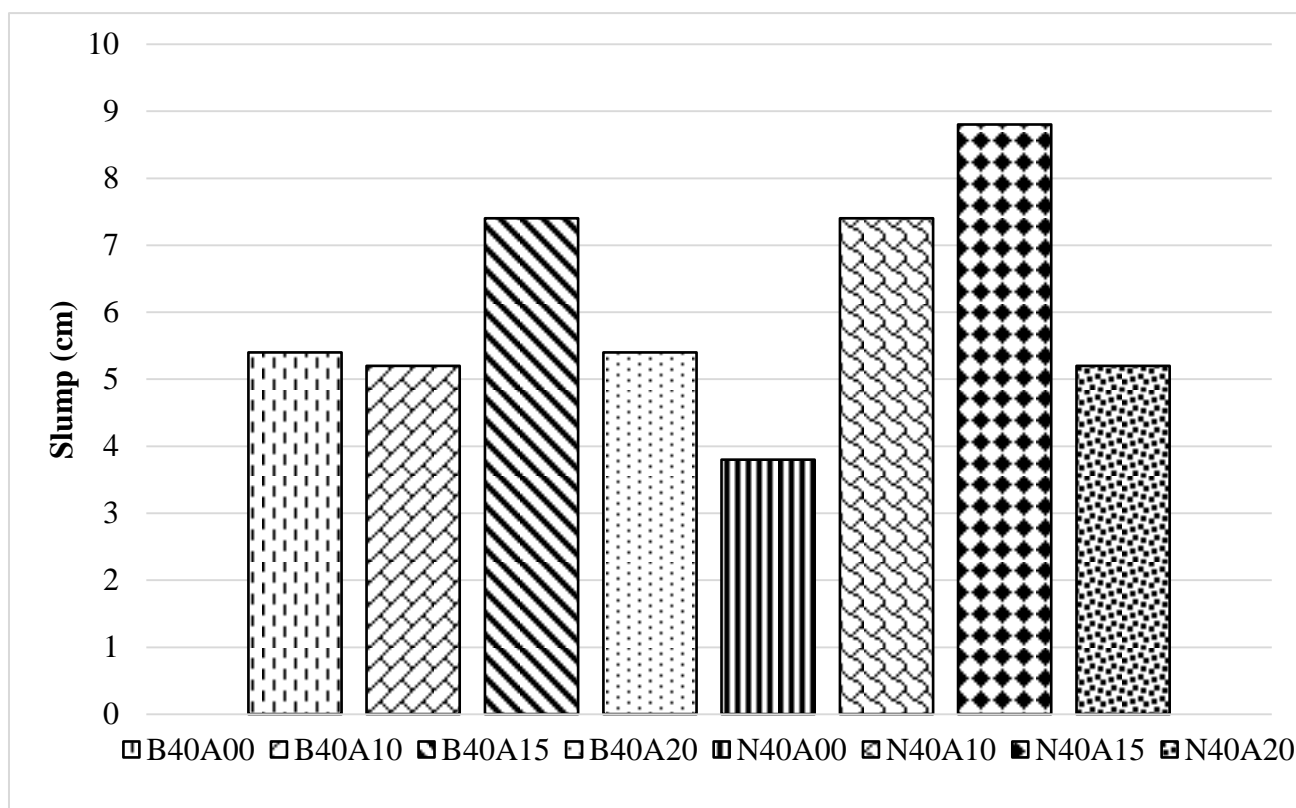


圖 4-8 新拌混凝土坍度

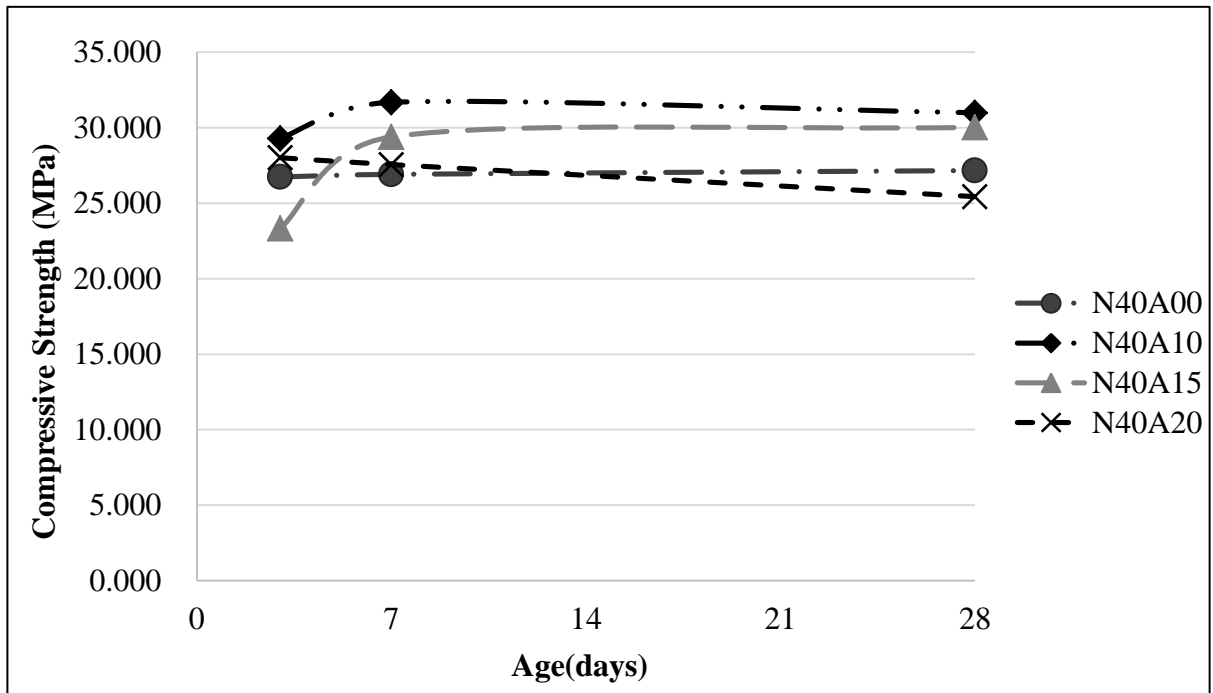


圖 4-9 天然骨材組抗壓強度發展趨勢圖

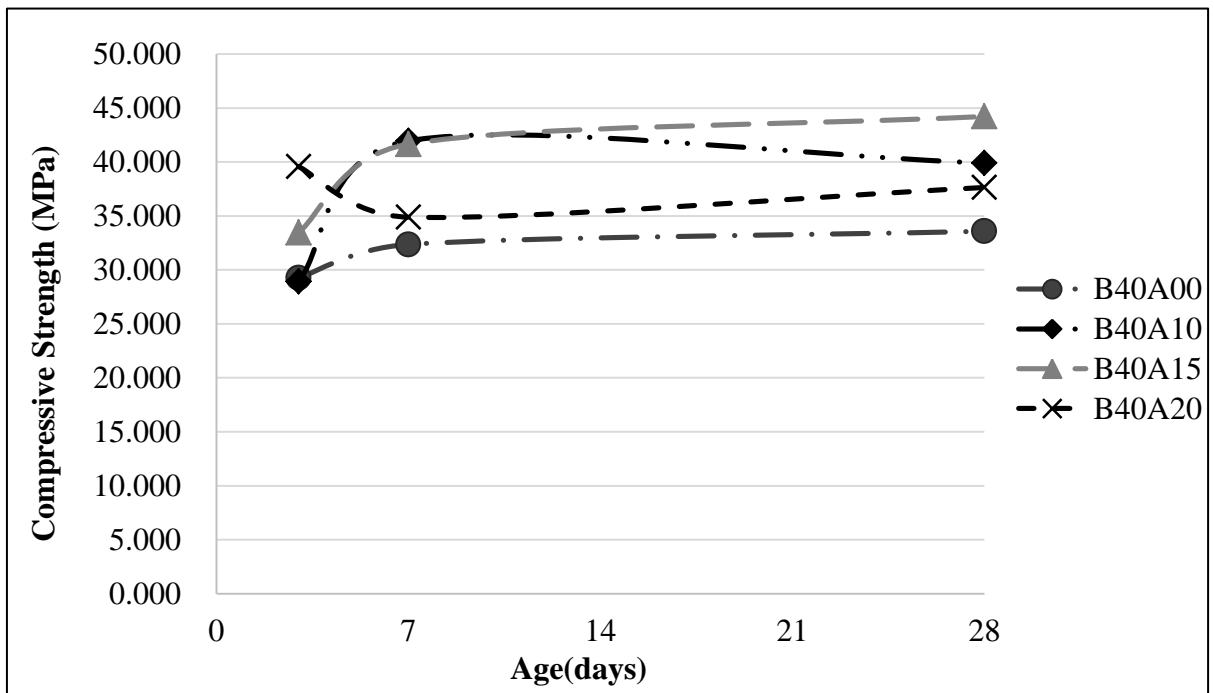


圖 4-10 轉爐石組抗壓強度發展趨勢圖

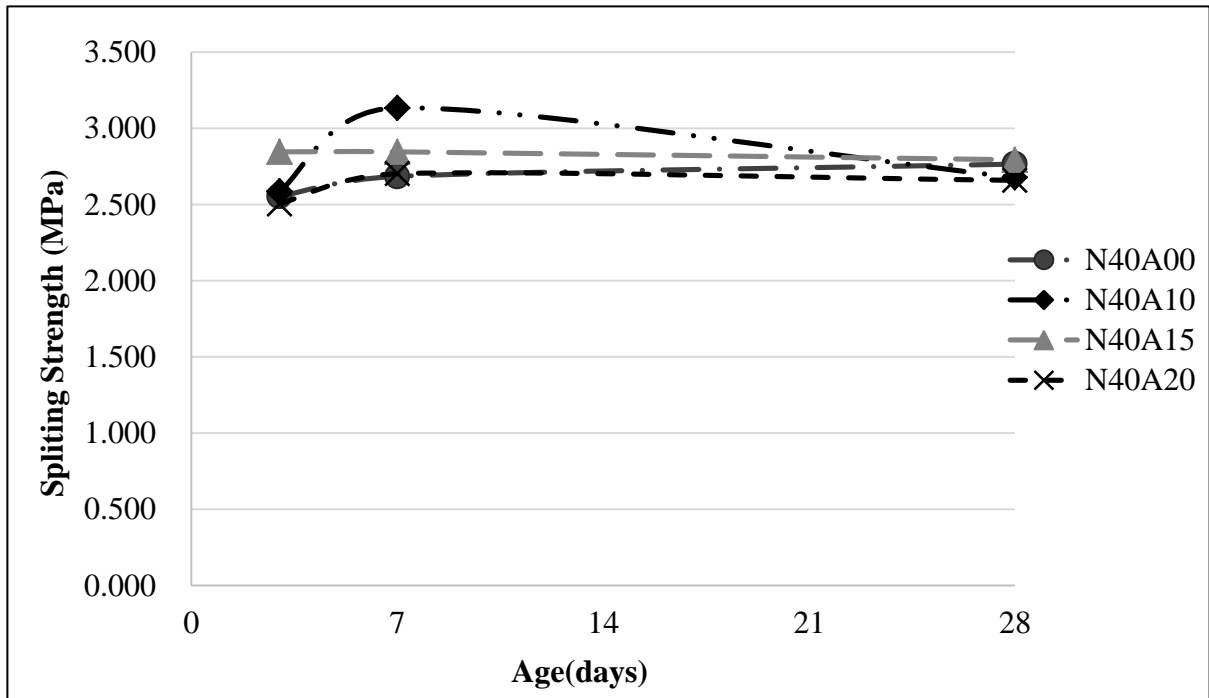


圖 4-11 天然骨材組劈裂強度發展趨勢圖

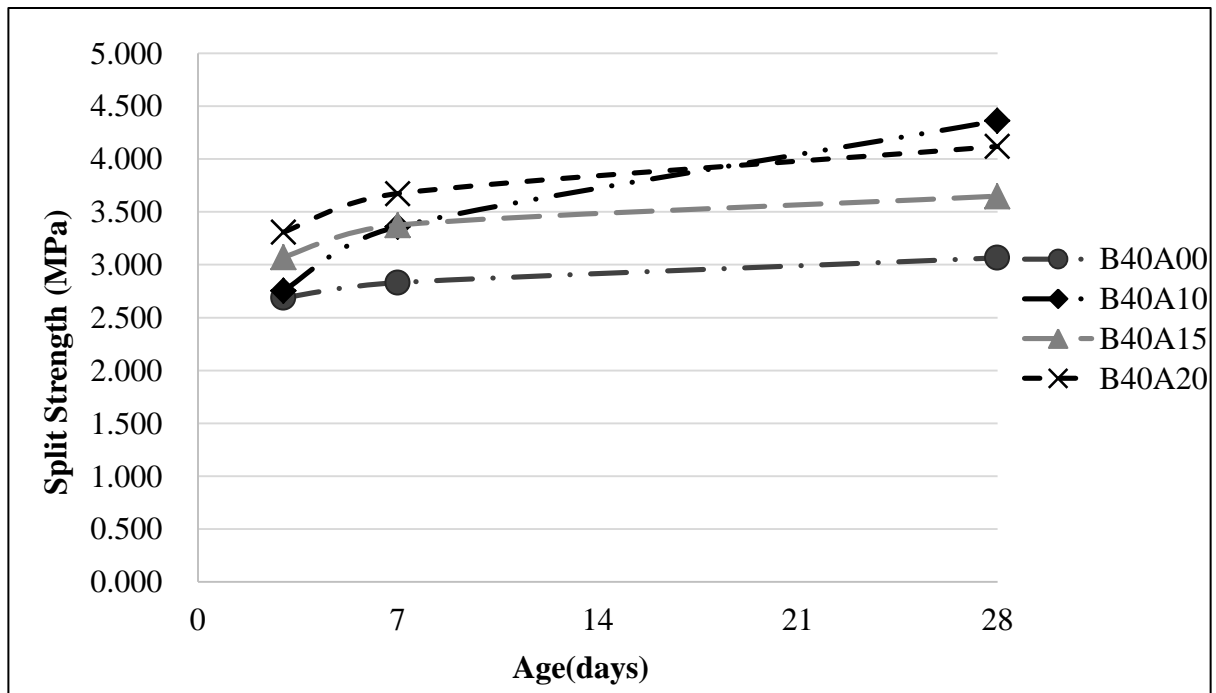


圖 4-12 轉爐石組劈裂強度發展趨勢圖

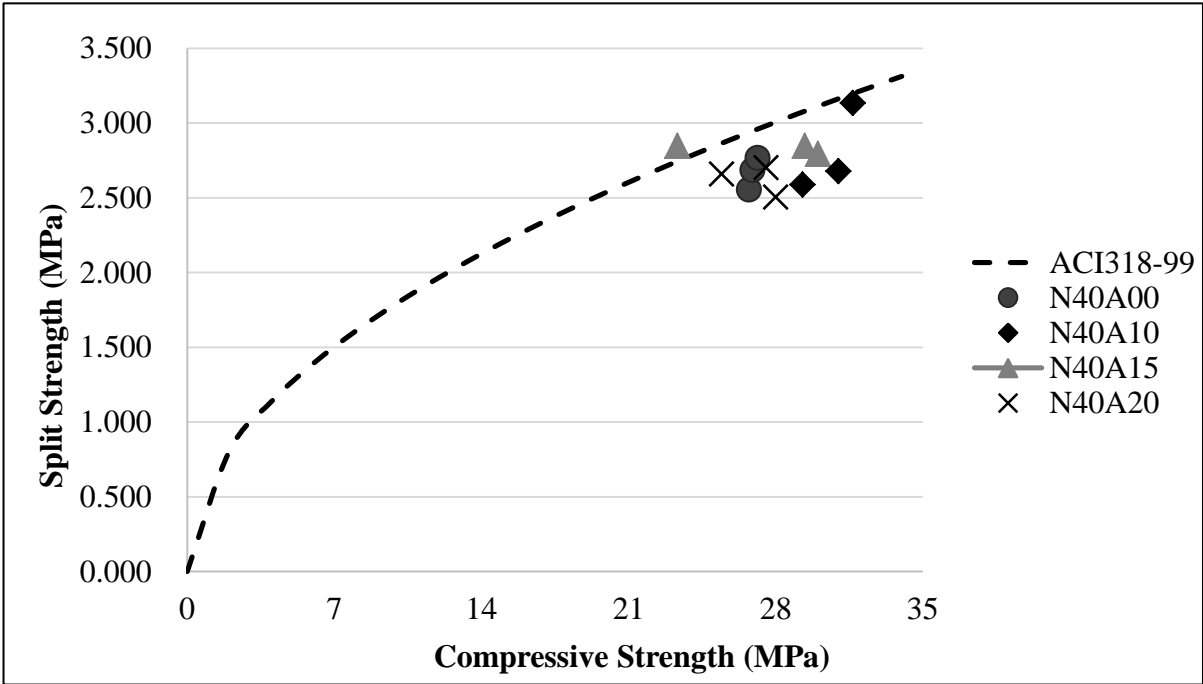


圖 4-13 天然骨材組抗壓強度-劈裂強度關係圖

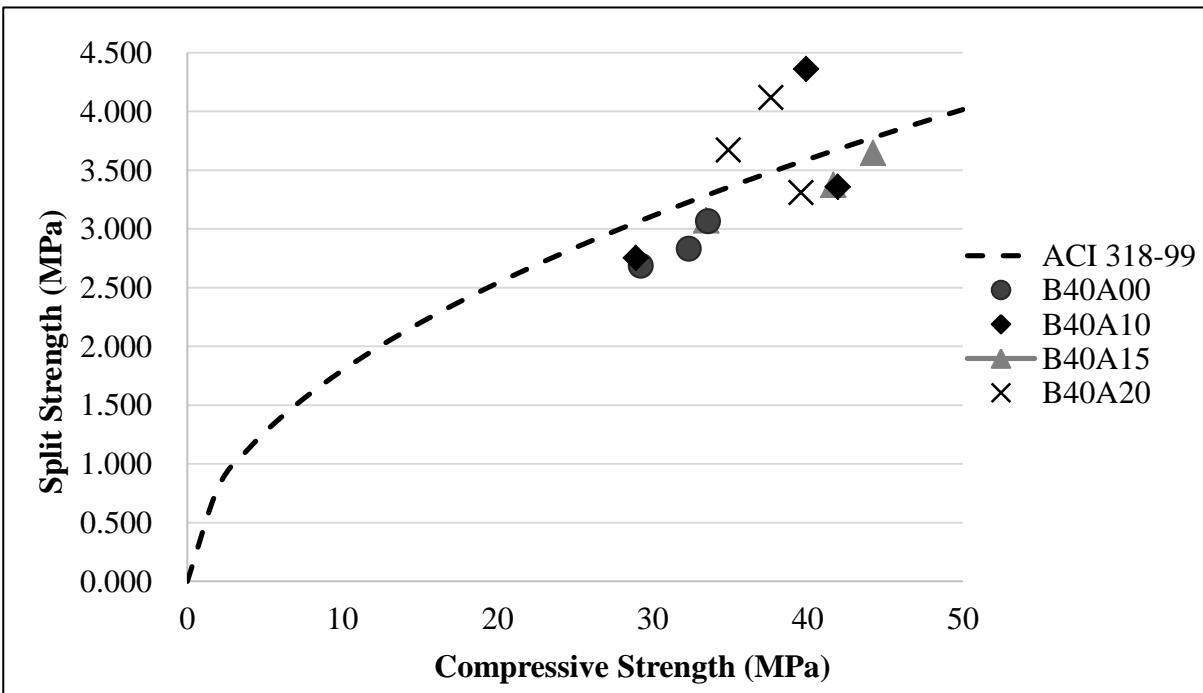


圖 4-14 轉爐石組抗壓強度-劈裂強度關係圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

故本次研究目的是為了將針對改質後的轉爐石進行試驗，與天然骨材加以比對，了解其添加於混凝土中的工程性質進行研究，並適量取代細骨材後的強度發展狀況進行探究，以下就本研究之結果討論：

1. 以骨材的基本性質來看，可以發現改質轉爐石的細骨材吸水率比其他細骨材高，細度也比較大，除跟製造過程有關外，尚因為轉爐石內層結構有很多孔隙，在長時間泡水下是會有較多的吸水量。
2. 從砂漿的各項試驗結果來看，由於水灰比太低會因為工作性差，使得混凝土的搗實孔隙過多，以至於強度較低。而標準砂漿在不同水灰比的抗壓強度表現上沒有很明顯的變化，改質轉爐石砂漿的抗壓強度表現上較標準砂漿及天然砂漿高，工作性也比較好。
3. 單就未有任何奈米氧化鋁粉末取代細骨材的條件下，改質轉爐石取代天然骨材應用於混凝土上，抗壓強度明顯高出近 5MPa，這與改質轉爐石中含有金屬的成分有極大關聯，另外改質轉爐石因有類似水泥的成分，可以提供微量的 C_3S 、 C_2S 提供混凝土強度的增加，。
4. 在奈米氧化鋁粉末的添加下，於天然骨材組別中，當奈米氧化鋁粉末以 1.0% 重量取代改質轉爐石砂的強度表現最好；於改質轉爐石組別中，當奈米氧化鋁粉末以 1.0% 重量取代改質轉爐石砂的強度表現最好，故在奈米氧化鋁粉末以 1.0%~1.5% 的重量取代下，混凝土抗壓強度明顯增加。
5. 在未添加奈米氧化鋁粉末的改質轉爐石的混凝土抗壓強度表現上，已經滿足 ACI 363-83 關於高強度混凝土的限制，而一般天然骨材混凝土則否，而少量奈米氧化鋁粉末取代可讓天然骨材混凝土抗壓強度達到此標準。

5.2 建議

1. 本研究所使用的水灰比為單一水灰比，未來可以針對設計強度，調整設計改質轉爐石混凝土之水灰比，可使水泥的使用量下降，減少碳排放等問題。
2. 目前改質轉爐石尚未被工程上大量應用，但由於改質轉爐石膨脹問題已經大幅下降，未來可以考慮先往海洋的結構物使用，可提供高強度混凝土之使用。
3. 本研究的級配系採用單一級配，未來可以參考不同級配狀態下，奈米氧化鋁粉末的添加量能有有要提升混凝土強度。抑或在不同改質轉爐石取代天然骨材下，強度增加趨勢之研究。
4. 本研究只針對 0%、1.0%、1.5%、2.0%的奈米氧化鋁粉末取代細骨材的使用量，而在實驗結果中以 1.0%~1.5%之間的添加量較佳，未來可以針對這狹窄的添加量更細部討論，以找到最適當添加比例。

參考文獻

- [1] 中鋼集團，「爐石利用推廣手冊」，高雄市，2000。
- [2] 李春雄(2002)，中鋼轉爐石回脹抑制方法之研究，國立成功大學土木工程系碩士論文。
- [3] 中聯資源網，2015(<http://www.chc.com.tw/docu.html>)。
- [4] P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro(1993). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 3/e*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- [5] Kenneth N. Derucher, George Korfiatis, Samer Ezeldin(1998). *Materials for Civil and Highway Engineers, 4/e*. New Jersey,NJ: Prentice Hall College.
- [6] Peter C. Hewlett(2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4/e*. Oxford, England: Butterworth-Heinemann.
- [7] 張祖恩等人(2010)，矽酸鈣晶相燒製及相轉變對無機廢棄物水泥資材化之影響 (第3年)，行政院國家科學委員會專題研究計畫研究成果報告。
- [8] Niesel, K. (1972). The importance of the α'_L - α'_H transition in the polymorphism of dicalcium silicate. *Silicates Industriels*, 37, 136.
- [9] 廖國裕(2003)，混凝土中骨材與水泥漿界面處過渡區性質與耐久性之研究，\國立交通大學博士論文。
- [10] 黃兆龍(2006)。混凝土材料品質控制試驗。台北市：詹氏書局。
- [11] Jazairi B.E. and J.M. Illston, “The hydration of Cement paste Using TheSemi-Isothermal Method of Derivative Thermo gravity.” *Cement and*

Concrete Research, Vol.10, 1980.

- [12] Mindess, S. and J. F. Young (1981). *Concrete*. New Jersey, NJ: Prentice Hall College.
- [13] Soroka, I (1970). *Portland Cement Paste and Concrete*. London, England: Macmillan Press.
- [14] 沈得縣 (1981), 「高爐熟料與飛灰之波索蘭反應機理對水泥漿體巨微觀性質之研究」, 國立臺灣科技大學博士論文
- [15] Taylor, H. F. W (1997). *Cement Chemistry*. London, England: Thomas Telford.
- [16] 黃兆龍 (1985), 「高等混凝土技術」, 講義, 國立臺灣科技大學。
- [17] Bentur, Arnon, et al. "Structure Properties of Calcium Silicate Pastes: II. Effect of curing Temperature." *Journal of The American Ceramic Society*, Vol.62, No.7-8, pp.362-366, 1979.
- [18] Metha, P. Kumar. "Pozzolanic and Cementitious Byproducts as Mineral Admixtures for Concrete – A Critical Review." *ACI sp-79*, 1983.
- [19] Powers, T. C., "The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland-Cement Paste—Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination", *Research Department Bulletin RX029*, Portland Cement Association, 1949.
- [20] Van Breugel, K. "Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement based materials", Thesis, 2nd version, Delft University Press, 1997.
- [21] 王寵瑋 (2011), 「爐石水泥砂漿添加皂土於抗腐蝕性能之研究」, 國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文。
- [22] 陳文輝 (2008), 添加轉爐石粉對混凝土工程性質影響之研究, 國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文。
- [23] 楊貫一, 「爐石資源化—中鋼公司爐石應用的過去與未來」, 技術與訓練, 第

17 卷，第 1 期，pp.31–46，1992。

- [24] 中鋼公司，2015(<http://www.csc.com.tw>)。
- [25] 中聯資源股份有限公司，「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊」，2010。
- [26] 林志棟(2001)，「氣冷轉爐石添加飛灰、底灰應用於基底層材料之研究」，國立中央大學土木工程研究所，期末報告。
- [27] 黃兆龍(1984)，「高爐熟料的性質及在混凝土工程上的應用」，營建世界 32，pp.55~59，1984。
- [28] 許伯良，林平全，徐登科，2011，2011 年轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會：爐石產製與工程應用(10–18 頁)。
- [29] 日本爐石協會，2015(<http://www.slg.jp/>)。
- [30] 美國國家爐石協會，2015 (<http://www.nationalslag.org/>)。
- [31] 蔡敏行(2001)，「鋼鐵爐渣應用於海洋生態保育—日本爐渣應用概況介紹」，簡報資料。
- [32] Boyd P.W., et al. “A Mesoscale Phytoplankton Bloom in the Polar Southern Ocean Stimulated by Iron Fertilization.” *Nature* 407, pp.695~702, 2000.
- [33] 黃正忻(2000)，「轉爐石級配料應用於基底層材料施工特性與品質控制技術之研究」，正技術學院教師專題研究報告，報告編號 88-09。
- [34] 劉國忠(2001)，煉鋼爐渣之資源化技術與未來推展方向，環保月刊，第 4 期。
- [35] 李育成，楊金成，蔡立文，俞明塗(2014)，鑛冶，第 58 卷，第 4 期：轉爐渣改質技術在中鋼之應用與突破(33–32 頁)。
- [36] 顏富士，張沛翎，科學發展，第 408 期，2006：功能性粉末：奈米級 α -氧化鋁粉體—由三水鋁石談起(12–17 頁)。
- [37] 李京桓，黃肇瑞，科學發展，第 481 期，2013：生活化的結構陶瓷(60–65 頁)。

- [38] 張文宗(2003)，鋁渣資源化剩餘物之再利用探討，國立成功大學資源工程工程學系研究所碩士論文。
- [39] 洪瑞和，董騰元，科技部高瞻自然科學教育資源平台：鋁的化合物，2008 (<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=5032>) 。
- [40] 詹穎雯，李銘智(2011)，中國土木水利工程學刊，第 23 卷，第 2 期：鋼鐵爐石粉及飛灰於傳統混凝土中粉體之最佳用量研究。
- [41] Mat, J., "Steel slag-its production, processing, characteristics, and cementitious properties," Civ. Engrg. Vol. 16, issue 3, pp. 230-236(2004).
- [42] 靳蛟，李振，張繼國，山東陶瓷，第 31 卷，第 5 期，2008： α -氧化鋁微粉粒度對澆注料施工性能和強度的影響。
- [43] 鄧勇躍，王璽堂，張保國(2003)， α - Al_2O_3 微粉和水泥對剛玉質自流澆注料性能的影響。
- [44] Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi ,etc."Influence of Al_2O_3 on the compressive strength and workability of blended concrete,"Journal of American Science , Vol.6,Issue5,pp.6-9(2010).
- [45] Kurdowski Wieslaw(2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Berlin, Germany: Springer.
- [46] Steven H. (2006). Design and Control of Concrete Mixtures. 14th Edition, PCA.
- [47] Taylor, H. F. W., "Cement Chemistry", Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- [48] Paul E. Stutzman. "Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography", Materials Science of Concrete Special Volume: Calcium Hydroxide in Concrete (Workshop on the Role of Calcium Hydroxide in Concrete). The American Ceramic Society. November 1-3, 2000,Anna Maria Island, Florida, 59-72 pp,

2001.

- [49] 黃士元，「近代混凝土技術」，陝西科學技術出版社，1998年。
- [50] Michael F. Peintinger, Michael J. Kratz and Thomas Bredow,
“Quantum-chemical study of stable, meta-stable and high-pressure alumina polymorphs and aluminum hydroxides,” Royal Society of Chemistry, pp.13143-13158(2014)
- [51] 謝茂城(2000)，「我國鋼鐵爐渣資源化之芻議」。
- [52] 李賢華，張正憲等人(2017)，「鈣化石人工魚礁」，財團法人成大研究發展基金會計畫成果報告書。
- [53] Meral Oltulu, Remzi Şahin,”Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume,”Materials Science and Engineering: A, Vol. 528,Issue22-23, pp. 7012–7019 (2011.08).
- [54] Marcel Cheyrezy, Vincent Maret, Laurent Frouin,”Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)”, Cement and Concrete Research,Vol. 25,Issue7, pp. 1491–1500 (1995.10).
- [55] Steven H. (2006). Design and Control of Concrete Mixtures. 14th Edition, PCA.
- [56] 黃隆昇，林登峰，林平全，許伯良，中工高雄會刊，第12期：評估煉鋼爐石應用於瀝青混凝土之性質及現場鋪設成效。
- [57] 楊珮琳(2005)，不同養護條件下添加飛灰或爐灰對水泥材質性質影響之研究，國立台灣海洋大學河海工程研究所碩士論文。
- [58] Shunsuke Hanehara, Fuminori Tomosawa, Makoto Kobayakawa, , KwangRyul Hwang.”Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste,” Cement and

Concrete Research, Vol. 31, Issue 1, pp. 31–39 (2001.01).

- [59] 黃健威(2011)，轉爐石在工程使用上之問題及其改善方法之研究，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
- [60] 吳崇聖(2006)，飛灰及爐石粉活性粉混凝土性質之研究，國立台灣科技大學營建工程系研究所碩士論文。
- [61] 鄭聿翔(2015)，轉爐石應用於透水混凝土之研究，國立中山大學海洋環境及工程學系研究所碩士論文。
- [62] 張正憲(2015)，廢輪胎橡膠粉應用於轉爐石透水混凝土性能改善之可行性研究，國立中山大學海洋環境及工程學系研究所碩士論文。
- [63] 蔡柏棋，徐登科，技師報，第 938 期：爐石與應用，pp.2–3，2014。
- [64] 陳勝傑(2015)，卜作嵐材料於活性粉混凝土應用之研究，國立中山大學海洋環境及工程學系研究所碩士論文。
- [65] B,M,PROCTOR.Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxygen Furnace, and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags. Environmental Science & Technology. pp.1576-1582(2000).
- [66] 黃兆龍，「混凝土材料品質控制試驗」，詹氏書局，1996。
- [67] 中央標準局，「CNS 中國國家標準」，1993。

摘要

基於環境保護及物盡其用的精神，將煉鐵所剩下的廢棄物拿來使用，轉爐石便是其中一個重要應用。然而轉爐石中游離氧化鈣($F-CaO$)以及氧化鎂(MgO)，其吸水後將造成體積膨脹增加0.77~3倍，透過加入氧化矽進行轉爐石的改質，大幅降低膨脹的問題。比較四種水泥砂漿試體：天然細骨材、標準細骨材、矽質細骨材、改質轉爐石細骨材，相較於天然砂漿強度，以改質轉爐石砂漿試體強度增強近兩倍為最高，又標準砂漿試體強度於水灰比0.35~0.5間強度落差不大，在同種砂漿中，隨水灰比上升流度也變大，在平衡強度及流度下，以水灰比0.485表現最佳。

目的及方法

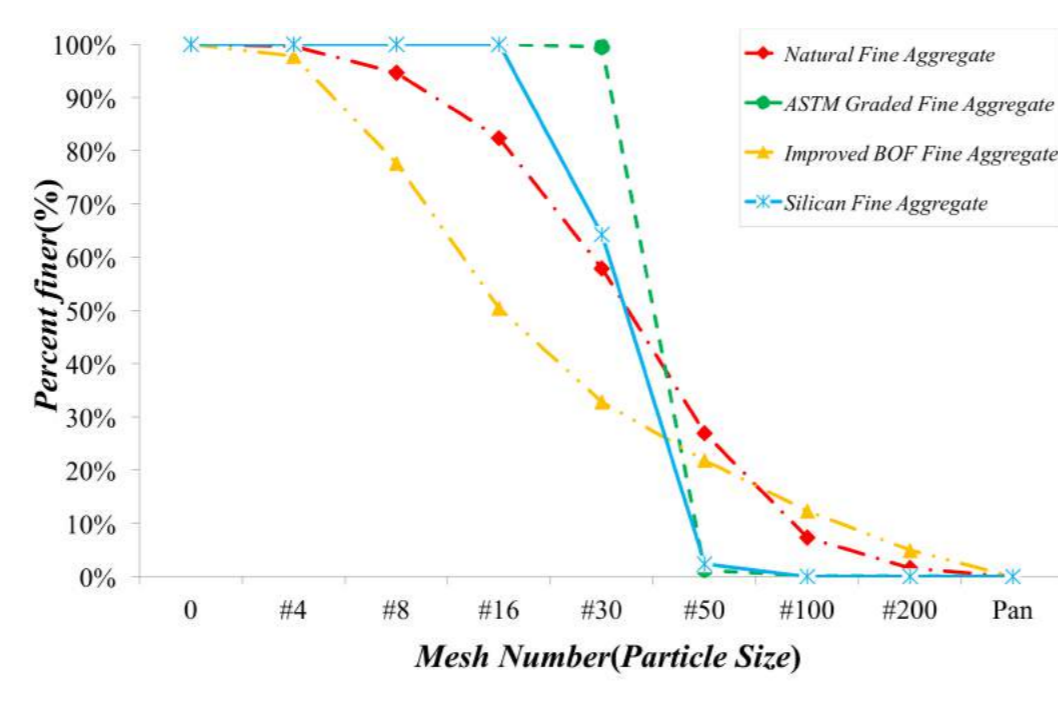
- 目的：**隨改質轉爐石，取代粗骨材於卜特蘭水泥中，對於新拌混凝土工程特性之影響，及對於混凝土硬化後之工程特性，尤其是混凝土之抗壓強度。
- 材料：改質轉爐石**
在轉爐剛倒出爐渣時，爐渣為液態渣的狀態，以噴吹管吹入氧氣繼續加熱爐渣，使爐渣中殘留之 FeO 氧化為 Fe_2O_3 ，並吹入矽砂或玻璃細粉等改質劑，令其與 $F-CaO$ 、 MgO 反應形成穩定的矽酸鹽^[1]化合物，或與 Fe_2O_3 反應^[2]形成 C_2F ，最後將轉爐石中的不安定成分予以消解。
 $[1] 2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2 (C_2S)$
 $[2] 2CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 2CaO \cdot Fe_2O_3 (C_2F)$
- 試驗方法：**
 - 骨材基本試驗：(1)單位重、(2)吸水率、(3)骨材細度試驗
 - 新拌性質：流度試驗(CNS1012，標準流度值在100%~115%)
 - 試體試驗：(抗壓強度試驗：ASTM C109，以每秒0.72~2.8 kgf/cm²增加荷重)

實驗結果I

一、轉爐石細骨材基本性質

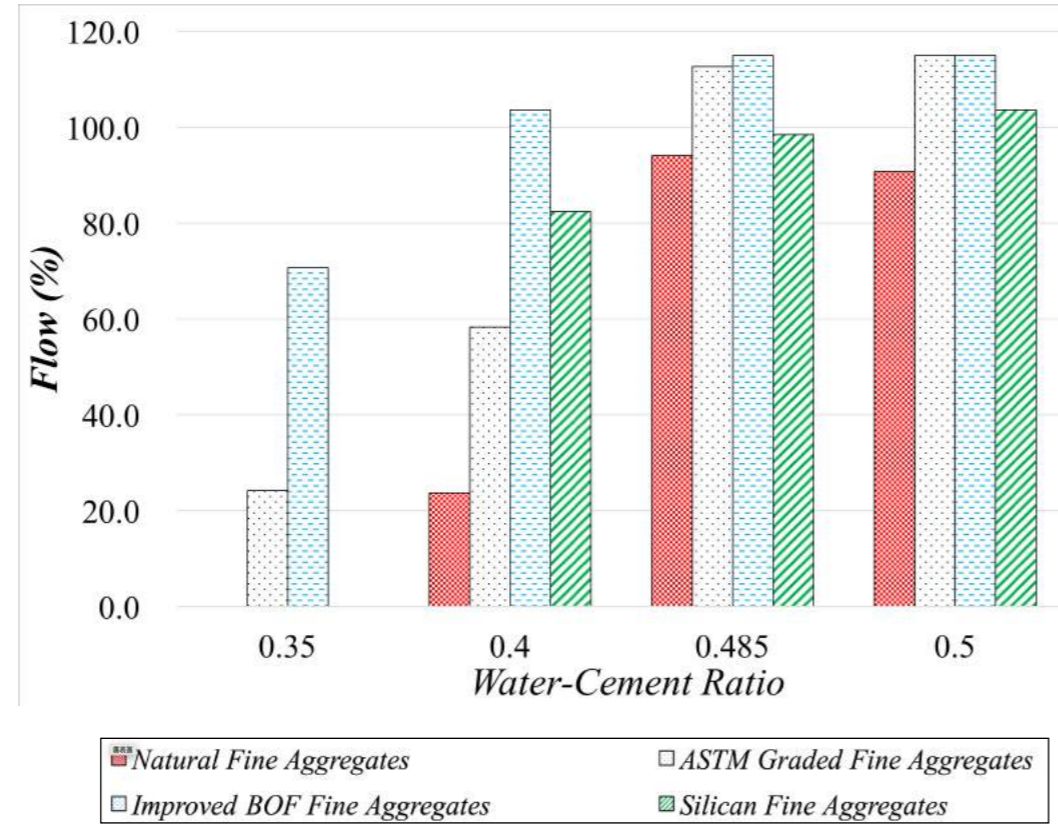
骨材種類	試驗結果	細度模數	比重	氣乾含水量(%)	面乾飽和含水量(%)
天然細骨材		2.312	2.667	0.412	2.318
標準細骨材		1.991	2.703	0.201	0.552
矽質細骨材		2.334	2.564	0.105	0.699
改質轉爐石細骨材		3.072	2.899	1.528	4.075

在與其他三者骨材相較下，粒徑較大但曲線的形狀最接近天然細骨材的曲線分佈，可能因改質轉爐石細骨材雖粒徑偏大，但整體取樣粒徑分佈連續且均勻，不若標準細骨材或細質細骨材粒徑較小且集中。再者，由於改質轉爐石細骨材的比重雖然較大但卻有較大的吸水率，這與轉爐石細骨材含有較多的金屬礦物有關，卻也因為在製作過程中因為急冷造成有較多的氣泡能有較高的吸水率狀況，但卻是三者中吸水速度較緩慢。

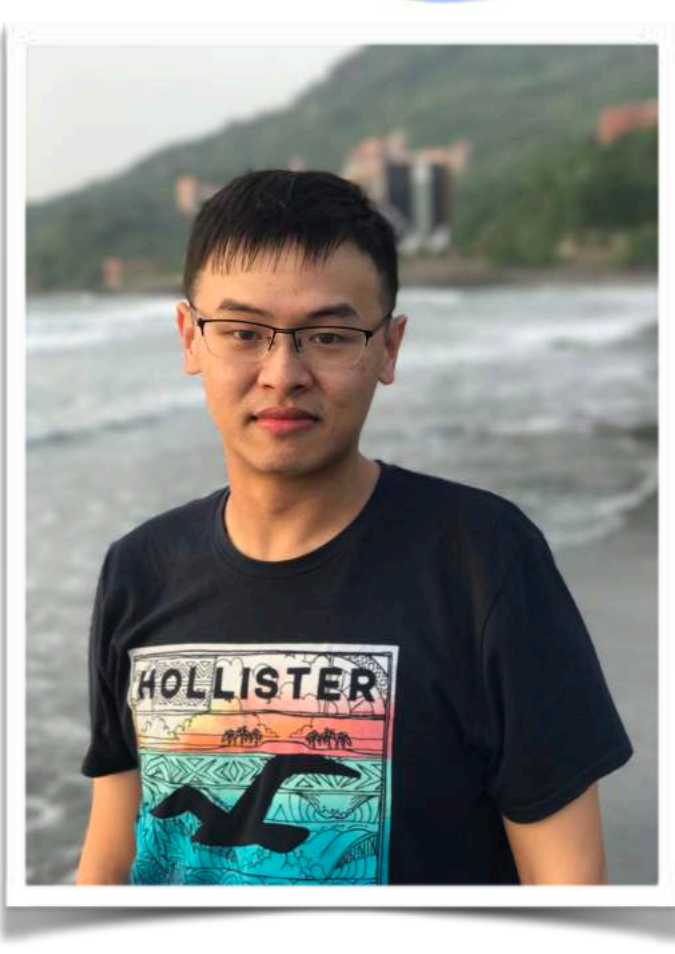


二、新拌性質

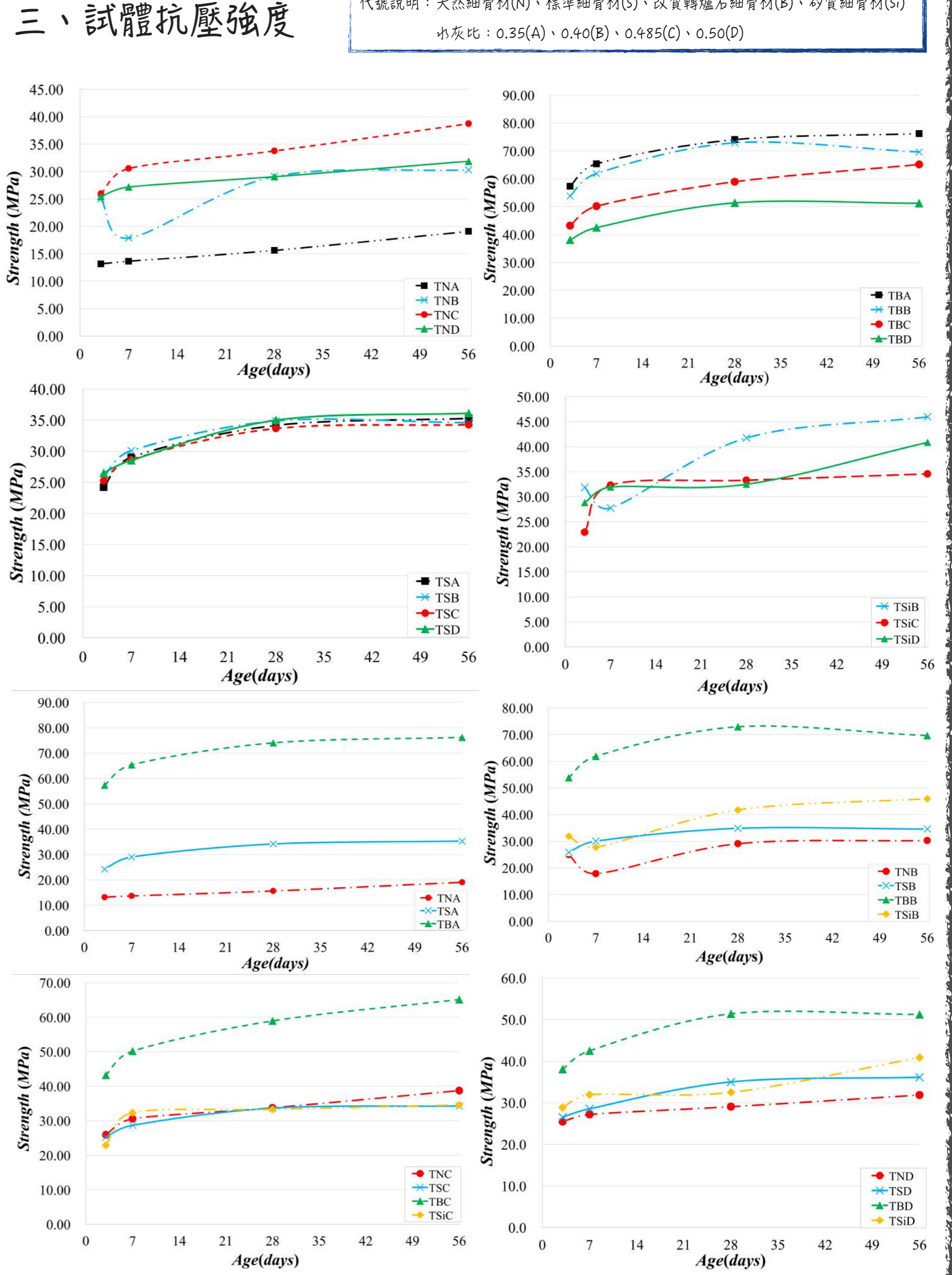
在比較整體實驗狀況，隨著水灰比越大，水泥漿體的流度也隨之上升，又以改質轉爐石細骨材砂漿的工作性最好，這可能與之雖然吸水率大，但吸水速率緩慢有相對關係。



海洋環境及工程學系
 參賽者：盧易聖
 指導教授：李賢華 教授



實驗結果II



整體結果而言，低水灰比狀態下，因流度偏低造成工作度不佳，試體中易有結構不完整之疑慮，強度無法達到預期，反倒以工作度較佳的水灰比0.485在工作性及強度兩者表現較平衡，為本研究最佳水灰比。標準細骨材試體可見水灰比對其強度影響不大，改質轉爐石細骨材砂漿試體強度是四種砂質砂漿強度表現最佳，強度比天然細骨材試體強度增加近乎一倍之高。可見未來改質轉爐石細骨材的應用可以更加廣泛。

結論建議

- 改質轉爐石在文獻研究中，已顯示不穩定的膨脹問題已大幅解決，未來可以考慮添加至未直接影響人類生命安全的離岸海洋結構物
- 增強海洋結構物的前提下，添加改質轉爐石於漿體中，可在設計相同強度下的海洋結構物中，減少水泥的用量，並達到資源最優化使用。
- 將改質轉爐石細骨材部分取代於天然細骨材中，適當地利用於海岸維護及填補工程中。
- 低水灰比的條件因工作性不佳，未來試驗者的水灰比建議最低以0.45為基礎設計。
- 本次研究僅針對海洋結構物的混凝土改強，尚未能有抗蝕的研究，未來的研究可針對腐蝕進行更多著墨。