

利用脫硫渣與水淬爐石產製無卜特蘭水泥控制性低強度材料

郭文田* 翁明偉

國立高雄應用科技大學土木工程系

摘 要

本研究以水淬爐石與脫硫渣粉為膠結材料、脫硫渣為骨材，產製無卜特蘭水泥之高流動性低強度材料(CLSM)。結果顯示以脫硫渣骨材取代天然骨材之砂漿，抗壓強度隨水淬爐石用量減少而降低，顯示水淬爐石為主要強度來源。脫硫渣骨材因磨損率達 40%，取代天然骨材後抗壓強度降低；本研究所拌製 CLSM 之凝結時間為 7~12.5 小時、坍度達 24~28 cm、坍流度可達 49.5~84.0 cm，而 28 天抗壓強度介於 1.47~2.65 MPa，符合 CLSM 易再開挖之精神，故水淬爐石搭配脫硫渣骨材運用於 CLSM，極具可行性。

關鍵詞：脫硫渣，水淬爐石，高流動性低強度材料

Utilization of Desulfurization/Granulated Blast Furnace Slag as Controlled Low Strength Material Without Portland Cement

Wen -Ten Kuo* and Ming-Wei Weng

Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Applied Science

ABSTRACT

The desulphurization slag aggregate controlled low strength material (CLSM) made without Portland cement were studied. The desulphurization slag sand mortar without of Portland cement compressive strength decrease as granulated blast furnace slag powder lowered. Results indicate that the granulated blast furnace slag powder and desulphurization slag powder have cementitious properties. The initial setting time, slump, slump flow and 28-days compressive strength of CLSM is between 7~12.5 hours , 24~25 cm, 49.5~84.0 cm, and 1.47~2.65MPa respectively, it accords the regulation of non-normal CLSM. The desulphurization slag and granulated blast furnace slag might be resources on the manufacture of CLSM without Portland cement.

Keywords: desulphurization slag, granulated blast furnace slag, controlled low strength material

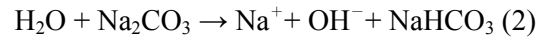
一、前言

鐵水脫硫渣(以下簡稱脫硫渣)產自以鐵礦砂為主要原料之一貫作業煉鋼廠，經由脫硫劑自高爐鐵水脫硫所產生之固體廢棄物，國內只有中鋼公司為一貫作業煉鋼廠，因此國內煉鋼脫硫渣皆由中鋼公司所產出，每年產量約有 25 萬噸。中鋼脫硫渣屬於一般事業廢棄物，並經行政院環境保護署公告為「可再利用廢棄物」，目前國內對於其處理及再利用方式有：

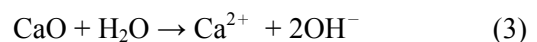
- (1)將中鋼煉鋼脫硫渣內約 25~30%之金屬鐵成分以磁選方式回收，作為煉鐵原料。
- (2)藉由其高 pH 值(約 12.4)及具鈣鎂鋁矽酸鹽特性，可作為農業土壤改良劑及肥料，並增進土壤中磷鈣鎂鋅之有效性，消除鋁及錳的毒害。
- (3)無重金屬溶出之虞，可作為土木工程土方回填材料。
- (4)部份取代石灰石用於燒製水泥熟料，可減少 CO₂ 之排放量。

雖然脫硫渣之再利用方式廣泛，但除了其前期磁選處理所得之金屬鐵有較高之再生率與價值外，所剩純化後之脫硫渣由於 pH 值接近腐蝕性事業廢棄物標準(pH 值達 12.5)，因此除了用於土壤改良、土方回填及部份取代石灰石用於燒製水泥熟料外，其餘仍無法完全消耗利用且單價低廉甚至乏人問津。再者，台塑集團亦將於雲林縣投資興建一貫作業煉鋼廠，屆時脫硫渣產量將會大量增加，因此極需尋求其他再利用方式以解決目前脫硫渣資源化程度不高之問題。

水淬爐石本身含有之氧化物體系為 R₂O-RO-R₂O₃-SiO₂-H₂O[1] 或 RO-R₂O-SiO₂ 系，一般簡化為 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系之玻璃質。而水淬爐石的鹼基度偏低、共價鍵較多且離子鍵少，造成其本身結構緻密，因此需要活性大的鹼金屬化合物溶液解離出大量 OH⁻ 離子來破壞其共價鍵結構，強制產生水化反應。考慮水淬爐石有效水化反應環境，一般皆使用激發水化反應的活化劑，目前常用方式分為兩種，一是與一般傳統卜特蘭水泥混合使用，另一為加入鹼鹽(鹼活化劑)。目前常用的鹼鹽(鹼活化劑)有矽酸鈉、碳酸鈉及氫氧化鈉，其原理以 Na 化合物舉例說明如下[2]：



由於高爐煉得之鐵水含有硫，因此需以脫硫劑將其中的硫脫除，所得的渣體冷卻呈細粒狀，稱之為「脫硫渣」，又因其所含成分中亦有很高含量之 SiO₂，故又稱之「矽酸爐渣」。中鋼所使用之脫硫原料為消石灰—石灰系及石灰石—石灰系，其主要成分為 CaO、Ca(OH)₂ 與 CaCO₃。經脫硫後，脫硫渣中存在大量 CaO，由於 CaO 存在使得脫硫渣與水接觸後會使水體 pH 值升高。其反應式如下[2]：



Watanabe 等人[3]利用水淬爐石及火力燃煤發電廠之煙管脫硫石膏進行無水泥爐渣膠結料混凝土研究中指出，若以水淬爐石和脫硫石膏混合比例 9:1，則可以輕易獲得強度 24.5 至 44.1MPa 的混凝土強度，並且此類混凝土擁有低水化熱優勢，但凝結時間與碳化性質較差，脫硫渣相較於煙管脫硫石膏則具有相當高的 CaO 和較低的 MgO、Al₂O₃ 以及 S，但基本化學成分相似，並且脫硫渣含大量 CaO，於水中可產生 OH⁻ 使水體 pH 值上升，直接提供高鹼環境，因此可促使水淬爐石產生水化反應。

水淬爐石為高爐煉鋼急速冷卻後之副產物，必須藉由鹼性觸媒刺激使其活化產生卜作嵐反應，一般可利用鹼鹽或者鹼性事業廢棄物為之，但加入鹼鹽所製成無卜特蘭水泥之水泥昂貴。因此如能將鹼性事業廢棄物利用於無水泥混凝土之生產上，實有極高的研究價值。由於脫硫渣具高 pH 值、無重金屬含量以及化合物成分與水泥熟料相近，且本身具有高鹼及高 CaO 特性可作為水淬爐石之鹼性觸媒，因此本研究將利用脫硫渣之高鹼特性，以脫硫渣骨材取代天然河砂，配合水淬爐石進行卜作嵐反應，探討脫硫渣骨材取代天然河砂後之各項工程性質，以及運用於控制性低強度材料 (controlled low strength material, CLSM) 可行性之研究。

二、研究方法

由於鹼劑或環境為鹼活化爐石膠結材料主要影響因子，因此本研究將脫硫渣粉與水淬爐石以不同比例混合後，分別與天然河砂及脫硫渣骨材產製無卜特蘭水泥爐石砂漿，進而生

產無卜特蘭水泥（全脫硫渣）之 CLSM，執行砂漿及混凝土各項新拌、硬固工程性質之探討，以瞭解全脫硫渣應用於 CLSM 之各項工程性質。

2.1 研究用材料

- (1)水淬爐石粉：採用中聯公司出產之水淬爐石粉(以下簡稱 WQS)。
- (2)脫硫渣粉：將中鋼脫硫渣，經磁選、破碎及乾燥後將脫硫渣內鐵金屬成份去除，並利用#100 篩進行篩分，取得通過#100 篩以下之脫硫渣粉(以下簡稱 DS-P)。
- (3)天然細骨材：採用一般天然河砂（以下簡稱 NS），作為砂漿細骨材用。
- (4)脫硫渣骨材：砂漿用細骨材為工廠處理後尾礦通過#4 部份(以下簡稱 DS-M)；混凝土用骨材則直接使用由工廠所生產之尾礦(以下簡稱 DS-C)。

2.2 材料種類

2.2.1 水淬爐石粉／脫硫渣粉砂漿

將水淬爐石粉分別與脫硫渣粉以重量比為 9：1、8：2、7：3、6：4 及 5：5 之比例作為膠結料，水膠比(W/B) 為 0.8，配比如表 1 所示。分別與天然河砂及脫硫渣骨材以 1：2.75 之比例拌合成砂漿，進行砂漿新拌及硬固性質分析。

2.2.2 水淬爐石粉／脫硫渣混凝土

經評估砂漿之各項工程性質後，本研究以低用量之水淬爐石粉，配合脫硫渣全骨材，製作高流動性低強度混凝土(CLSM)，並以降低成本為目標，進行 CLSM 各項工程性質試驗。配比以水淬爐石用量 100、150、200 及 250kg/m³ 及水膠比(W/B)0.5、0.6 為控制變因，配合以下計算方式得到脫硫渣骨材用量及用水量，各配比材料顯示於表 2。

研究所使用脫硫渣混凝土配比之計算方法如下：

- (1)粉料體積：(脫硫渣骨材重量×17.5%/(2.38×1000))+(水淬爐石粉重量/(2.83×1000))
- (2)骨材假體積：(脫硫渣骨材重量×(1-17.5%))/(2.54×1000)

- (3)水體積：((脫硫渣骨材重量×17.5%)+水淬爐石粉重量)×(W/B)/1000

公式說明如下：

- a. 脫硫渣骨材比重=2.54，水淬爐石粉比重=2.83，脫硫渣粉比重=2.38。
- b. 粉料（膠結材）體積：包含水淬爐石粉及脫硫渣骨材中通過#100 以下約佔全體體積 17.5%之脫硫渣粉。
- c. 骨材假體積：脫硫渣骨材之全部體積中，扣除脫硫渣骨材中通過#100 以下所含 17.5%的脫硫渣粉後所剩餘之脫硫渣骨材假體積。
- d. 水體積：以水淬爐石粉及脫硫渣粉做為膠結料，換算 W/B 所必須用水量之體積。
- e. 水淬爐石粉用量為預設已知值。
- f. 由(1)(2)(3)可算出脫硫渣骨材實際(真)用量，進而得知用水量。

表 1. 水淬爐石粉／脫硫渣粉砂漿配比(kg/m³)

WQS:DS-P	水淬 爐石 粉 WQS	脫硫 渣粉 DS-P	脫硫渣細骨 材 DS-M(SSD)	天然河 砂 NS(SSD)	用水 量
9:1	401.3	44.6	1226.2	--	356.7
8:2	355.7	88.9	1222.6	--	355.7
7:3	310.3	133.0	1218.9	--	354.6
6:4	265.2	176.8	1215.3	--	353.6
5:5	220.3	220.3	1211.8	--	352.2
9:1	407.3	45.3	--	1244.5	362.0
8:2	361.0	90.2	--	1240.8	361.0
7:3	314.9	135.0	--	1237.1	360.0
6:4	269.1	179.4	--	1233.3	358.8
5:5	223.6	223.6	--	1229.7	357.7

表 2. 水淬爐石粉／脫硫渣 CLSM 之配比(kg/m³)

配比代號	水膠比	水淬爐石粉	脫硫渣全骨材 (SSD)	水	理論單位重
100WQS-5	0.5	100	2048.7	229.3	2378
150WQS-5	0.5	150	1953.1	245.9	2349
200WQS-5	0.5	200	1857.6	262.5	2320
250WQS-5	0.5	250	1762.0	279.2	2291
100WQS-6	0.6	100	1949.9	264.7	2315
150WQS-6	0.6	150	1847.1	283.9	2281
200WQS-6	0.6	200	1744.4	303.2	2248
250WQS-6	0.6	250	1641.6	322.4	2214

2.2.3 實驗項目

本研究係以水淬爐石粉與脫硫渣粉作為膠結材料，搭配天然河砂或脫硫渣骨材開發無卜特蘭水泥的爐渣砂漿，並且探討運用於 CLSM 之可行性。首先將取得之水淬爐石粉、脫硫渣粉、天然河砂及脫硫渣骨材進行比重、吸水率、布蘭氏細度、篩分析及洛杉磯磨損等物理特性試驗，並透過 X 光螢光分析(X-Ray Fluorescence, XRF)及 X 光繞射分析(X-Ray Diffractometer, XRD) 等方法進行化性分析。進而對砂漿的標準流度及抗壓強度進行試驗，以瞭解脫硫渣骨材取代天然骨材後之各項工程性質，進而對混凝土之凝結時間、坍度、坍流度及抗壓強度進行試驗及分析，探討其運用於 CLSM 之可行性。

三、結果與討論

3.1 材料基本性質

本研究所使用之膠結材料為水淬爐石粉及脫硫渣粉，骨材為天然河砂及脫硫渣骨材，將其分別進行相關物理及化學性質分析。

3.1.1 材料之物理性質分析

膠結料比重及布蘭氏細度試驗結果如表 3 所示，DS-P 比重相對小於 WQS。骨材篩分析結果如圖 1(a)及圖 1(b)所示，圖 1(a)顯示 NS

為優良級配，並且骨材顆粒大於#50 號篩(0.3mm)之級配與 DS-M 相似，而 DS-M 小於#50 號篩(0.3mm)及#100(0.15mm)之骨材顆粒佔 50.40%及 27.2%明顯遠高於 NS 的 24.52%及 7.27%，顯示 DS-M 含大量粉末，此現象將影響新拌砂漿之工作性與標準稠度用水量；圖 1(b)則顯示 DS-C 小於#4 號篩(4.75mm)之骨材顆粒高達 86%以上，即#4 以下之粒徑部份，佔了 DS-C 全料之大部分。

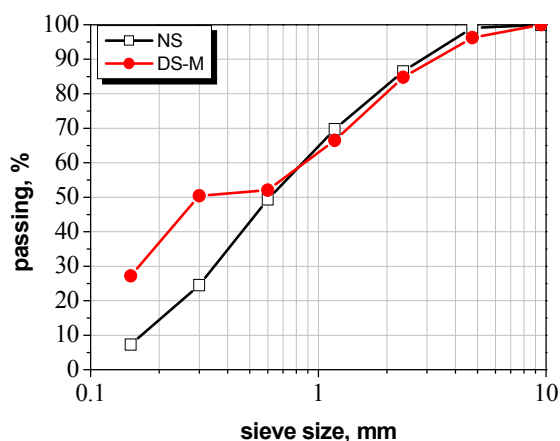
粗細骨材比重、吸水率試驗及粗骨材洛杉磯磨損率試驗，結果如表 4 所示。DS-M 比重與 NS 相近，因此以 DS-M 取代 NS 時，對於砂漿整體單位重影響甚小；DS-M 及 DS-C 吸水率遠大於 NS，以 DS-M 及 DS-C 取代時將使砂漿／混凝土用水量增加，此現象將影響新拌砂漿／混凝土工作度或骨材內部含水大量釋出而影響水膠比等問題；一般普通強度混凝土中使用之粗骨材磨損率需小於 50%，但平常所使用天然粗骨材磨損率皆在 20~30%之間。脫硫渣骨材由於磨損率高達 40.33%，及其吸水率亦較高，因此當製作一般普通強度混凝土時，將受限於此脫硫渣之顆粒特性。故脫硫渣骨材如與一般天然粗骨材比較，將僅適合做為低強度混凝土用。

表 3. 膠結材料物理性質

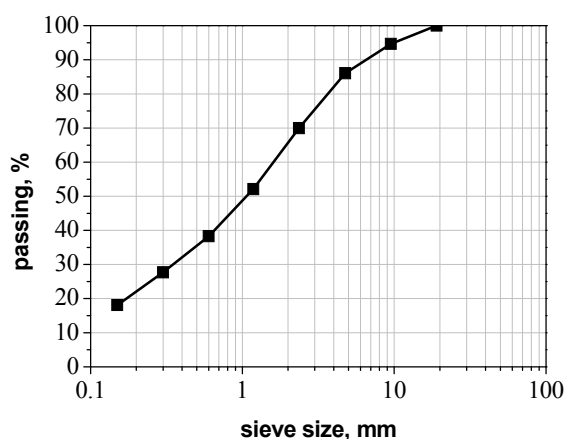
材料項目	水淬爐石粉	脫硫渣粉
材料代號	WQS	DS-P
細度(cm ² /g)	4023	3829
比重	2.83	2.38

表 4. 骨材基本性質

材料用途	產製砂漿		產製 CLSM
材料名稱	天然河砂	脫硫渣骨材	脫硫渣骨材
材料代號	NS	DS-M	DS-C
吸水率(%)	2.15	14.53	13.57
比重	2.62	2.54	2.54
磨損率(%)	—	—	40.33
細度模數(F.M)	2.5	2.3	—



(a)



(b)

圖 1. 骨材之級配曲線：(a) NS 及 DS-M ；(b) DS-C。

3.1.2 材料之 X 光螢光分析(XRF)

將 WQS、DS-P 及 DS-M 以 X 光螢光分析 (XRF) 進行定量分析，其化學成份如表 5 所示，結果顯示各種材料之主要成份皆為 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 氧化物，WQS 相對於 DS-P 及 DS-M 係屬於高 SiO₂、Al₂O₃ 材料；而 DS-P 的 Fe₂O₃ 含量低於 DS-M，顯示 DS-M 仍含有較多的渣鐵，此為表 3 及 4 中 DS-P 比重低於 DS-M 的主因。

3.1.3 材料之 X 光繞射分析(XRD)

圖 2 為脫硫渣粉之 XRD 分析圖，圖中顯示本研究所使用之脫硫渣主要成分為 CaO 以及 Ca(OH)₂ 兩種化合物，其中 Ca(OH)₂ 為 CaO 與環境中水分子反應後之

產物[4]，此外圖中亦發現有少量之 CaCO₃，這是由於 Ca(OH)₂ 在有水的環境下，會與溶解於水中的 CO₂ 產生反應，生成白色固體的鹼性 CaCO₃ 或者酸性的 Ca(HCO₃)₂[5]。

表 5. 研究用材料 XRF 分析

材料代號	WQS	DS-P	DS-M
CaO	43.11	66.16	48.26
MgO	7.51	2.29	1.33
SiO ₂	30.48	15.71	17.65
Al ₂ O ₃	14.67	3.48	2.77
SO ₃	1.31	3.42	2.30
Fe ₂ O ₃	0.53	7.35	24.58
P ₂ O ₅	0.56	0.57	0.86
MnO	0.53	0.45	1.06
K ₂ O	0.27	—	0.02

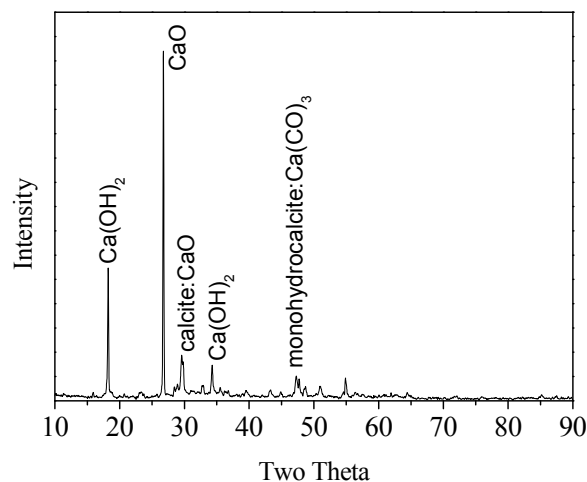


圖 2. 脫硫渣粉的 XRD 分析圖。

3.2 WQS/DS-P 砂漿新拌及硬固性質

本研究假設 NS 不參予 WQS/DS-P 膠結材料之水化反應，而拌製 WQS/DS-P 砂漿，探討 WQS/DS-P 各不同混合比例之新拌、硬固性質；並依 WQS/DS-P 砂漿之比例，以 DS-M 完全取代 NS，對其新拌、硬固性質進行探討，以評估脫硫渣骨材完全取代天然骨材之可行性。

3.2.1 標準流度試驗

本研究以膠結材料與骨材重量比為 1 : 2.75 拌製砂漿，並且測得砂漿於 $110 \pm 5\%$ 之標準流度值時所需之用水量換算成水膠比 (W/B)，並以此為依據進行配比用水量設計及探討配比流動性質。

圖 3 為各配比砂漿於標準流度時所需用水量之水膠比，結果顯示無論含 NS 或 DS-M 之砂漿，標準流度用水量因 WQS : DS-P 混合比例不同而有所增減，其用水量趨勢隨 WQS 比例下降 (DS-P 比例上升) 而呈線性增加， R^2 值為 0.99~1 之間，含 DS-M 之砂漿達標準流度值時所需用水量之水膠比皆高於含 NS 之砂漿約 0.196~0.232，此現象可由前述 (3.1 材料基本性質) 中之脫硫渣骨材篩分析結果說明，DS-M 在 #50 號篩 (0.3mm) 及 #100 (0.15mm) 以下之骨材顆粒明顯較 NS 高出 25.88% 及 19.93%，因此骨材中含大量粉末導致骨材整體表面積增加，而需要較多的拌合用水於骨材之間潤滑，以達到標準流度值。另由於 DS-M 之高吸水率 (14.53%)，亦使得含 DS-M 之砂漿達標準流度值時所需用水量皆高於含 NS 之砂漿。

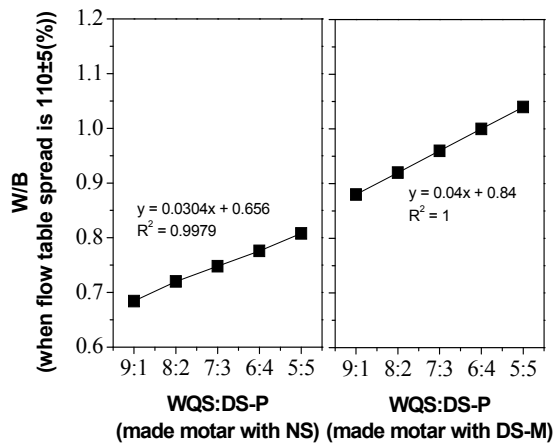


圖 3. 砂漿各配比於標準流度值 ($110 \pm 5\%$) 所需用水量之水膠比。

3.2.2 抗壓強度

本研究以膠結材料 (WQS / DS-P) 分別與 NS 及 DS-M，以 1 : 2.75 之比例拌製砂漿，水膠比採用 0.8 並養護於 $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 水中，分別於 1、3、7、28、56、90 及 120 天養護齡期進行抗壓試驗，並對試驗結果進行分析。

3.2.2.1 NS+(WQS / DS-P) 砂漿抗壓強度

本研究以膠結材料 (WQS / DS-P) 與 NS 製作各種配比及齡期砂漿，其抗壓強度試驗結果如圖 4 所示，結果顯示砂漿試體抗壓強度隨齡期增長，並且有漸緩之趨勢。其中齡期 28 天內皆以配比 8:2 之抗壓強度最高，當齡期超過 28 天各配比群組中 8:2 強度增加趨勢較 9:1 者緩，於養護 56 天後，配比 9:1 者之抗壓強度大於配比 8:2；另外，各配比群組中除了配比 9:1 強度發展較為特殊，其他配比抗壓強度皆隨 WQS 比例下降 (DS-P 比例上升) 而降低，上述現象主要由三大因素所造成：

- (1) DS-P 是一種鹼性物質，可作為 WQS 水化所需之觸媒，而配比 9:1 中 DS-P 含量較配比 8:2 為低，無法提供 WQS 足夠 OH⁻ 離子產生水化作用，因此 28 天齡期以內之早期強度發展受到限制。
- (2) 由於 DS-P 中之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 並未能有效提供強度，因此 WQS 產生之卜作嵐反應為主要強度來源，而晚期齡時仍然持續產生卜作嵐反應，故通常以 WQS 比例高者強度較高 [6-8]，因此配比 9:1 的 WQS 含量較高而具晚期強度優勢。
- (3) 一般脫硫渣與水反應後，CaO 初期水化將產生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 緻密層包覆脫硫渣顆粒，雖 WQS 仍然繼續水化消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [3]。但試體於水中養護，造成 DS-P 與水反應持續產生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，脫硫渣中由於 free-CaO 含量較高，且 free-CaO 水化速率較慢，在進行水化時易與水產生膨脹性反應，進而影響後續強度發展，因此 DS-P 含量較高者，強度發展易受阻礙 (如圖 5 所示)。

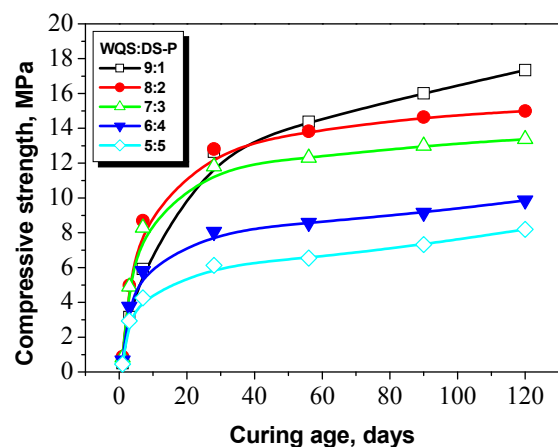


圖 4. (WQS/DS-P—NS) 砂漿各配比抗壓強度。

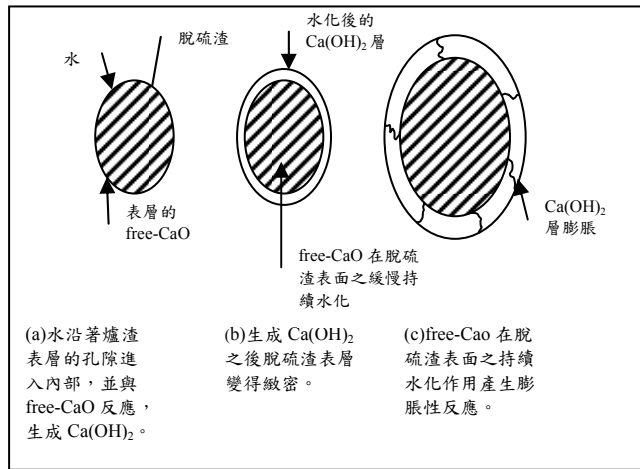


圖 5. Free-CaO 水化反應示意圖。

3.2.2.2 DS-M+(WQS/DS-P)砂漿抗壓強度

本研究另以 (WQS/DS-P) 膠結材料與 DS-M 為細骨材製作各種配比及齡期砂漿，其抗壓強度試驗結果如圖 6 所示，結果顯示各配比之砂漿試體，其抗壓強度有隨齡期增加而有漸緩之趨勢；並且當 WQS 含量減少 (DS-P 含量增加) 時，抗壓強度隨之降低，此現象顯示 DS-P 與 DS-M 提供足量 Ca(OH)_2 供 WQS 產生水化反應，而 WQS 膠結材料為主要強度來源，其含量多寡為決定抗壓強度高低之重要因素。

圖 7 為 NS+(WQS/DS-P) 及 DS-M+(WQS/DS-P) 砂漿抗壓強度比較圖，圖中可發現整體趨勢而言，NS+(WQS/DS-P) 砂漿配比 9:1 的 1~7 天齡期以及其餘配比的 1 天齡期抗壓強度會有低於 DS-M+(WQS/DS-P) 之現象外，NS+(WQS/DS-P) 砂漿抗壓強度皆較 DS-M+(WQS/DS-P) 高，NS+(WQS/DS-P) 砂漿 28 天抗壓強度最大值為 DS-M+(WQS/DS-P) 的 138%，而 120 天則為 142%，此現象推測是由於 DS-M 能在短時間內提供大量 OH^- 離子使 WQS 能較充分產生水化反應，但 DS-M 磨損率高達 40.33%，顯示 DS-M 本身顆粒強度低，砂漿整體強度有大量缺陷，造成 DS-M 取代 NS 時，其強度有下降之現象。

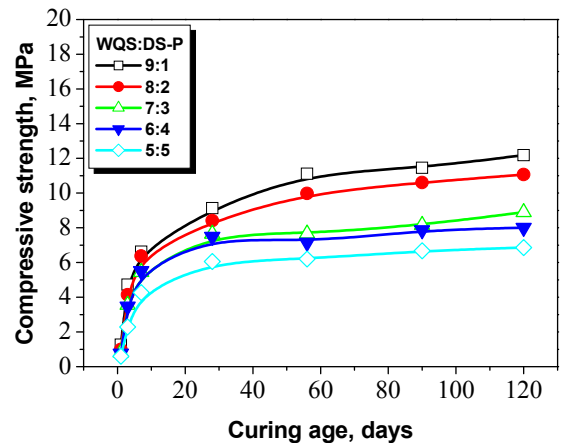


圖 6. (WQS/DS-P—DS-M) 砂漿各配比抗壓強度。

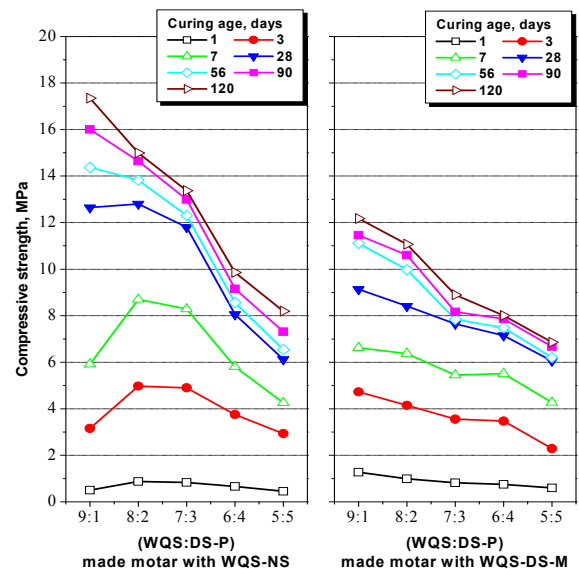


圖 7. NS+(WQS/DS-P) 砂漿及 DS-M+(WQS/DS-P) 砂漿抗壓強度比較。

3.3 CLSM 新拌及硬固性質

本研究經砂漿研究結果評估後，發現控制砂漿強度主要來源為 WQS 含量，其次為 WQS 細度、水膠比，另外 DS-M+(WQS/DS-P) 砂漿在可達標準流動度值之狀態下，28 天抗壓強度大部分皆在 8.2MPa (1200 psi) 以下，因此若能有效控制 WQS 含量以及水膠比，將可同時得到高流動性及低強度混凝土，即 CLSM；本研究在固定 WQS 用量為 100、150、200 及 250 kg/m^3 下，將之作為 CLSM 中主要膠結材料，並以 DS-C 為骨材以產製 CLSM 並兼具催化 WQS，對混凝土坍度、坍流度、凝結時間

及抗壓強度等新拌及硬固性質進行探討。

3.3.1 坍度及坍流度試驗

CLSM 為一種具高流動性及自充填性之材料，對混凝土而言則須擁有高坍度及坍流度來達到高流動性及自充填性。本研究各 CLSM 配比之坍度試驗結果顯示於圖 8，結果顯示各配比坍度範圍值為 24~28cm，一般而言提高拌和用水量可增加混凝土流動性，其中坍度值隨著水膠比及 WQS 用量上升（DS-C 用量的減少）而提高，係由於水淬爐石粉之表面較不易吸附水分，保水能力差即斥水能力強，使拌合料間游離水增加，因此導致新拌混凝土中材料顆粒之間的潤滑效果增加，因此使得坍度值上升。

本研究各 CLSM 配比之坍流度試驗結果顯示於圖 9，結果顯示各配比坍流度範圍值為 49.5~84.0cm，顯示具 CLSM 之良好充填性能，其中坍流度值隨著水膠比及 WQS 用量上升而提高，其原因為拌和用水量及 WQS 用量的增加皆有助於新拌 CLSM 中材料顆粒之間的潤滑效果增加，然而由於 DS-C 小於 #4 (4.75mm) 之骨材顆粒高達 86% 以上，因此以足夠拌合水量配合高細粒料含量的鬆散漿體結構，輔以少量粗粒料重力作用而達到高流動性。

3.3.2 凝結時間試驗

ASTM C403 為一種判斷 CLSM 是否達到可續行施工條件之簡易方法，一般混凝土初凝及終凝時間分別對應貫入強度為 3.4 MPa (500psi) 及 27.6 MPa (4000psi)，CLSM 可續行施工強度之貫入強度僅需達到 2.8 MPa (400psi)。

圖 10~11 為各 CLSM 配比凝結時間，結果顯示各配比皆無法於 24 小時內達到混凝土終凝貫入強度 (27.6 MPa)，各 CLSM 配比達 CLSM 可續行施工貫入強度 (2.8 MPa) 及一般混凝土初凝貫入強度 (3.4 MPa) 所需之凝結時間隨水膠比及 WQS 使用量減少而增加，水膠比影響程度為 0.25~0.75 小時，WQS 使用量在 150~250 kg/m³ 時每減少 50 kg/m³ 則凝結時間增加 0.35~1.25 小時，而 WQS 使用量在 100~150 kg/m³ 時每減少 50 kg/m³ 則凝結時間增加高達 3 小時，顯示 WQS 使用量影響幅度

較大，顯示藉由調整 WQS 用量即可控制凝結時間。

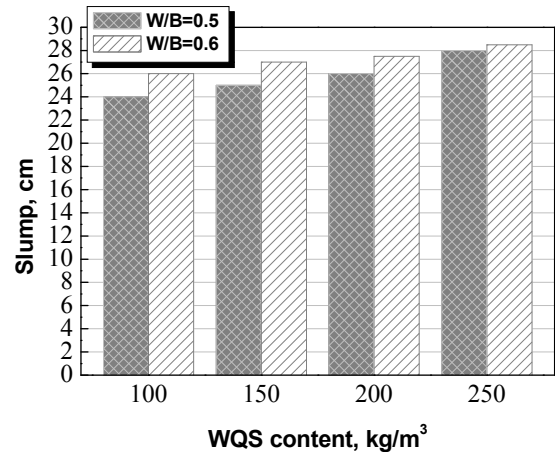


圖 8. 各 CLSM 配比之坍度。

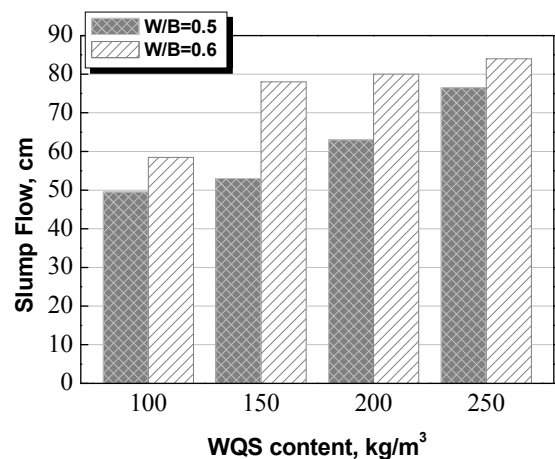


圖 9. 各 CLSM 配比之坍流度。

3.3.3 抗壓強度

以混凝土的觀點來說，CLSM 被定義為一種齡期 28 天抗壓強度不超過 8.2MPa (1200 psi)。

圖 12 為各 CLSM 配比抗壓強度，結果顯示各配比齡期 28 天抗壓強度值皆不超過 8.2MPa (1200 psi)，並且 90 天齡期之抗壓強度僅達 3.55 MPa，顯示後期強度仍不超過 8.2MPa (1200 psi)，因此符合 CLSM 易再開挖之精神。

圖 12 中亦顯示隨水膠比增加及 WQS 使用量減少，抗壓強度亦隨之降低；在相同 WQS 使用量下，水膠比 0.5 之 1 天齡期抗壓強度為水膠比 0.6 的 120.22~155.52%，3 天齡期則為 115.88~138.47%，7 天齡期(含)之後則維持於

97.11~113.79%，顯示早期強度受到水膠比之影響將隨齡期增長而漸趨平緩；在相同水膠比情況下，抗壓強度均隨 WQS 使用量增加而提高，以 WQS 使用量 100 kg/m^3 之抗壓強度為基準值，則 WQS 使用量 $150\sim 250 \text{ kg/m}^3$ 之 1 天齡期抗壓強度為 WQS 使用量 100 kg/m^3 的 131.56~291.25%，3 天齡期抗壓強度則為 182.84~394.19%，7 天齡期抗壓強度則為 162.41~251.74%，28~90 天齡期抗壓強度則維持在 119.96~202.27%，顯示提高 WQS 使用量於 1~3 天齡期之強度增加趨勢最高。

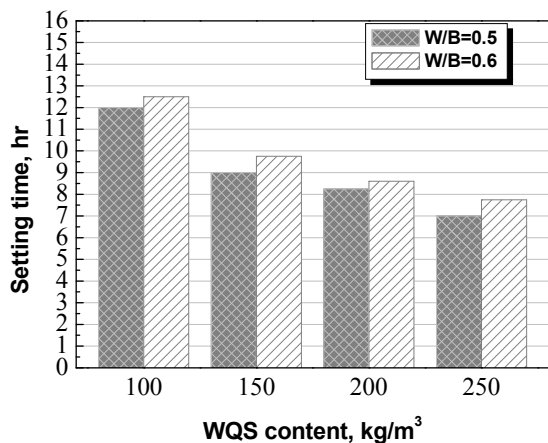


圖 10. 各 CLSM 配比達可續行施工強度(2.8 MPa)之凝結時間。

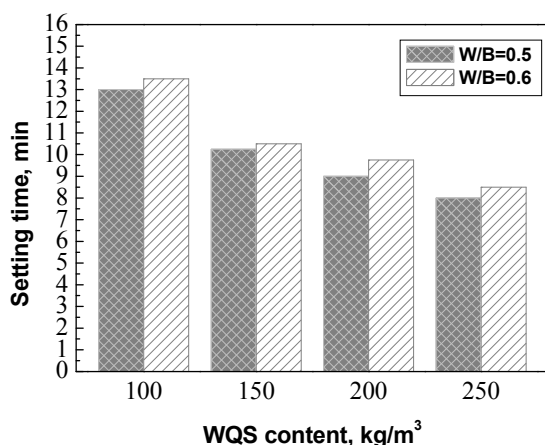


圖 11. 各 CLSM 配比達混凝土之初凝(3.4 MPa)時間。

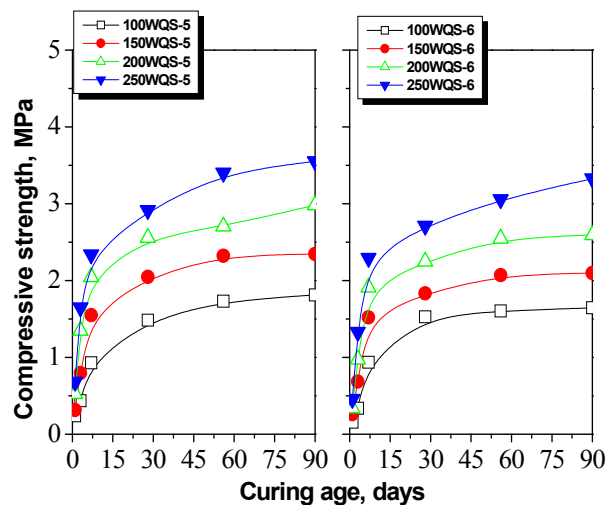


圖 12. 各 CLSM 配比抗壓強度。

3.4 脫硫渣與水淬爐石粉用於 CLSM 可行性之評估

對本研究所探討之 CLSM 各項工程性質進行評估，評估結果如表 6 所示。藉由 DS-C 的級配特性，可使 CLSM 達到高工作度，而改變 WQS 使用量及水膠比，可調整 28 天抗壓強度及凝結時間以供不同工程之需求使用，並且 90 天齡期之抗壓強度仍不超過 8.2MPa (1200 psi)，因此符合 CLSM 易再開挖之精神，因此脫硫渣與水淬爐石粉運用於 CLSM 極具可行性。

表 6. CLSM 之各項工程性質評估

工作度	● DS-C 小於 #4 (4.75mm) 之骨材顆粒高達 86% 以上，以足夠拌合水量配合高細粒料含量的鬆散漿體結構，輔以少量粗粒料重力作用而達到高流動性。 ● 本研究所拌製之 CLSM，坍度範圍值為 24~28 cm，而坍流度範圍值為 49.5~84.0 cm。
凝結時間	● 可續行施工強度之凝結時間介於 7.00~12.5 小時，可調整性範圍大，因此可改變 WQS 使用量及水膠比，以供不同工程 CLSM 之需求使用。
抗壓強度	● CLSM 的 28 天抗壓強度值介於 1.47~2.65 MPa，除可符合 CLSM 不超過 8.2MPa (1200 psi) 之要求外，並且 90 天齡期之抗壓強度仍不超過 1200 psi，因此符合 CLSM 易再開挖之精神。

四、結論

- (1)脫硫渣粉增加則會使天然骨材及脫硫渣骨材砂漿的標準流度用水量呈線性增加， R^2 值為 0.99~1。
- (2)脫硫渣骨材取代天然骨材後，抗壓強度隨水淬爐石粉用量減少而降低，顯示水淬爐石為主要強度來源，其含量多寡為決定抗壓強度高低之重要因素。
- (3)天然骨材產製之砂漿，28 天齡期前以配比 8:2 抗壓強度最高，28 天齡期後則以配比 9:1 抗壓強度最高；脫硫渣骨材則由於磨損率高達 40.33%，取代天然骨材後使抗壓強度銳減。
- (4)各 CLSM 坍度值可達 24~28 cm，且坍流度值可達 49.5~84.0 cm，皆可達非制式 CLSM 要求，並且隨水膠比及水淬爐石粉用量增加而提高。
- (5)各 CLSM 皆無法於 24 小時內達到混凝土終凝貫入強度(27.6 MPa)；各 CLSM 達 CLSM 可續行施工貫入強度(2.8 MPa)之凝結時間皆符合一般型 CLSM 之要求，並且凝結時間隨水膠比提高及水淬爐石粉使用量減少而增加。
- (6)各 CLSM 之 28 天抗壓強度值皆可達非制式 CLSM 之要求，並且 90 天強度仍低於 28 天抗壓強度要求，因此符合 CLSM 易再開挖之精神。
- (7)綜合評估後，本研究所產製 CLSM 之工程性質皆符合內政部營建署規定 CLSM 之各項規定，並可供不同工程之需求使用，因此極具可行性。

誌謝

本文承行政院國科會提供經費補助(計畫編號 95-2622-E-151-012-CC3)，特此誌謝。

參考文獻

- [1] Roy, D. M., "Alkali-Activated Cements: Opportunities and Challenges," Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 2, pp. 249-254, 1999.
- [2] Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., "Alkali-activated Slag Cement and Concrete: a Review of Properties and Problems," Advances in Cement Research, Vol. 7, No. 27, pp. 93-102, 1995.
- [3] Watanabe, A., Idemitsu, T., and Takayama, S., "Study on Slag Cement Concrete," Journal of the Society of Materials Science, Vol. 29, No. 3, pp. 253-259, 1980.
- [4] 岳林海，賈志剛，金達萊，鄭遺凡，"鎂離子存在下乙醇-水混合溶液中碳酸鈣結晶行為的研究"，化學學報，第 64 卷，第 7 期，第 623-628 頁，2006。
- [5] Chen, Y. Z., Pu, X. C., Yang, C. H. and Ding, Q. J., "Alkali Aggregate Reaction in Alkali Slag Cement Mortars," Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science, Vol. 17, No. 3, pp. 60-62, 2002.
- [6] Bakharev, T., Sanjayan, J. G., and Cheng, Y. B., "Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 2, pp. 211-216, 2002.
- [7] Zivica, V., "Effects of Type and Dosage of Alkaline Activator and Temperature on the Properties of Alkali-Activated Slag Mixtures," Construction and Building Materials, Vol. 21, No. 7, pp. 1463-1469, 2007.
- [8] Lothenbach, B., and Gruskovnjak, A., "Hydration of Alkali-Activated Slag: Thermodynamic Modeling," Advances in Cement Research, Vol. 19, No. 2, pp. 81-92, 2007.