



# 鋼鐵爐渣 應用為 水泥生料 的實踐

鄭瑞濱 / 潤泰精密材料股份有限公司創新研發中心 副總經理

江世哲 / 潤泰精密材料股份有限公司創新研發中心 協理

鋼爐渣是在 1,500°C ~ 1,700°C 高溫下形成，冷卻後，液態變成固態塊狀。一般為深灰和深褐色，主要有鈣、鐵、鎂、矽、鋁等氧化物組成。主要礦物相有矽酸三鈣、矽酸二鈣、鐵鋁酸鈣等。但鋼爐渣裡面有生產水泥熟料所需的主要元素鐵鋁鈣鎂矽，其鐵含量與鐵石尾砂含量相當。鋼爐渣中礦物相也同矽酸鹽水泥熟料相似，作為原材料代替生產熟料是為良好選擇。

依據本公司導入實踐的經驗，鋼鐵爐渣經過磨粉、均化分析及鍛燒處理後，性質穩定，添加至水泥生料中當作原料，亦不影響其原本性質；將鋼鐵爐渣導入水泥廠為原料的替代，將原本事業廢棄物無處可去的現況找到一方法確實可行。

## 前言

煉鋼可依製程分為一貫作業煉鋼及電弧爐煉鋼形式，目前台灣一貫煉鋼系統僅有中鋼及中龍使用此種煉鋼方式，在流程中之高爐部份，所產生之爐渣稱為高爐石，高爐石為目前主要普遍加入混凝土中做為膠結材料，目前運用廣泛，流程中接下來的轉爐部分所生產的爐渣即為轉爐石，轉爐石目前由中聯資源公司負責處理及去化，另一方面，電弧爐煉鋼的領域，電弧爐煉鋼依經濟部頒發技術手冊所載，國內每家電弧爐煉鋼廠之製程不完全相同，但主要製程大致上是相似的，電弧爐煉鋼係利用高電壓情況下，高電流通過人造石墨電極時，交流三電極間產生高溫電弧（直流電極則於電極棒和爐底極間產生高溫電弧），高溫電弧則將廢鋼熔解，以達成熔煉鋼鐵之目的。電弧爐煉鋼在冶煉過程中，依其化學反應可分成三個階段，分別為熔解期、氧化期及還原期，流程如圖 1。電弧爐渣依產生的階段，又可分為氧化渣及還原渣，氧化渣含鐵量及硬度都較高，將氧化渣內之鐵份去除後為良好瀝青混凝土骨材，而還原渣因含有 f-MgO 及 f-CaO 性質較不穩定，活性較高，誤用後加至混凝土中易讓混凝土產生爆出突起現象。

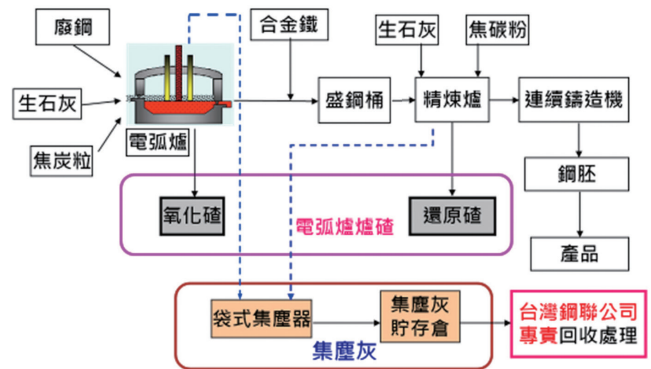


圖 1 電弧爐渣產生之流程圖

由於煉鋼爐渣係由多種礦物組成的固熔體，隨不同之化學成分而變化，其性質亦與化學成分有密切的關係。一般而言，煉鋼爐渣普遍具有下列性質。

- 密度：爐渣的密度一般約為 3.1 ~ 3.6 g/cm<sup>3</sup>，但由於電弧爐煉鋼爐渣含鐵量較高，因此其密度較高爐渣之密度為大，而密度較高相對較具耐磨性。
- 單位容積重量：爐渣之單位容積重量不但受其成分影響，還與粒度有關，一般而言，通過 80 目標準篩的渣粉，高爐石密度約為 1.74 g/cm<sup>3</sup>，電弧爐渣約為 1.62 g/cm<sup>3</sup> 左右。
- 易磨性：煉鋼爐渣由於結構較為緻密，故較一般砂

更具耐磨性。以易磨指數表示，標準砂為 1，高爐渣為 0.96，而轉爐渣及電弧爐煉鋼渣均為 0.7。

- 活性： $C_3S$ 、 $C_2S$  等為活性礦物，具有水硬膠凝性，因此  $C_3S$ 、 $C_2S$  含量高的高鹼度電弧爐煉鋼渣，可作為水泥生產原料或製造建材製品。
- 穩定性：煉鋼渣渣含游離氧化鈣 f-CaO、游離氧化鎂 f-MgO、 $C_3S$ 、 $C_2S$  等，這些組成在一定條件下都具有不穩定性。鹼度高的渣在緩緩冷卻時， $C_3S$  會在 1,250°C 到 1,100°C 時緩緩分解為  $C_2S$  和 f-CaO； $C_2S$  在 675°C 時  $\beta$ - $C_2S$  相會變為  $\gamma$ - $C_2S$  相，並且發生體積膨脹，其膨脹率達 10%。另外煉鋼渣渣吸水後，f-CaO 會消解為氫氧化鈣  $Ca(OH)_2$ ，體積將會膨脹 100 ~ 300%，f-MgO 會消解為氫氧化鎂  $Mg(OH)_2$ ，體積亦會膨脹約 77%，因此含 f-CaO、f-MgO 的常溫煉鋼渣渣乃是處於不穩定狀態的，只有當 f-CaO、f-MgO 消解完成或含量很少時，才會穩定。

## 煉鋼渣渣應用為水泥生料的文獻

鋼渣渣是在 1,500°C ~ 1,700°C 高溫下形成，冷卻後，液態變成固態塊狀。一般為深灰和深褐色，主要有鈣、鐵、鎂、矽、鋁等氧化物組成。主要礦物相有矽酸三鈣、矽酸二鈣、鐵鋁酸鈣等。但鋼渣渣裡面有生產水泥熟料所需的主要元素鐵鋁鈣鎂矽，其鐵含量與鐵石尾砂含量相當。鋼渣渣中礦物相也同矽酸鹽水泥熟料相似，作為原材料代替生產熟料是為良好選擇。

目前，世界各先進國家均對鋼渣渣進行回收與資源化，主要應用於道路面層與基底層級配材料、土木工程、水利工程、回填材料及肥料等，用途相當廣泛，其中做為水泥生料使用各國約占 4 ~ 6% [5]。

一般而言，鋼渣中 RO 相（二價金屬氧化物固溶體）含量約 20% ~ 30%，平均粒徑為 31 ~ 45  $\mu m$ ，晶粒邊緣 FeO/MgO 的莫耳比（mole ratio）大。鋼渣中的 RO 相晶粒比矽酸鹽礦物小，比鐵鋁酸鹽和 f-CaO 相大；RO 相是鋼渣中硬度、密度最大的礦物，在粗粒級和重組分中富集，氣力分級 RO 相在粗粉中含量是細粉的 2 倍以上。FeO/MgO 的莫耳比越高，RO 相硬度和密度越大，重力選別性越好。再者，鎂鐵尖晶石、RO 相和伴生礦物分別屬於強磁性、中磁性和非磁性礦物。磁選鋼渣粉精礦中 RO 相含量是尾礦的 5 倍以上，氧化焙燒鋼渣粉能提高其磁選性。此外，RO 相屬於導體礦物或中等導體礦物，伴生礦物屬於非導體礦物，電選精礦 RO 相含量是

尾礦的 3 倍以上。FeO/MgO 的莫耳比越高，RO 相的磁性越強、電導率越高，電選和磁選的選別性越好，這些都是鋼渣渣的特性 [6]。

早在二十世紀 1970 年，國外就有鋼渣渣代替石灰石質原料煅燒水泥熟料的報導；1980 年中期，有些單位做了一些工業性試驗及生產，由於配製生料中氧化鐵過高，使煅燒熟料存在一定困難；鋼渣渣物料就化學組成而言， $Fe_2O_3$  和 FeO 含量約為 28% ~ 30%。

文獻 [7] 以鋼渣渣替代鐵粉配製生料製備矽酸鹽水泥熟料，對比研究了不同石灰石飽和係數條件下，常規鐵粉配料和鋼渣渣配料的生料的易燒性，並採用 XRD 繞射和岩相分析研究了燒成熟料的礦物組成和微觀結構。結果表明：當煅燒溫度小於 1,350°C 時，鋼渣渣配料燒制的熟料樣品 f-CaO 含量略高於鐵粉配料的樣品；當煅燒溫度在 1,400°C 以上時，兩種配料生料的易燒性相當。和鐵粉配料相比，鋼渣渣配料沒有改變燒成熟料的礦物組成，而且使阿利特礦物（A 礦）晶粒發育更加完整、顆粒平均尺寸增大、分佈更加均勻。鋼渣渣能夠完全代替鐵粉配料燒制出礦物組成相同、礦物發育良好的優質熟料。

此外，文獻 [8] 針對鋼渣渣替代配料煅燒熟料進行研究工作，說明鋼渣渣是煉鋼過程中，為除去鐵中的硫、磷等有害元素，加入石灰石、螢石（ $CaF_2$ ）、矽鐵粉最後形成的廢渣，鋼渣渣的化學組分與矽酸鹽熟料成份較為接近，目前常使用的轉爐鋼渣，其主要礦物組成是  $C_2S$ 、 $C_3S$  及 RO 相，還有少量的  $C_4AF$ 、鐵酸鈣（ $C_2F$ ）和 f-CaO、 $Ca(OH)_2$  以及單質鐵等，具備代替硫酸渣進行生料配料的條件；鋼渣渣成份中的 FeO、 $P_2O_5$ ，CaO 在熟料煅燒中起到礦化和晶種作用， $Fe_2O_3$  的熔點為 1,560°C，而 FeO 的熔點為 1,420°C，因此能降低熟料的液相生成溫度和液相黏度，提高  $C_2S$  與 CaO 在液相中的擴散，促進  $C_3S$  晶體的發育成長， $P_2O_5$  含量較少，一般在 1.5%，摻入後不會影響水泥性能，而且  $P_2O_5$  是  $\beta$ - $C_2S$  的晶格穩定劑，能夠阻止  $\alpha$ - $C_2S$  在 675°C 時轉變為  $\gamma$ - $C_2S$ ，防止熟料粉化， $CaF_2$  是一種良好的礦化劑，CaO 不需分解直接參與固相反應，不僅能夠降低熟料的熱耗，同時還能誘導  $C_3S$  的形成，以及由於鋼渣渣是經過高溫煅燒後的產物，所以具有相對比較高的活性，使用鋼渣渣配料可以較明顯的提高生料的易燒性，從而可以大幅度提高生料配料 KH 值，進而提高熟料中  $C_3S$  含量。由於鋼渣渣中 MgO 含量較高，用鋼渣渣配料後，熟料中

MgO 的含量較原來高出 0.6% 左右，使熟料的液相量增多，物料的最低共熔點降低，所以使用鋼渣配料可以較明顯的提高生料的易燒性。

在鋼爐渣取代水泥之建議取代量方面，文獻 [6] 以鋼渣 10% 之摻量替代部分生料，經混合煨燒後，燒製出的熟料礦物與一般水泥熟料礦物一致，且熟料礦物水化發展良好，此替代成果，可降低生產成本，以及減少水泥工業對石灰石、鐵礦等天然原料之需求，同時鋼渣的摻入能夠降低碳酸鈣的分解溫度，減少 CO<sub>2</sub> 排放。文獻 [9] 指出，鋼渣中 CaO、SiO<sub>2</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相當豐富，3 者之總和達到 75%，其作用可做為水泥生料之鐵質校正料，建議鋼渣之添加量約 10% 以下較佳。P.E. Tsakiridis *et al.* [10] 以鋼爐渣 10.5% 之摻量替代部分生料，結果表示使用鋼爐渣不會影響水泥熟料之礦物性質，在物理及力學性質方面，亦對於鋼爐渣於水泥之生產不會造成負面影響。Remus Iacobescu *et al.* [11] 也曾以鋼爐渣替代作為生料原料使用，替代 5% 及 10% 的石灰石，與石灰石、黏土共同燒結為水泥熟料，結果亦顯示對水泥性質無負面影響。

## 替代生料的應用與應用測試

### 鋼鐵爐渣的原料替代

鋼鐵爐渣具有和矽酸鹽水泥熟料相似的化學組成和礦物組成，表 2 為不同種類鋼鐵爐渣化學成分表，

各式鋼鐵爐渣主要化學成分為 CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等，與卜特蘭水泥成分相似，因此，作為水泥和混凝土摻料極具發展潛力，然而，鋼鐵爐渣作為混凝土摻料使用時，存在鋼鐵爐渣體積穩定性問題，因此，鋼鐵爐渣作為水泥替代原料具有相當的潛力。

目前將廢棄物資源化作為水泥替代原料，在國外已有許多研究證明其可行性，且於水泥廠實際運作已行之多年，且有相當程度的生產成本降低與節能減碳功效。根據鏡田誠、鈴木英人 [7] 等人的研究指出水泥工業具有以下之特點：

- 水泥旋窯具有很高的燒結溫度可以分解幾乎所有的原料。
- 生產水泥最主要的原料石灰石是最被廣泛地運用於中和工業的汙染。
- 廢棄物的焚化灰渣組成被有效地用於水泥原料，因此將其用於水泥廠不會有二次污染的問題。
- 微量元素如重金屬等已經被安全地中和與固定於水泥熟料中。
- 水泥旋窯的生產能力大。

由於鋼鐵爐渣化學組成以 CaO 為主，約佔比為 40% ~ 45%，對於石灰石、黏土、矽礦、鐵渣等水泥組成原料而言，鋼鐵爐渣可作為替代石灰石原料使用。水泥製程流程圖如圖 4 所示，將石灰石、黏土、矽礦、鐵渣等原料經生料研磨後，水泥生料粉先於 850°C

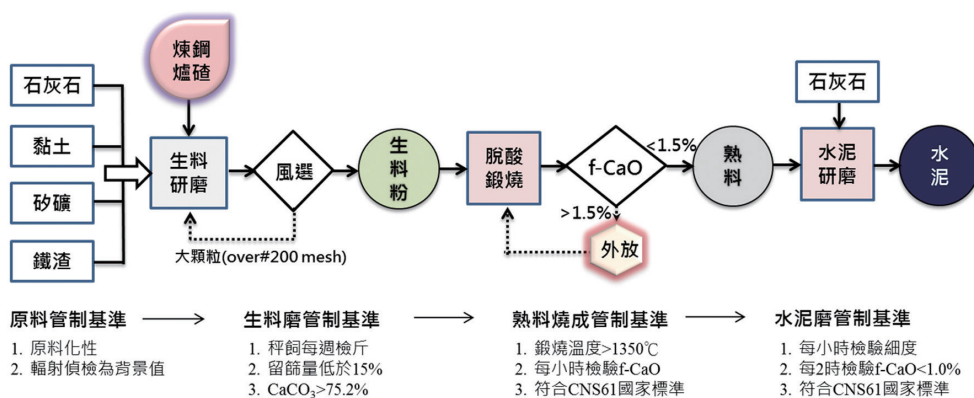


圖 2 水泥生產製造流程圖

表 2 各式鋼鐵爐渣化學組成成份表 [6]

項目	氧化物成分%										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI
氣冷高爐石	33.9	14.9	0.5	40.7	6.3	0.5	1.4	0.5	0.0	0.6	0.3
水淬高爐石	33.5	13.7	0.4	42.7	6.2	0.4	1.5	0.5	0.0	0.4	0.3
轉爐鋼爐渣	11.5	4.5	21.6	39.4	6.4	--	--	0.5	2.0	4.0	3.9
氧化渣	19.9	12.1	14.9	36.2	3.3	--	--	0.7	0.9	7.6	1.0
還原渣	20.2	10.3	9.8	41.2	10.3	--	--	0.4	0.6	1.8	1.2

~ 900°C 懸浮預熱機進行生料 CaCO<sub>3</sub> 脫酸作用，將脫酸作用產生之 CaO 於水泥旋窯內以約 1,400°C 高溫熔融液相燒結成矽酸三鈣 (C<sub>3</sub>S)、矽酸二鈣 (C<sub>2</sub>S)、鋁酸三鈣 (C<sub>3</sub>A)、與鋁鐵四鈣 (C<sub>4</sub>AF) 等水硬性礦物相之水泥熟料，如圖 3 所示。因此，當鋼鐵爐渣取代石灰石作為替代原料使用，存在於鋼鐵爐渣內的大量游離氧化鈣，於高溫熔融液相中亦能與 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 產生水泥礦物相燒結反應，可有效降低鋼鐵爐渣游離氧化鈣 (f-CaO)，依據 CNS 61 國家標準，熟料燒成管制基準以每小時管制熟料游離石灰含量，游離石灰含量大於 1.5% 需進行外放處理或回料與生料重新燒結處理。因此，高溫燒結作用不僅使鋼鐵爐渣進行安定化處理，更確保含有鋼鐵爐渣之熟料游離石灰含量符合 CNS 61 國家標準，此外亦能將存在於鋼鐵爐渣重金屬等微量元素，安全中和與固定於水泥熟料中，降低重金屬毒物溶出的可能性。

使用鋼鐵爐渣做用水泥替代原料相關文獻指出 [8]，由於鋼鐵爐渣大量游離氧化鈣無需經過脫酸吸熱反應，作為水泥替代原料具有低耗熱與低碳排等優點，且燃燒能力指數 (Burning ability index, BI) 試驗結果顯示，添加鋼鐵爐渣之水泥生料相對於未添加鋼鐵爐渣之控制組生料，具有較低殘留之游離氧化鈣 (f-CaO) 與較佳之水泥熟料燒結能力。圖 4 為水泥替代原料經高溫作用殘留之游離氧化鈣含量與燒結溫度關係圖 [9]，水泥熟料中游離氧化鈣含量隨著高溫燒結溫度增加而顯著降低，且添加廢磚粉與蛋殼等替代原料，於不同溫度燒結後，殘留之游離氧化鈣較未添加替代原料之控制組低，說明替代原料中之游離氧化鈣安定化的方法，可透過高溫燒結程序使材料中存在之游離氧化鈣降低，並符合國家標準

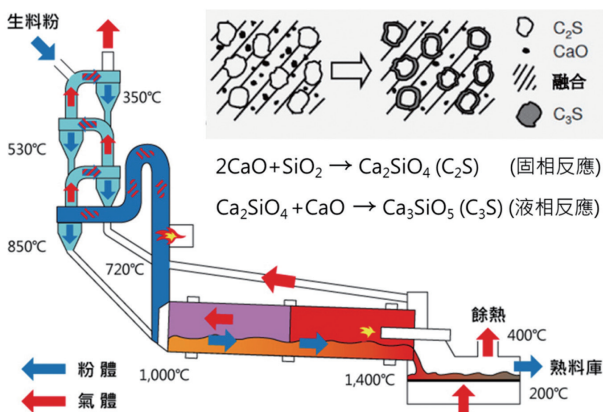


圖 3 水泥生料旋窯燒結示意圖

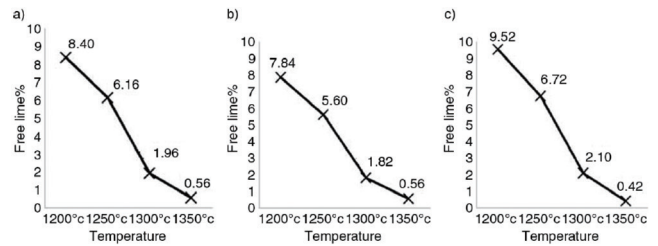


圖 4 水泥替代物料殘留游離氧化鈣與高溫燒結溫度關係 (a) 控制組生料；(b) 廢磚粉替代生料；(c) 蛋殼替代生料 [9]

值。因此，鋼鐵爐渣等廢棄物，進入水泥廠作為替代原料再利用方法，為降低游離氧化鈣所引發混凝土膨脹崩壞危害之最有效的方法。

### 替代生料的熱效應與水泥產品性質

以經濟部編號第 14 號的再利用管理辦法，電弧爐鋼鐵爐渣可用為水泥原料，為確認作為水泥生料的可行性，本計畫採用熱分析方法，進行評估。熱分析是研究物質在溫控條件下，發生的物理或化學變化與溫度之關係，常用的有熱機械分析法 (Thermomechanical Analysis, TMA) 及差示掃描量熱法 (Differential Scanning Calorimetry, DSC)。TMA 方法主要為量測不同之材料於溫度變化上之物性變化，物性變化包含膨脹收縮、軟化現象及交聯硬化等方式呈現。TMA 之量測係將材料樣品上施加某一固定力量，並藉由可溫度控制之爐體，於溫度增加或減少時，其材料之膨脹或收縮現象，皆可藉由 TMA 來量測到探針之變化情形，以獲得膨脹係數或收縮係數，裝置如圖 5(a) 所示。DSC 和 TMA 儀器裝置相似，如圖 5(b)。就一般水泥生料燒成反應透過兩種熱分析結果，如圖 6 所示，兩種分析方法之反應曲線，可大致分為四個階段，第 1 階段發生在煨燒溫度 700°C ~ 850°C 之間，為預熱脫酸階段、第 2 階段發生在 1,200°C ~ 1,300°C 之間，為 C<sub>2</sub>S 生成階段、第 3 階段發生在 1,250°C ~ 1,350°C 之間，為液相產生階段、第 4 階段則發生在大於 1,250°C 時，為 C<sub>3</sub>S 生成與相變階段。

本計畫依據配料分析所得成果，將兩種配料方案之各組水泥樣品，以不同的熱分析方法進行分析，採用 TMA 分析方法，其分析結果如圖 7 所示。由以上結果可知，使用鋼鐵爐渣取代部分水泥生料是具有潛力及可行性之方法，且經過高溫煨燒後，鋼鐵爐渣最令人憂心之活性造成之爆出突起之疑慮已消除，且亦可符合水泥生料之需求。



(b) DSC 分析儀器 (a) TMA 分析儀器

圖 5 熱分析儀器

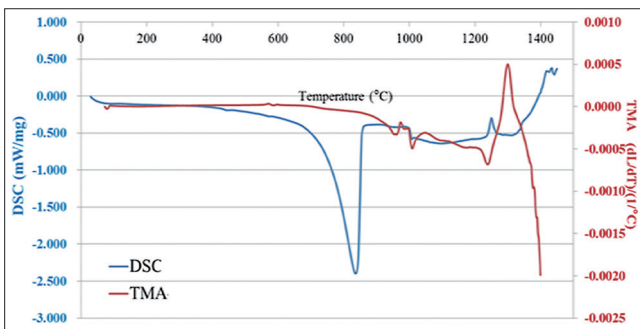


圖 6 一般水泥 TMA 及 DSC 之熱分析結果

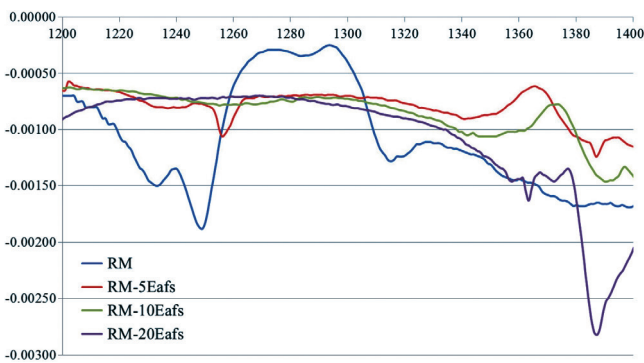


圖 7 採直接配料設計法之水泥原樣熱分析結果 (溫度 >1150°C)

圖 8 為鋼鐵爐渣替代部分生料燒成熟料，研磨成水泥的水泥強度發展趨勢，添加鋼鐵爐渣與否，根本不影響水泥的品質；表 1 為以鋼鐵爐渣為生料的水泥砂漿棒熱壓膨脹百分比，如表 3 所示，結果亦顯示參加部分鋼鐵爐渣為生料燒結而成的熟料製造的水泥，還是一樣的水泥！

表 3 鋼鐵爐渣為生料的水泥砂漿棒熱壓膨脹百分比

	水泥砂漿棒熱壓膨脹 (%)
control set	- 0.018
1%	- 0.017
3%	- 0.011
5%	- 0.022

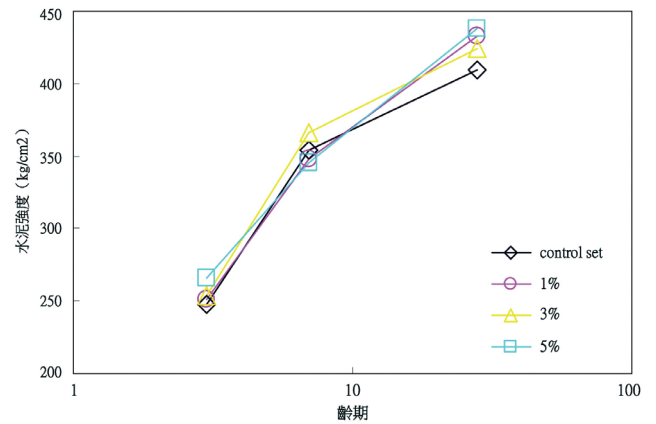


圖 8 鋼鐵爐渣為生料的水泥強度發展狀況

### 導入應用的作法

本試驗計畫，化性建立之鋼鐵爐渣取樣頻率為每天乙次（每週五天），並且連續 9 個月進行取樣，總取樣次數預計約為 156 次。鋼鐵爐渣實際儲放情形如圖 9，由圖中顯示鋼鐵爐渣為粉狀，但其中涵蓋部份金屬雜質等。本取樣準則係取四處之鋼鐵爐渣，並遵守均化取樣之方式來進行，使其取樣之鋼鐵爐渣性質平均並具有代表性，取樣之情況如圖 10。

鋼鐵爐渣取樣後開始進行 XRF (X-ray Fluorescence Spectrometer, 簡稱：XRF) 化性分析，並由初步試驗結果得知鋼鐵爐渣主要含有 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 及 MgO 等化學含量。由於 X 射線螢光光譜儀可量測出



圖 9 鋼鐵爐渣實際儲放情形



圖 10 鋼鐵爐渣取料情形

表 4 鋼鐵爐渣 XRF 化性含量初步結果之分析

鋼鐵爐渣 cement		SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
第一階段	最大值	29.46	6.35	4.74	113.26	40.24	1.25
	最小值	0.00	2.67	0.57	59.30	2.43	0.00
	平均值	15.88	4.03	2.07	71.63	5.14	0.67
	標準差	9.91	0.68	1.02	12.02	6.28	0.35
	變異係數	62.42	16.92	49.16	16.78	122.20	52.59
第二階段	最大值	27.85	12.97	10.13	52.76	44.93	3.69
	最小值	20.69	3.91	1.82	30.21	3.28	0.00
	平均值	24.77	8.57	3.29	45.75	6.87	0.79
	標準差	1.32	1.79	1.27	3.92	4.93	0.97
	變異係數	5.34	20.84	38.78	8.57	71.74	123.18

鋼鐵爐渣之各元素含量，再將量測出之元素依照與其氧化物之間的關係來計算氧化物含量，其氧化物之實際含量應再以人工濕式分析來確定，並將人工濕式分析之結果來回饋校正 X 射線螢光光譜儀。

第一階段取樣分析係將第一階段中取鋼鐵爐渣之氧化物 (SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 及 MgO 等) 最高及最低含量之當日樣本，再以人工濕式分析來確認其實際化學含量，並將人工濕式分析之試驗結果回饋至 XRF 光譜分析儀中以建立鋼鐵爐渣檢量線，以修正 XRF 光譜分析儀之化學含量檢量標準，以使第二階段之 XRF 試驗結果更加精確。兩階段之化學性質穩定性如表 4 所示，由表中得知經人工濕式分析後回饋之鋼鐵爐渣化學含量，其 SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 及 MgO 之變異係數皆有降低之情形，可明顯了解鋼鐵爐渣化學性質具有不穩定性，其化學性質不穩定性之產生受電弧爐煉鋼廠之製程所影響；鋼鐵爐渣的均化設計為水泥廠應用鋼鐵爐渣為原料的關鍵技術所在。

## 結論

鋼鐵爐渣經過磨粉、均化分析及鍛燒處理後，性質穩定，可添加至水泥生料中當作原料，亦不影響其原本性質，最佳去化之方向及為導入水泥廠做為生料使用。本研究試驗中，使用鋼鐵爐渣所產出之水泥經過分析後也證實不影響水泥原本功效；將鋼鐵爐渣導入水泥廠之成功，將原本事業廢棄物無處可去的現況找到一方法，確實可行。

## 參考文獻

1. 廖啟州、黃偉慶、蘇茂豐，「廢鑄砂與電弧爐渣混合料取代瀝青混凝土粒料成效探討」，工業污染防治季刊，第 103 期，第 23-36 頁 (2007)。
2. 蘇茂豐，「電弧爐渣資源化歷程」，綠基會通訊，第 11-14 頁 (2010)。
3. 王韡菡、劉志堅、李釗、許書王，「爐渣作為混凝土粒料的問題與策略」，技師期刊，第 62 期，第 21-31 頁 (2013)。
4. Geiseler, J., 「冶金渣 - 創造美好未來的材料」，冶金渣處理與利用國際研討會，中國北京，第 1-8 頁 (1999)。
5. 王濤，「電爐鋼渣應用技術研究」，冶金渣處理與利用國際研討會，中國北京，第 242-255 頁 (1999)。
6. 許伯良，「轉爐石之處理與應用」，中聯資源公司 (2009)。
7. 鏡田誠、鈴木英人，「Summary of the technical seminar for Taiwan cement manufacturers' association on Waste and Cement industry in Japan」，Taiheiyō cement corporation and Taiheiyō engineering corporation, (2003)。
8. Bernardo, G., Marocoli, M., Nobili, M., Telesca, A., and Valenti, G. L., 「The use of oil well-derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production」, Resource, Conservation and Recycling, 52, pp. 95-102 (2007)。
9. Ghorab, H. Y., Rizk, M., Ibrahim, B., and Allam, M. M., 「High belite cement from alternative raw materials」, Materials and Construction, (64) 314, (2014)。
10. P.E. Tsakiridis, G.D. Papadimitriou, S. Tsivilis, and C. Koroneos., Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. Journal of Hazardous Materials, Vol. 152, pp 805-811 (2008)。
11. Remus Iacobescu, Dimitra Koumpouri, Yiannis Pontikes, Rami Şaban, George Angelopoulos, 「Utilization of EAF metallurgical slag in green belite cement」, U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 73, pp. 187-194 (2011)。
12. Alexander S. Brand, Jeffery R. Roesler, Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties, Cement and Concrete Composites, Vol. 60, pp. 1-9 (2015)。