

## 專題演講

演講者：鄭大偉教授

演講題目：「轉爐石安定化新技術及其  
高值化循環製程開發」



# 大漢技術學院 2019資源與環境學術研討會

## 轉爐石安定化新技術及其高值化 循環製程開發

鄭大偉 教授  
國立臺北科技大學  
資源工程研究所

National Taipei University of Technology

Institute of Mineral Resources Engineering

### 轉爐石 - 背景資料

- 轉爐石為一貫煉鋼作業下之副產品，具有**高硬度、高比重、高強度及低磨損率**等優秀之工程性質。
- 轉爐石作為逐漸匱乏之**天然骨材替代品**相當具有潛力及可行性。
- 根據統計，**台灣地區轉爐石年產量約150萬公噸**。
- 龐大之產量使轉爐石急需一資源再生利用途徑之急迫性。



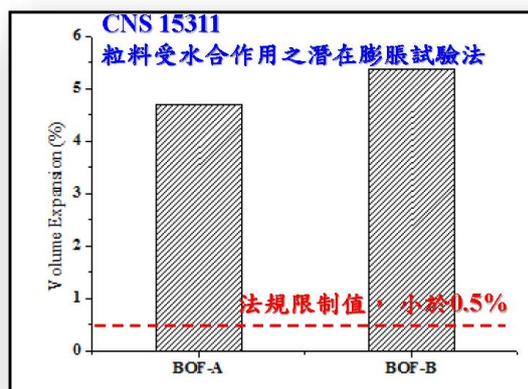
# 轉爐石 - 基本分析

## 轉爐石之化學成分

地區	化學組成(%)								
	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	ZnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
台灣	39.3	8.56	7.75	0.98	38.06	4.24	0.03	-	0.02
印度	46.5	7.4	13.8	6.6	16.7	-	-	-	-
法國	47.5	6.3	11.8	2.0	22.6	1.9	-	-	-
美國	39.2	9.2	12.8	4.5	26.4	5.2	-	1.5	0.1
日本	40.53	4.61	12.35	3.73	13.83	3.37	-	-	-

【Shen, 2009】 【Islam, 2011】 【Mahieux, 2009】 【Proctor, 2000】 【Liang, 2007】

## 長期風化之轉爐石基水泥砂漿試體

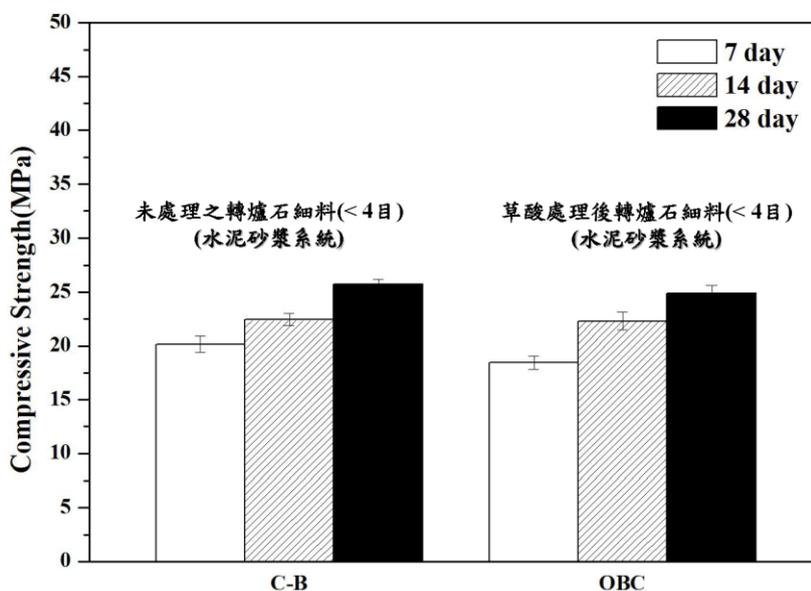


## 全球商業化轉爐石處理方法比較

處理方法	殘餘膨脹率 (%)		處理渣 f-CaO (%)	高壓蒸氣釜	熱水膨脹率 (%)
	處理渣	原渣		CNS 1258	ASTM D 4792
常壓蒸氣養生 (日本新日鐵住金)	16~38	>18~40	4~10	崩解	2.7~17.5
高壓蒸氣養生 (日本新日鐵住金)	15~35	>18~40	3~9	崩解	3~6
滾筒法 (中國大陸寶鋼)	5~14	>30	2~9	崩解	2~14
悶罐 (中國大陸中冶集團)	10~30	>18~40	10	崩解	5~15
水淬 (中國大陸唐山華科)	5~15	>18~40	7	崩解	3~14
熱渣改質 (德國 ThyssenKrupper)	0.01-0.46 (坩堝實驗)	20	~0	不崩解	<0.2

【李育成等人, 2014】

## 轉爐石-水泥砂漿系統



5

## 轉爐石-水泥砂漿系統

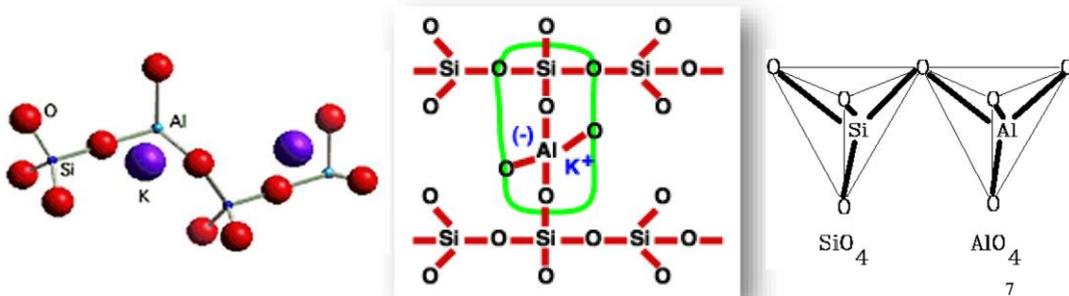
	高壓蒸煮前	高壓蒸煮後
未處理之轉爐石細料 (<4目) (水泥砂漿系統)		
草酸處理後轉爐石細料 (<4目) (水泥砂漿系統)		

6

# 無機聚合技術

## Geopolymer Technology

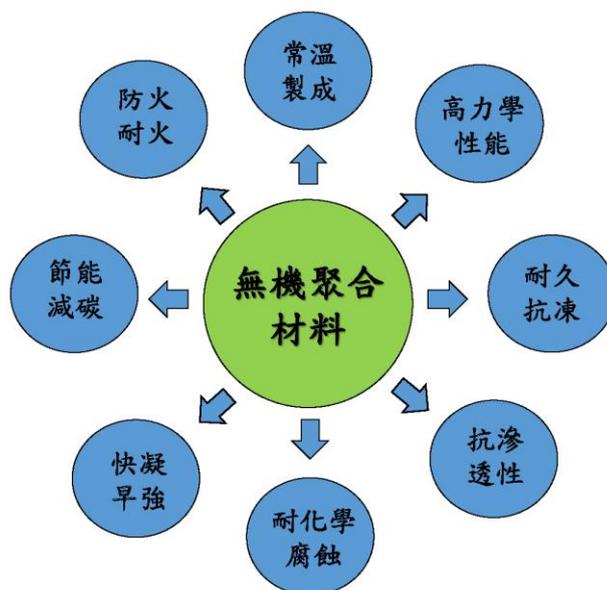
- 無機聚合技術係利用鹼性配方液溶出礦物或廢棄物表面之矽、鋁離子，經聚合、脫水、硬化後形成Si-O-Al短程有序、長程無序之三維結構，屬非晶質(Amorphous)或半晶質(semi-crystalline)之物質，鍵結以共價鍵為主。
- 無機聚合技術製程簡單，不需經高溫處理，室溫下即可製備，且聚合過程中不會排放出二氧化碳，且具隔熱性、低熱傳導低及高早強度等優異之特性，應用層面廣泛，為一深具潛力之工程材料。



## 無機聚合材料基本物理化學性質

- 有類似Zeolite之架狀結構。
- 為一Amorphous或Semi-Crystalline材料。
- 矽鋁礦物與鹼性溶液反應後形成膠體，經過脫水後，將硬化形成無機聚合材料
- 無機聚合物之性質取決於，礦物於鹼性溶液中之溶解度。
- 鍵結形式為一化學鍵結。
- 具有早強強度、化學抗蝕性防火耐燃等特性

## 無機聚合材料具有優異的性能



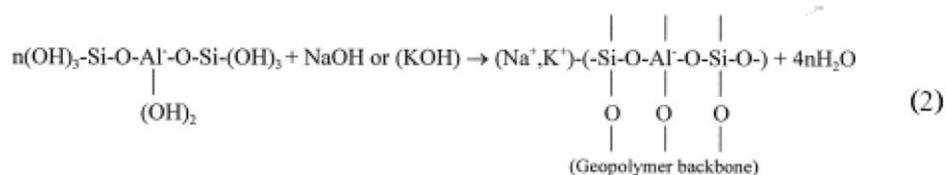
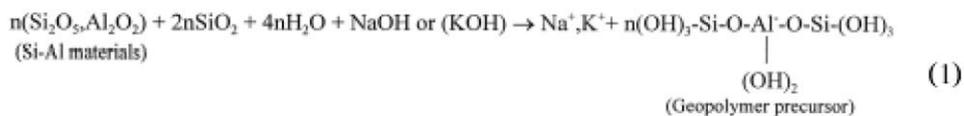
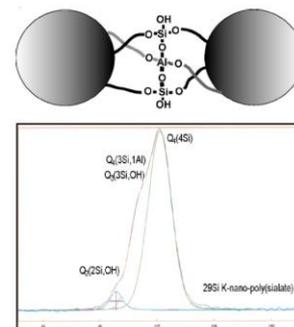
9

## 無機聚合材料 - 製備流程



10

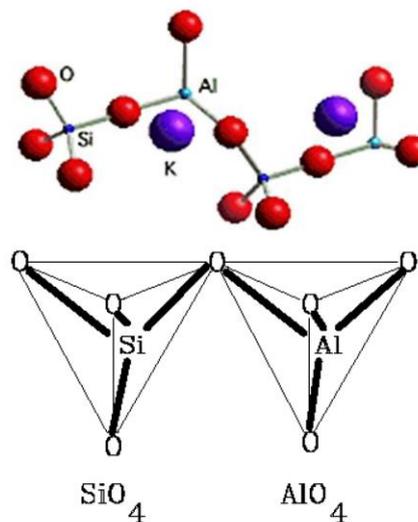
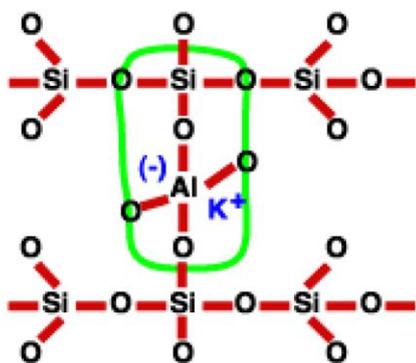
# 無機聚合材料之化學反應



11

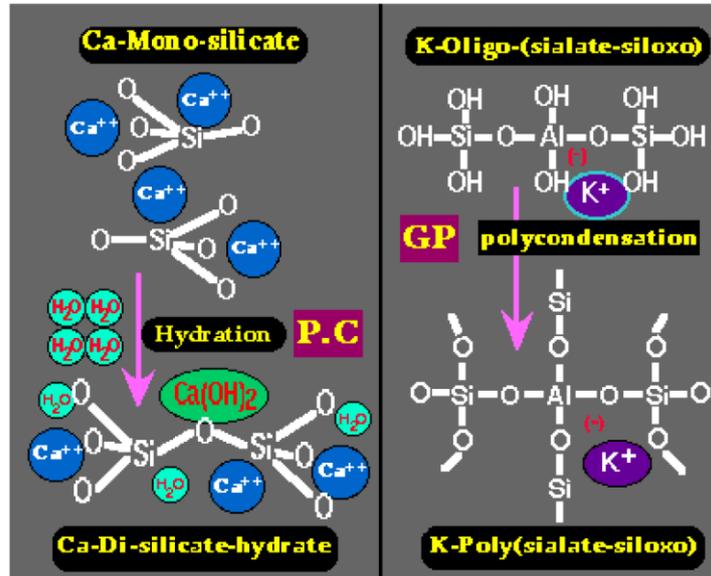
# 無機聚合材料-基本架構

分子式： $M_n \{ -(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2 \}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$



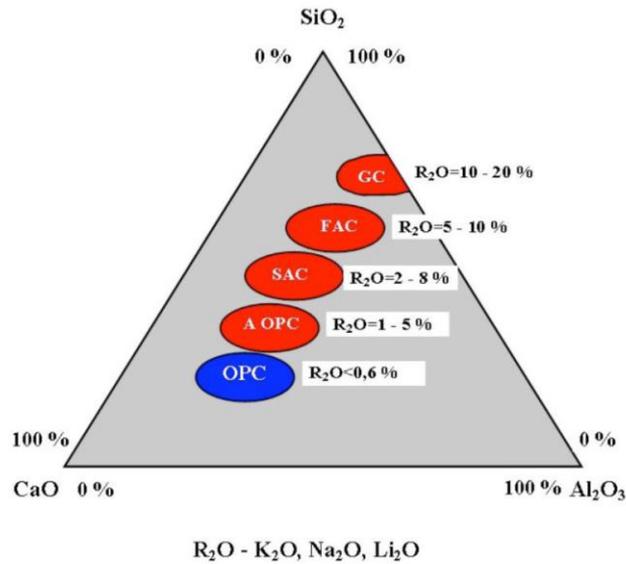
12

## 水泥與無機聚合材料之化學反應比較



13

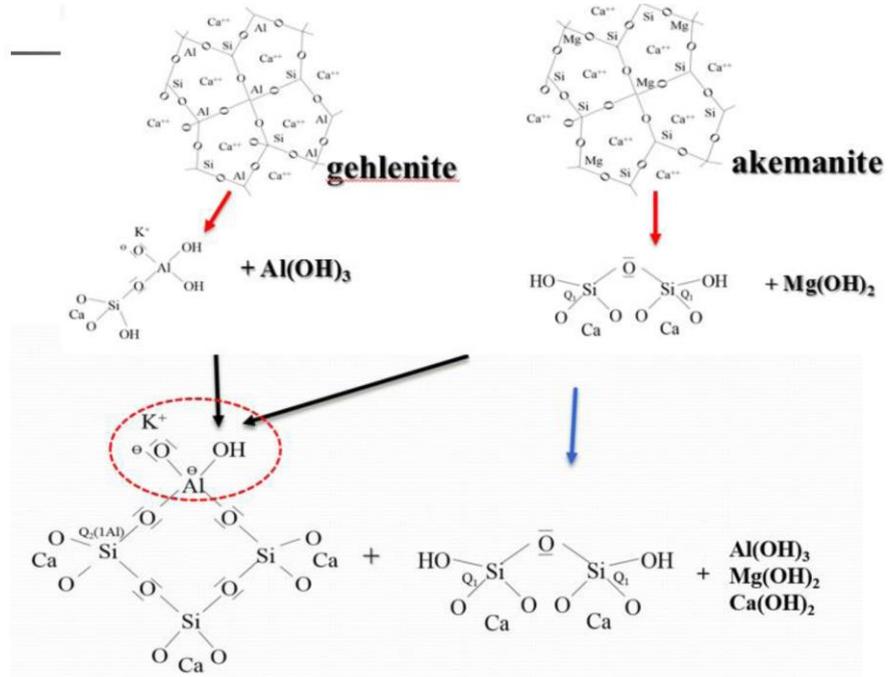
## 無機聚合材料與鹼激發水泥



Pavel Krivenko, 2002, Alialine cement: From research to application, Proceedings of the Int. Conf. Geopolymer 28th-29th October 2002

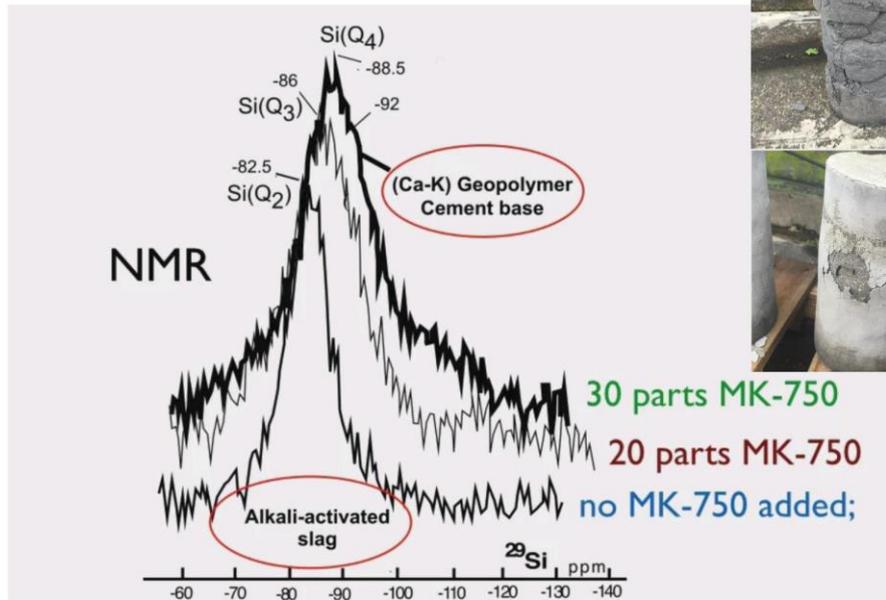
14

## 爐石粉鹼激發後結構的變化



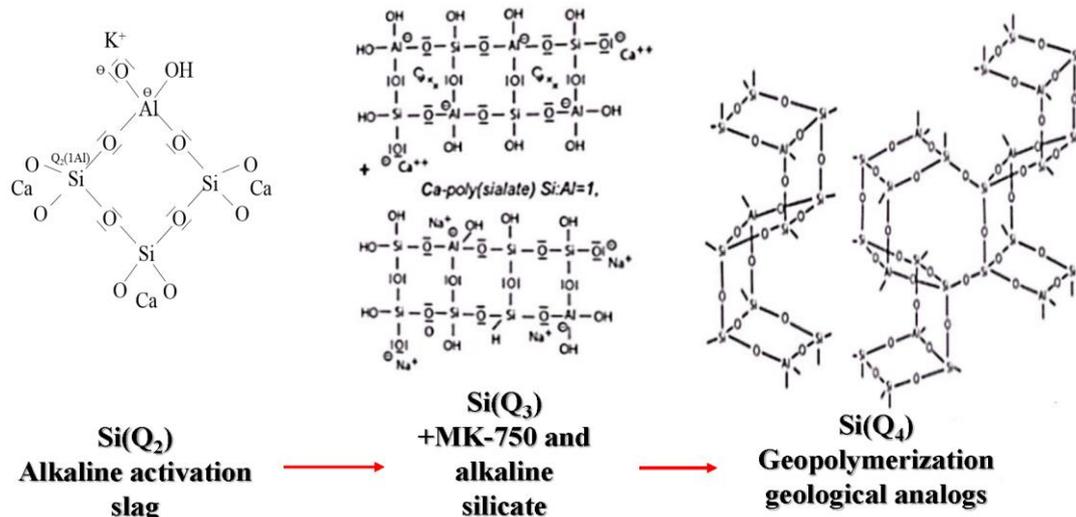
15

## 爐石粉鹼激發與無機聚合材料的 $^{29}\text{Si}$ NMR 分析



16

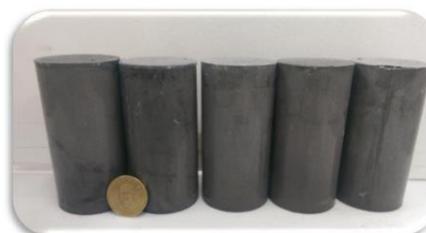
## 鹼激發爐石粉添加變高嶺土後的結構變化分析



17

## 無機聚合材料 - 原料來源

- 變高嶺土
- 爐石粉
- 燃煤飛灰
- 富含矽或鋁之工業產物
- 天然土壤
- 各類廢棄物



18

## 無機聚合技術的應用

- 建築業
- 混凝土補強
- 電子產品隔熱
- 陶瓷
- 化學工業
- 隧道工程
- 裝潢材料
- 藝術及裝飾
- 廢棄物再生利用

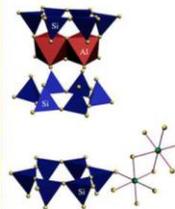


19

## 無機聚合技術的應用

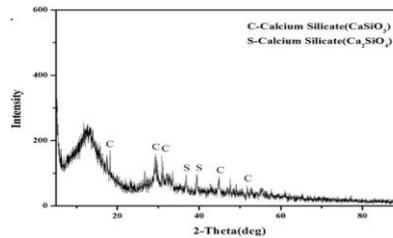
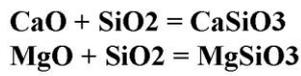
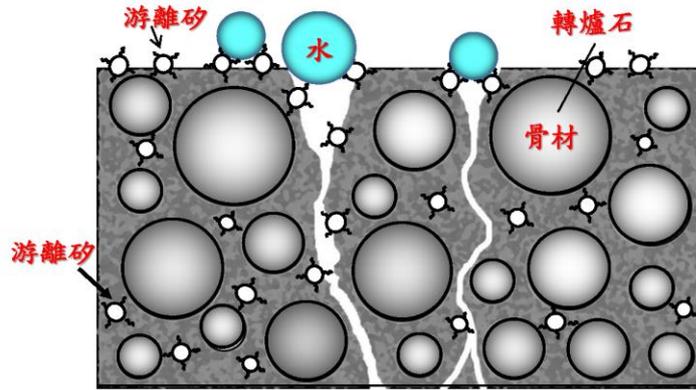
### ■ 廢棄物處理及再生利用

- 固化/穩定化有害廢棄物
- 吸附重金屬
- 處理放射性物質
- 資源化各類廢棄物



20

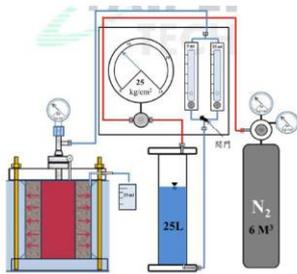
## 抑制轉爐石的膨脹的新概念



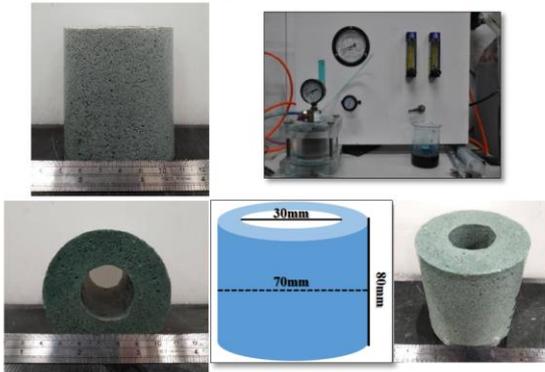
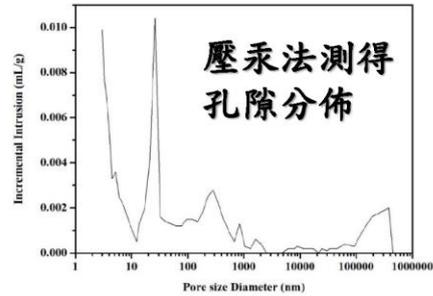
高壓蒸煮後試體XRD分析

21

## 無機聚合砂漿性質



滲透係數



卜特蘭砂漿			
養護齡期	kw(m/s)	孔隙率 (%)	抗壓強度(MPa)
7	1.98E-09	-	13.8
14	3.33E-10	-	16.1
28	6.02E-11	18%	17
大理石基無機聚合砂漿			
養護齡期	kw(m/s)	孔隙率 (%)	抗壓強度(MPa)
7	1.87E-11	-	19.33
14	3.99E-12	-	17.91
28	<E-13	16%	39.27

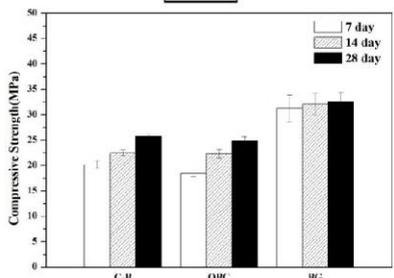
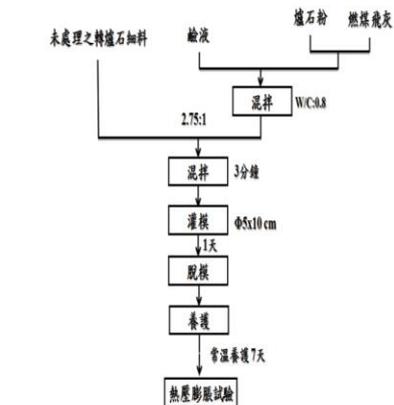
# CNS 1258 卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法

$215.7 \pm 1.7 \text{ }^\circ\text{C}$  ,  $20.8 \pm 0.7 \text{ kgf/cm}^2$  , 3hr



23

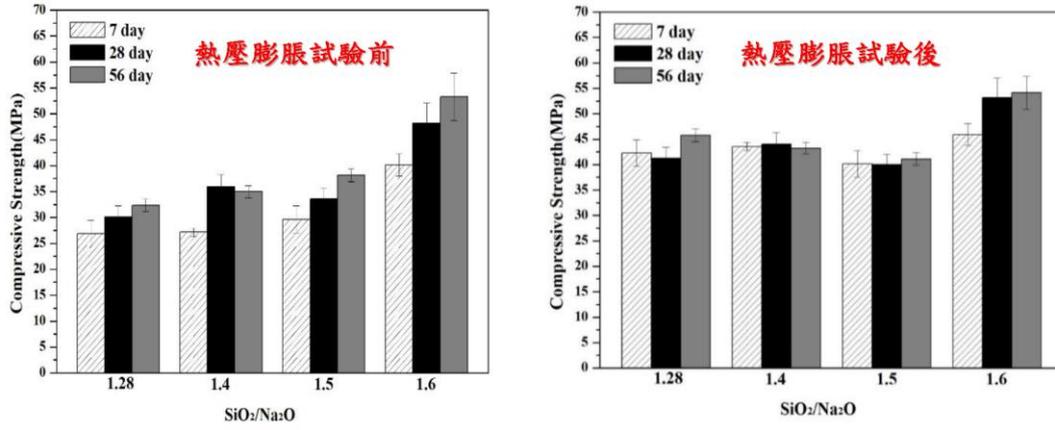
# 轉爐石-無機聚合砂漿系統



	高壓蒸煮前	高壓蒸煮後
未處理之轉爐石細料(<4目) (無機聚合砂漿系統) 體積變化率0.35%		
未處理之轉爐石細料(<4目) (無機聚合砂漿系統) 體積變化率0.26%		

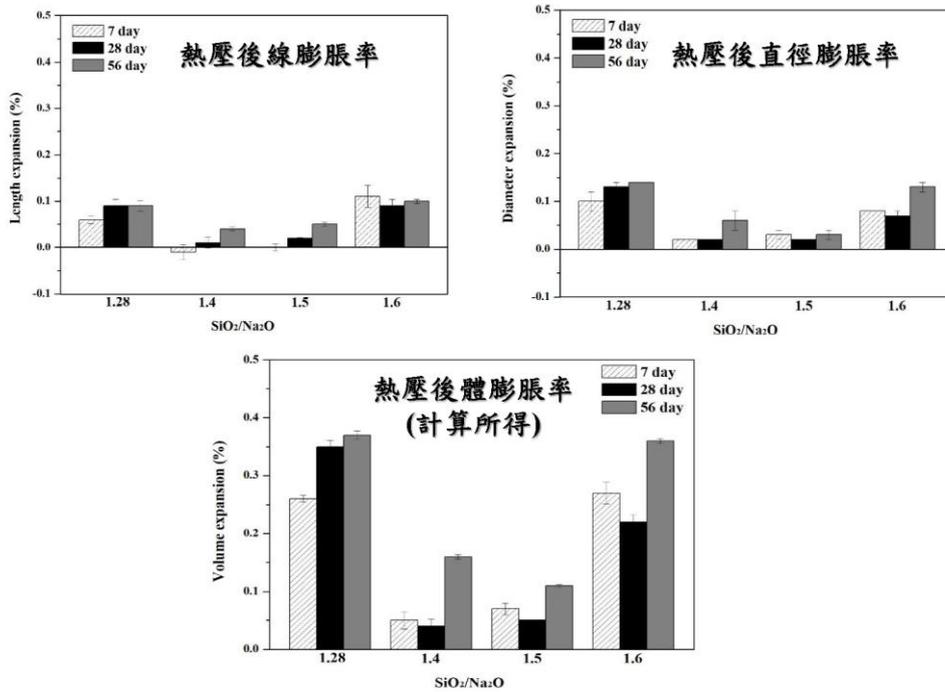
24

## 鹼液SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O配比對於無機聚合轉爐石砂漿性質的影響

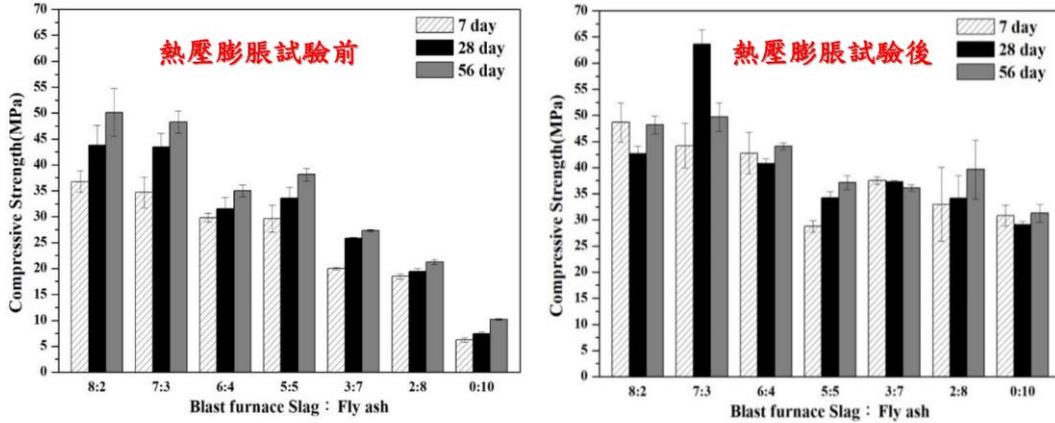


25

## 改變鹼液配比(SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O)之無機聚合轉爐石砂漿經熱壓後膨脹變化率之結果

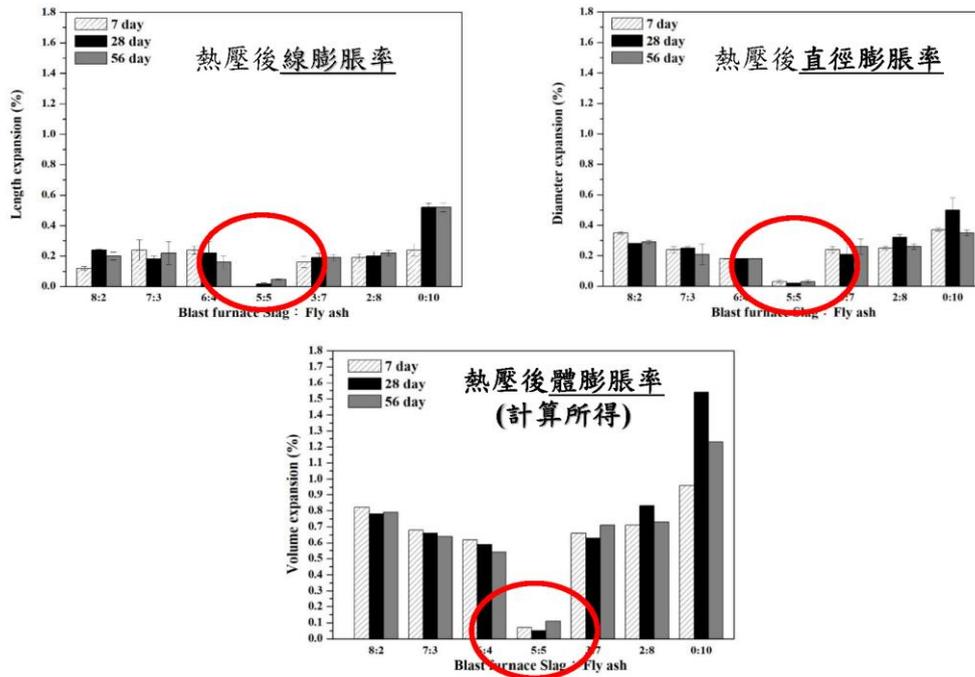


## 爐石粉：燃煤飛灰比例對於無機聚合轉爐石砂漿性質的影響



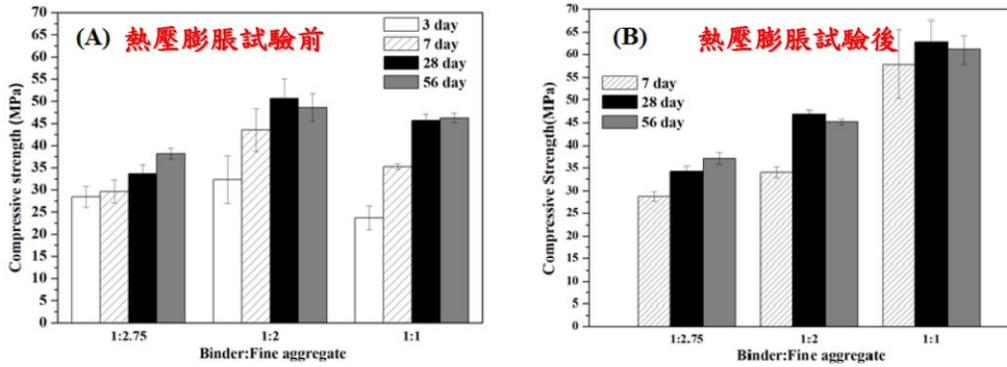
27

## 粉體比例變化對無機聚合轉爐石砂漿熱壓後體積變化率的影響



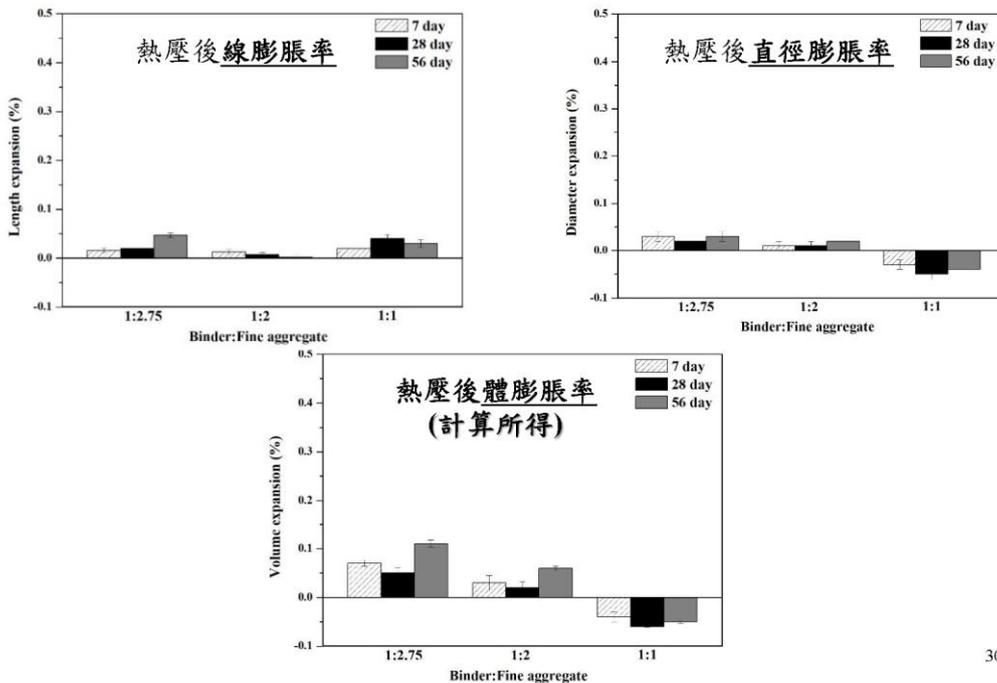
28

## 轉爐石添加量(灰砂比)對於無機聚合轉爐石砂漿抗壓強度的影響



29

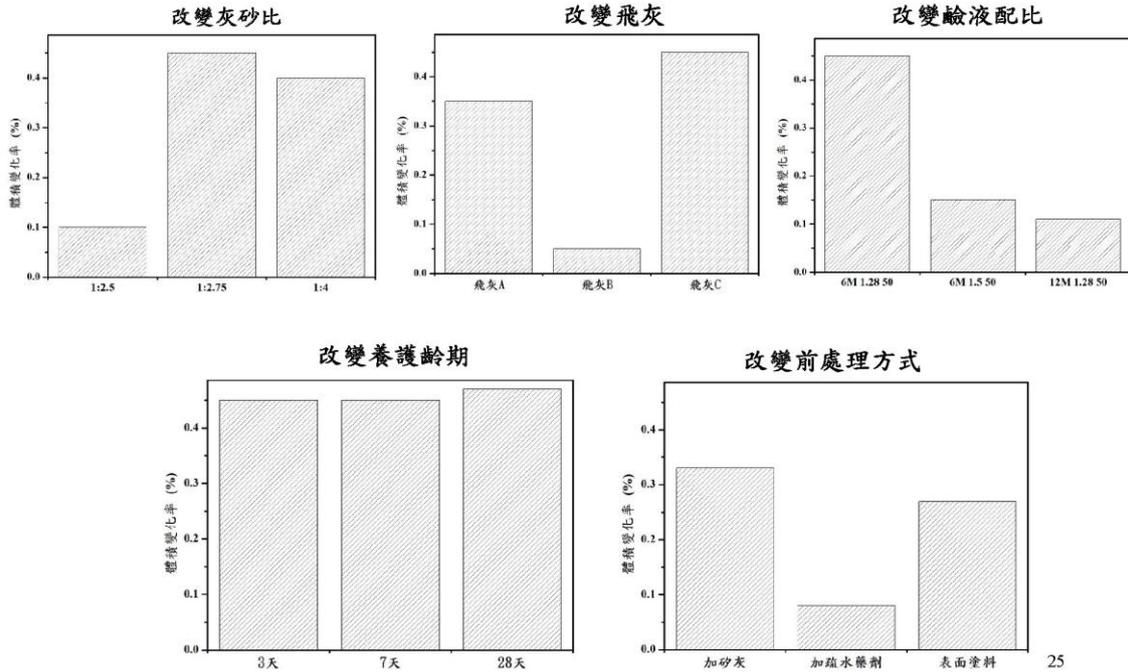
## 轉爐石添加量(灰砂比)之無機聚合轉爐石砂漿經熱壓後直徑變化率之結果



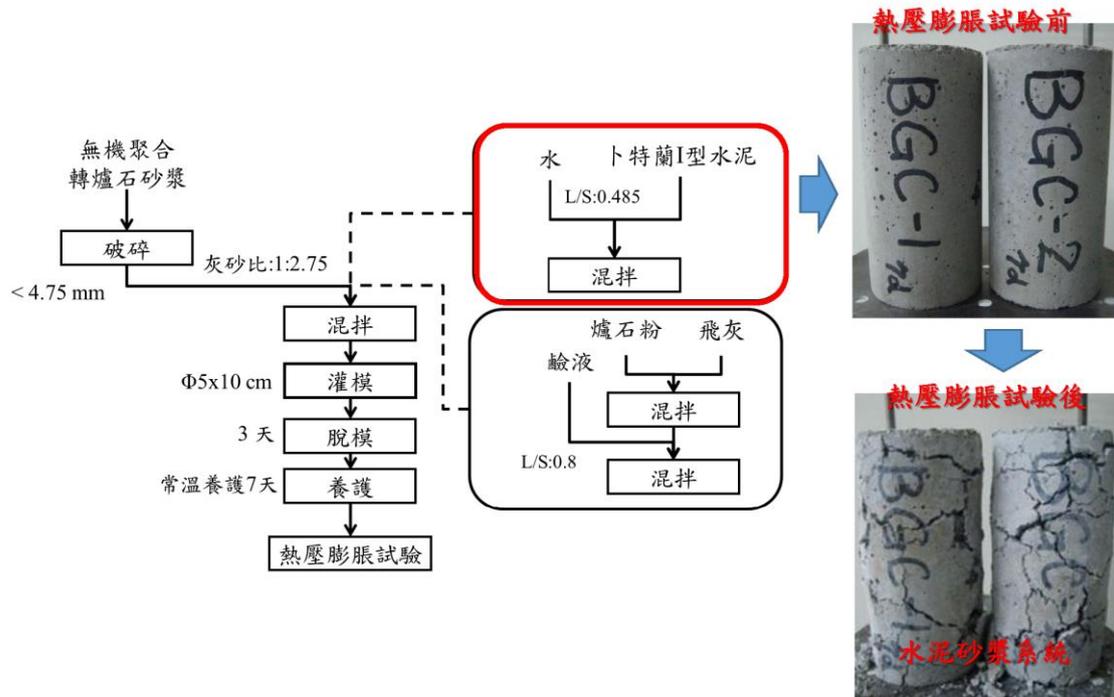
30

# 無機聚合轉爐石砂漿系統體積變化率

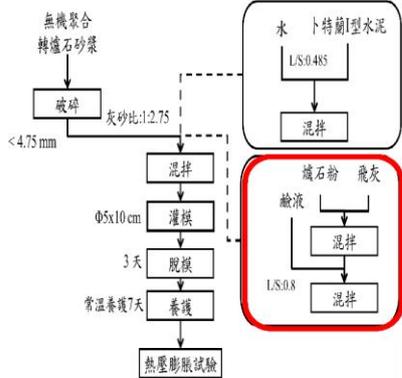
原始轉爐石細料(<4目)(無機聚合砂漿系統高壓釜試驗後)



# 再生骨材製備卜特蘭水泥砂漿



## 無機聚合轉爐石砂漿再生骨材(循環使用)



	高壓蒸煮前	CNS1258 高壓蒸煮後				
原始轉爐石細料(<4目) (無機聚合砂漿系統)						
Age=7 d (2/10)	H-1	H-2	H-3	D-4	D-5	
BGG-1 試驗前	100.77	100.72	100.72	50.00	49.94	
BGG-1 試驗後	100.50	100.44	100.44	49.78	49.72	
變化率 (%)	-0.27	-0.28	-0.28	-0.44	-0.44	
平均H變化率 (%)	-0.27					
平均D變化率 (%)				-0.44		
試驗前體積	197575.04					
試驗後體積	195304.59					
體積變化率 (%)	-1.15					

33

## 減碳效益評估-1

### 傳統卜特蘭水泥碳排放係數

- 2016年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告

項目	排放係數	煅燒、燃料	總計
水泥粉		0.5203噸CO <sub>2</sub> /噸熟料	0.5203噸CO <sub>2</sub> /噸水泥粉

- 產品碳足跡計算服務平台(9間水泥廠平均值)

項目	排放係數	卜特蘭水泥粉	總計
水泥粉		0.93噸CO <sub>2</sub> /噸熟料	0.93噸CO <sub>2</sub> /噸水泥粉

34

## 減碳效益評估-2

### 轉爐石基無機聚合砂漿碳排放係數

配比	爐石粉 <sup>a</sup>	燃煤飛灰	轉爐石細料	鹼液 <sup>b,c</sup>	抗收縮劑
重量(kg)	250	250	1461	249	15
排放係數	$5.8 \times 10^{-5}$	0	0	$4.82 \times 10^{-4}$	-
合計	0.0145	0	0	0.1200	0.0
總計	<b>0.1345 噸 CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 轉爐石基綠色水泥砂漿</b>				

<sup>a</sup> 中聯資源，2016。

<sup>b</sup> Davidovits, 2015.

<sup>d</sup> Louise, 2013.

35

## 減碳效益評估-3

### 無機聚合轉爐石砂漿 v.s. 卜特蘭水泥砂漿

項目	卜特蘭水泥砂漿 (2016年中華民國國家 溫室氣體排放清冊報告)	卜特蘭水泥砂漿 (產品碳足跡 計算服務平台)	無機聚合 轉爐石砂漿
CO <sub>2</sub> 排放係數 (噸 CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> 混凝土)	<b>0.2820</b>	<b>0.5040</b>	<b>0.1345</b>
無機聚合轉爐石砂漿 CO <sub>2</sub> 排放減少率	<b>52.3 %</b>	<b>73.3 %</b>	-

**CO<sub>2</sub>排放量可減少 50% 以上**

36

## 無機聚合綠色混凝土 植草磚



37

## 無機聚合綠色混凝土 植草磚 (宜蘭冬山鄉68社區)



38

## 無機聚合轉爐石砂漿 植草磚 (北科大材資館後方)

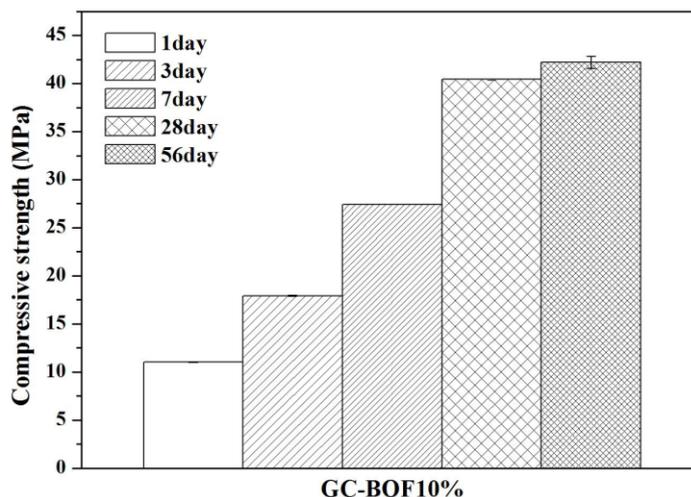
配比	粉體比例		灰砂比	砂灰石	液固比	轉爐石含水量
	飛灰	爐石粉				
GC-BOF10%	5	5	1:2.75	5%	0.49	10%



39

## 無機聚合轉爐石砂漿植草磚 抗壓強度

配比	硬化時間	
	初凝	終凝
GC-BOF10%	3hr 15min	8hr 40 min



40

## 無機聚合轉爐石砂漿植草磚 熱壓試驗

	熱壓前	CNS 1258 熱壓後	寬度 膨脹率%
試體			-0.27
抗壓強度 (MPa)	28.43	35.62	

41

## 經濟規模評估分析-1

配比	爐石粉	燃煤飛灰	轉爐石細料	鹼液	抗收縮劑
重量(kg)	250	250	1461	249	15
單價(元/kg)	1.0	0.5	0.0	15	5.0
合計	250	125	0.0	3735	75
總計	4185元新台幣/m <sup>3</sup> 轉爐石基綠色水泥砂漿				

每處理一公噸的轉爐石約2865元

25 x 25 x 4.5 cm



× 360 塊

製作成本：11.6 NTD/塊  
最低市售價格：15 NTD/塊  
(不含施工費用)

(15 NTD/塊 - 11.6 NTD/塊) × 360 塊 = 1224元/m<sup>3</sup>  
(利潤)

42

37

## 經濟規模評估分析-2

- 臺灣轉爐石年產量約150萬公噸，其中一半用於AC粒料，其餘為細料(小於4 Mesh)約70萬公噸。
- 轉爐石產品  
 $700,000 \text{公噸} \div 1.461 \text{公噸}/\text{m}^3 = 479,000 \text{ m}^3/\text{年}$   
 $479,000 \text{ m}^3/\text{年} \times 1224 \text{元}/\text{m}^3 = 586,300,000 \text{元}/\text{年}$
- 總體經濟規模：約 5.8億元/年

43

## 實廠拌合



44

## 2018/07/23廠拌試驗配比及結果

Trial batch No.1 (Fly ash : Slag=5 : 5)

實作	漿體 液固比 L/S	灰砂比	配比 (kg)						總重 (kg)
			鹼液 AK710	Slag	Fly ash	BOF (wet) 細粒料	BOF 含水率	Water	
1.5 m <sup>3</sup>	0.50	1 : 2.936	374.00	375.00	375.00	2,400.00	9.0 %	20.00	3,544.00
1.0 m <sup>3</sup>	0.50	1 : 2.936	249.33	250.00	250.00	1,600.00	9.0 %	13.33	2,362.66

測試項目		坍度 (cm)	坍流 度 (cm)	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )								
拌合日期				1d		3d		7d		28d		蒸煮後
1070723-1 廠拌	GP 5:5	26	38	198.8	<b>204.9</b>	332.7	<b>327.0</b>	364.2	<b>367.7</b>	389.3	<b>407.5</b>	<b>445.1</b>
				211.0		321.3		371.2		425.8		

試體熱壓長度變化 CNS 1258		
	1 直徑	1 長度
原始	12.2	24.2
蒸煮後	12.1	24.1
膨脹率	<b>-0.82</b>	<b>-0.41</b>

45

## 2018/07/23廠拌試驗配比及結果

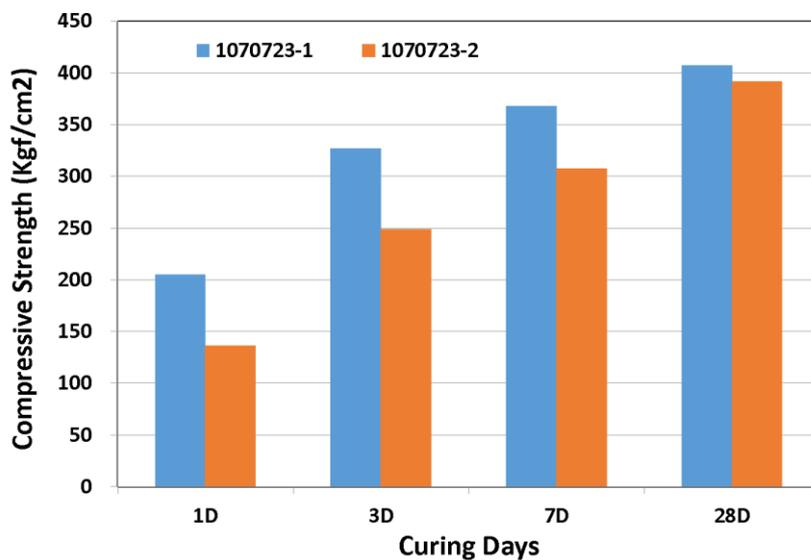
Trial batch No.1 (Fly ash : Slag=6 : 4)

實作	漿體 液固比 L/S	灰砂比	配比 (kg)						總重 (kg)
			鹼液 AK710	Slag	Fly ash	BOF (wet) 細粒料	BOF 含水率	Water	
1.5 m <sup>3</sup>	0.52	1 : 3.575	349.00	266.72	400.08	2,560.00	7.4 %	60.00	3,635.80
1.0 m <sup>3</sup>	0.52	1 : 3.575	232.67	177.81	266.72	1706.67	7.4 %	40.00	2,423.87

測試項目		坍度 (cm)	坍流 度 (cm)	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )								
拌合日期				1d		3d		7d		28d		蒸煮後
1070723-1 廠拌	GP 6:4	28	42	135.1	<b>136.5</b>	243.7	<b>249.1</b>	310.0	<b>307.5</b>	388.6	<b>391.6</b>	
				137.8		254.5		305.0		396.3		

試體熱壓長度變化 CNS 1258		
	2 直徑	2 長度
原始	12.1	24.2
蒸煮後	12.05	24.1
膨脹率	<b>-0.41</b>	<b>-0.41</b>

46



47

### 灌製 1 M<sup>3</sup> 試體

1天抗壓強度：20.0 MPa  
3天抗壓強度：32.1 MPa  
7天抗壓強度：36.1 MPa  
28天抗壓強度：40.0 MPa



48

## 灌製紐澤西護欄



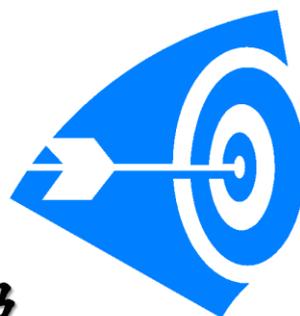
49



## 結論

1. **創新性技術** – **無機聚合技術**可取代現有卜特蘭水泥，**有效安定化轉爐石**(目前轉爐石以蒸氣養生技術安定，其方法耗時又費工)。
2. **產業競爭優勢** – **無機聚合產品**各項特性較卜特蘭水泥優越，且無機聚合水泥較與傳統卜特蘭水泥比較，**減碳效益達50-70%以上**。
3. **總體經濟規模** – 轉爐石基無機聚合產品總體經濟規模可達**每年新台幣五億元以上**。
4. **循環製程** – 轉爐石基無機聚合產品，**可無限次循環至原製程中**，達到搖籃到搖籃之目的。

# 致謝



感謝

中聯資源股份有限公司及  
科技部MOST 106-3114-E-027-001  
計畫經費的支持



51



謝謝聆聽



Taipei Tech-Mineral Processing Laboratory