

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高職組 土木科

第二名

最佳創意獎

最佳(鄉土)教材獎

091201

讓神明保佑“泥”！金紙灰水泥砂漿試體試驗

學校名稱：高雄市立高雄高級工業職業學校

作者：	指導老師：
職一 陳黎安	連憶菁
職二 何代堯	邱玫
職二 駱怡君	
職一 葉昀昀	

關鍵詞：水泥砂漿 金紙灰 抗壓強度

## 摘要

「讓神明保佑“泥”！金紙灰水泥砂漿試驗」是藉由簡易實驗設計，測出取代或添加不同比例金紙灰對水泥砂漿試體強度的影響，瞭解金紙灰可否取代部分水泥及細骨材，達到廢物利用，同時降低工程材料的成本增加經濟效益，以符合綠建築之永續宗旨。前期試驗證實：金紙灰水溶液為鹼性，其化學成分有： $\text{SiO}_2$ (18.08%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (12.23%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (1.30%)、 $\text{CaO}$ (39.79%)等類似水泥的成分。研究結果顯示：添加少量(添加率 10%以下)金紙灰將有助於早期強度的提升，若添加過量則產生負面影響減低強度。而本研究試體晚期強度普遍不佳，應與金紙灰過量鹼性成分和燒失量太大有關，倘若能在材料的取得技術或後處理做改進與提升，將更有助於提升金紙灰再利用的價值。

## 壹、研究動機

近年來環保議題非常受到重視，營建產業中「綠建築」理念亦逐漸落實，並已研發出許多的再生材料。經由高一工程材料課程中得知：混凝土為土木工程廣泛使用材料之一，組成成分主要為水、水泥、粗細骨材等，其中以水泥單位體積所花費成本最高，為了兼顧成本及強度控制，添加燃煤廢料之飛灰水泥、煉鋼副產品製成之高爐水泥相應而生，均展現廢棄物再利用之價值。本研究思考動機就是以此為出發，希望由更日常生活化之廢料中，找尋適當之取代或添加的材料，作為實驗研究方向。



圖 1 燃燒金紙之現況<sup>註 1</sup>

然而，能摻入水泥之廢料種類繁多，到底要選取哪種材料？廟宇林立的台灣，特殊的宗教信仰與傳統習俗，使得初一、十五，逢年過節，街頭巷尾總有煙霧瀰漫、漫天灰燼分飛的景象，焚燒金銀紙顯然是民間信仰中重要的民俗活動之一。因此，何不嘗試以「金紙灰」作為水泥替代材料的想法，由此萌生！

希望藉由本次研究機會中，找到適合摻入水泥砂漿中的再生材料取代部分水泥或部分細骨材體積，達到廢物利用和回收再生的構想，以符合綠建築之永續宗旨。

---

<sup>註 1</sup> 圖片來源：<http://photo.easy-digi.com/photo-view.php?f=51&s=962>

## 貳、研究目的

內政部統計資料顯示<sup>註2</sup>，至民國九十四年底台灣地區寺廟神壇總數已達一萬一千多處，平均每個鄉鎮廟宇密度達三十四個之多；此外縣市政府為解決相關環保問題，陸續推廣「金紙集中燒」活動；若能結合回收計畫，透過本研究尋求再利用之價值及可行性，非但能兼顧環境保護，且能降低工程材料成本，或許就能作為部份泥水工程、磚砌工程之水泥砂漿替代品，甚至製成混凝土材料來使用。

本研究目的歸納如下：

- 一、找出欲代替或摻入水泥的再生材料，並探討其相關性質。
- 二、透過我們的簡易實驗設計確立實驗之可行性。
- 三、研究以金紙灰取代部分水泥對水泥砂漿試體抗壓強度的影響。
- 四、研究添加不同比例的金紙灰對水泥砂漿試體抗壓強度的影響。
- 五、研究金紙灰對水泥砂漿耐久性的影響。
- 六、簡易評估討論本研究改良式水泥砂漿之經濟效益、應用價值。






倘若研究的初步成果，能使試體在抗壓強度表現及材料成本中取得一平衡，也許會成為相當具有台灣本土特色的環保材料。

---

<sup>註2</sup> 數據資料來源：內政部統計處 <http://www.moi.gov.tw/stat/>

## 參、研究設備及器材

表 1 本研究相關設備儀器彙整資料

名稱	圖片	用途	備註
水泥		水泥砂漿原料之一， 凝結試驗物體	廠牌：東南牌 種類：I 型卜特蘭水泥 使用總量：17,307g
金紙灰		欲代替或摻入水泥 之材料	使用總量：2,034 g
細砂		水泥砂漿成分之一	使用總量：34,825 g
篩網		篩析細砂	孔目：12 目 大小：7 厘 數量：1 個
李氏 比重瓶		測定金紙灰比重	數量：1 個
烘箱		把金紙灰、砂 烘乾	

續上

表 1

名稱	圖片	用途	備註
養生水槽		有效維持恆溫 (°C)、 恆濕環境，比重測試時 維持環境穩定性	
電子秤		測量所有試驗物 的重量	承載最大最小值： Max：3250g Min：0.01
試體 模具		作為灌製試體的 標準模具	尺寸：5x5x5 數量：36 個 利用科內現有木材，利用 卡榫的方式作組裝進而 完成現在的模具。
拌和器		拌和水泥砂漿	爲了要讓水泥砂漿拌和 的更均勻，所以利用校園 的器具（電鑽）自製拌和 器。
搗棒		搗實水泥砂漿 試體	數量：2 支 材質：金屬材
機油		塗抹在模具內，使 試體容易拆模	數量：1 瓶
鐵鎚		釘製標準模具	數量：2 支
鐵釘		用來釘試體模型	數量：39 支

續上表 1

名稱	圖片	用途	備註
石灰		調配水泥試體的的養護液（飽和石灰水）	
水管		利用虹吸原理抽取飽和石灰水	數量：1 條
儲水桶		用來盛裝飽和石灰水	數量：2 個
電子式抗壓機		用來測試試體的抗壓強度	最大承壓荷重：30 TON 精度：1 %
廣用試紙		用來測試金紙灰的酸鹼性質	數量：1 盒
煤油		利用阿基米得原理測試金紙灰、砂的比重	數量：1 個
其他	<p>桃型慢刀、拌合桶、水瓢、水桶、鐵鎚、鐵釘、刷子、木鋸、銼刀…等</p> 		

## 肆、研究過程或方法

### 一、研究流程圖

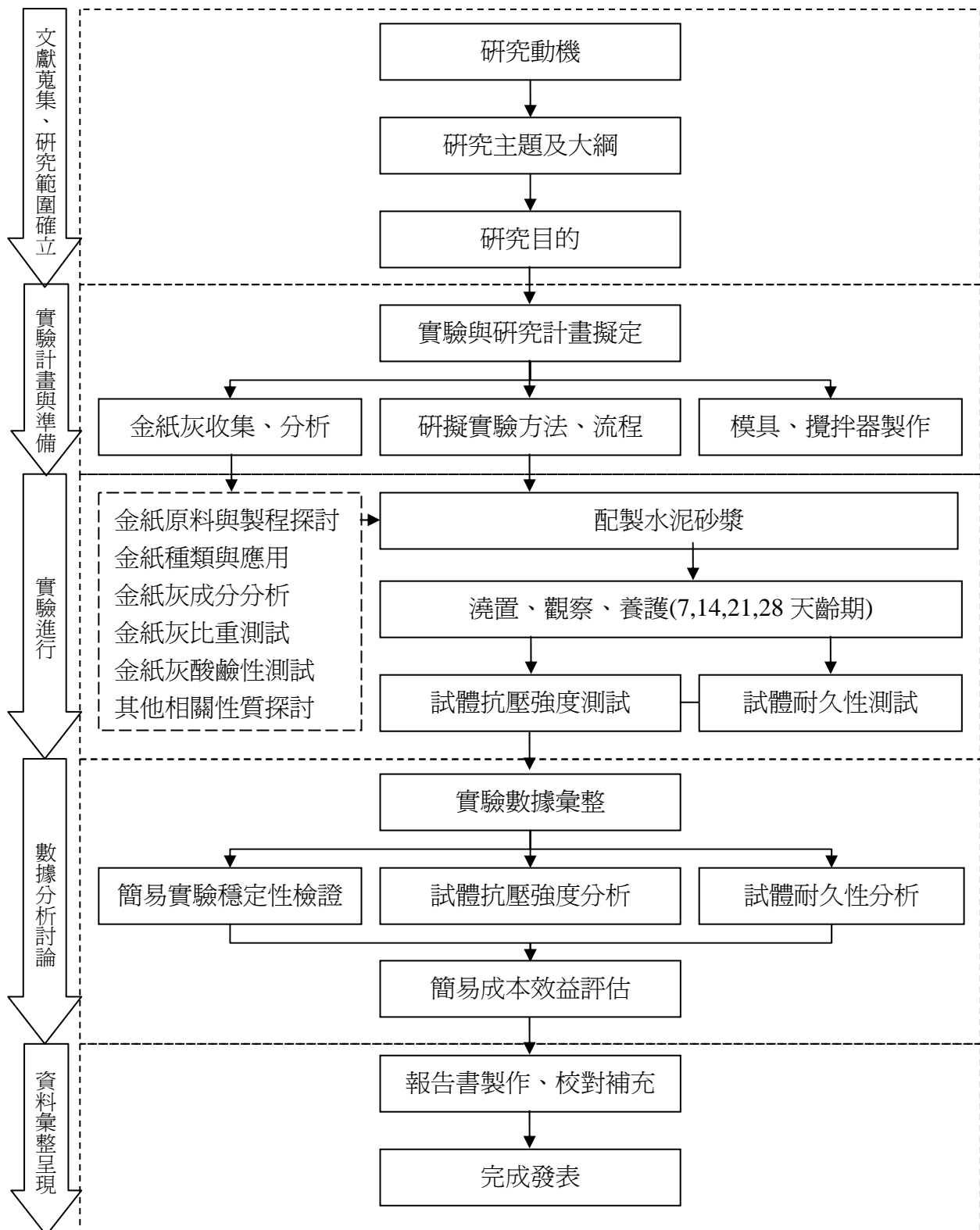


圖 2 研究流程圖



## 二、研究方法

除透過文獻回顧、團體討論進行研究外，主要實驗設計如下：

### （一）金紙灰收集：

為確保實驗之精確度，我們所使用的金紙灰，統一由同廟宇（朝天宮）一次取得足量，經由均勻拌和、篩析，作為本研究之摻料備用。

### （二）試體模具製作：

因校內無既有拌和、搗實…等設備，我們透過討論選定以水泥砂漿作為實驗研究對象，並利用學校現有的資源，自製簡易實驗模具。模具的製作是依據 CNS 相關規範採用尺寸規格，設計為 5×5×5 cm 的正立方體。

### （三）水泥砂漿試體製作及配比設定：

先製作一組水泥砂漿之標準配比 1：2.75：0.485（A 組）為對照組，為便於後續研究簡化 A 組取其 1：0.3：0.5 配比作為對照組（B 組）。金紙灰依不同比例取代等量之水泥（C 組～G 組）、依不同比例添加金紙灰（H 組～L 組），完成水泥砂漿之配比設定。由於金紙灰是環保再利用的資源，假定成本為零，故此配比設定至少能降低整體材料成本，或是作為填充材增加水泥砂漿之體積。

### （四）簡易試體養護：

先將儲水桶內裝入足以將所有試體沒入水中的水量，再將石灰粉倒入桶內，均勻攪拌使其液體達至飽和狀態。作為試體的養護液。

### （五）試體抗壓強度測試：

養護後於依據編號將試體陸續放進「電子式抗壓機」內進行抗壓強度的實驗。並同時紀錄下實驗數據，計算出每一試體的抗壓強度。

### （六）金紙灰酸鹼值測試：

鋼筋混凝土中應避免酸性物質，以免加速鋼筋腐蝕或破壞，間接造成強度的降低。因此，主實驗前，我們應用簡單化學酸鹼試驗原理，利用廣用試紙(如圖 3)比色方式，檢測金紙灰水溶液之酸鹼性。



圖 3 廣用試紙

### 三、實驗細項說明

#### (一) 實驗假設

- 1、假設我們的簡易實驗設計具有一定之可行性
- 2、以金紙灰取代部分水泥對水泥砂漿強度、耐久性具有影響
- 3、以金紙灰同時取代水泥及細骨材將對水泥砂漿強度、耐久性具有影響

(即不影響原配比，假設添加不同金紙灰量對水泥砂漿強度、耐久性具有影響)

#### (二) 實驗設計

##### 1、對照組

試體	水泥：砂：水	
A	配比	1 : 2.75 : 0.485
	重量	1000g : 2750g : 485g
B	配比	1 : 3 : 0.5
	重量	1000g : 3000g : 500g
說明 (1) A 組試體材料配比比照 CNS 試驗規範做設定 (2) B 組試體材料配比乃是改良簡化 A 組繁雜的數值設定，以便於實驗組取代率的選定與計算。		

##### 2、實驗組 ( I )

試體	水泥：金紙灰：砂：水		替代率
C	配比	0.9：0.1：3：0.5	10%
	重量	900g：100g：3000g：500g	
D	配比	0.8：0.2：3：0.5	20%
	重量	800g：200g：3000g：500g	
E	配比	0.7：0.3：3：0.5	30%
	重量	700g：300g：3000g：500g	
F	配比	0.6：0.4：3：0.5	40%
	重量	600g：400g：3000g：500g	
G	配比	0.5：0.5：3：0.5	50%
	重量	500g：500g：3000g：500g	
說明（3）替代率：指金紙灰取代水泥的比例，替代率＝ $\frac{\text{金紙灰}}{\text{水泥}+\text{金紙灰}}$			

### 3、實驗組（Ⅱ）

試體	水泥：金紙灰：砂：水		添加率
H	配比	1：0.1：3：0.5	2.5%
	重量	978.26g：97.82g：2934.78g：489.13g	
I	配比	1：0.2：3：0.5	5.0%
	重量	957.40g：191.48g：2872.34g：478.72g	
J	配比	1：0.3：3：0.5	7.5%
	重量	937.5g：281.25g：2811.2g：468.75g：	
K	配比	1：0.4：3：0.5	10.0%
	重量	918.36g：367.34g：2755.10g：459.18g	
L	配比	1：0.5：3：0.5	12.5%
	重量	900g：450g：2700g：450g	
說明（4）添加率：原料總重量不變，水泥與砂比例固定，添加金紙灰，即同 時取代部分水泥和砂之比例。添加率= $\frac{\text{金紙灰}}{\text{水泥} + \text{砂}}$			

### （三）實驗步驟

#### 1、自製實驗模具：

將木板擺出要的規格，再用鐵釘進行固定，完成模具的製作。（圖 4）

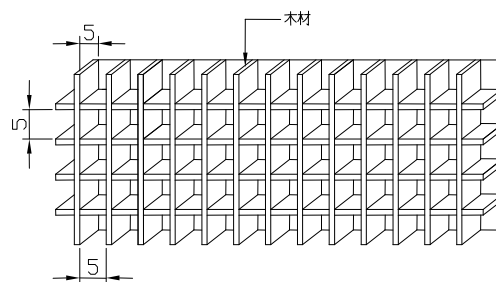


圖 4 自製模具試體示意圖

#### 2、篩析：

模具完成後，利用篩網分別篩析砂和金紙灰至拌合桶內。（圖 5）



圖 5 篩砂示意圖

#### 3、秤取原料：

取一定配比的砂、水泥秤重，來完成配比的工作。（圖 6）



圖 6 秤重示意圖

#### 4、乾料拌和：

將配比完成的砂、水泥、水放進拌合桶裡，利用桃型慢刀攪拌，以致加水拌和時能更均勻。（圖 7）



圖 7 乾拌示意圖

#### 5、拌和（自製簡易儀器）：

將一定配比的水，緩慢地倒至拌合桶內，利用簡易自製的拌和器（電鑽改良品），均勻拌合。（圖 7、8）



圖 8 拌和示意圖

#### 6、塗抹機油：

使用機油塗抹於模具內，使拆模更方便。(圖 9)



圖 9 塗抹機油示意圖

#### 7、灌漿、搗實：

把配比出來的水泥砂漿，放進模具裡，每層搗實量固定，讓它不會鬆散，完成後，放置等待拆模。(圖 10)



圖 10 灌漿、搗實示意圖

#### 8、養護（調製飽和石灰水）：

將儲水桶內裝滿水，加入石灰粉使其溶解，直到飽和狀態，在將飽和溶液抽至另一儲水桶內。將靜置二十四小時後拆模之試體放入飽和石灰水中養護。(圖 11.12)



圖 11 養護示意圖一



圖 12 養護示意圖二

#### 9、抗壓試驗：

養護至所要齡期後，以混凝土抗壓試驗機，來測試試體的抗壓力。(圖 13)



圖 13 抗壓試驗示意圖

## 伍、研究結果

表 2 試體 A 實驗結果

項目 \ 編碼			A 1	A 2	A 3	平均值
7 天	荷重	kg	6948	7212	6156	6772
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	277.9	288.5	246.2	270.9
14 天	荷重	kg	7893	8763	7368	8008
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	315.7	350.5	294.7	320.3
21 天	荷重	kg	9408	10140	10704	10084
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	376.3	405.6	428.2	403.4
28 天	荷重	kg	10036	10008	10080	10041
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	401.4	400.3	403.2	401.7

抗壓強度(kg/cm<sup>2</sup>)

A系試體不同齡期抗壓強度比較

齡期	A1	A2	A3
7天	277.9	288.5	246.2
14天	315.7	350.5	294.7
21天	376.3	405.6	428.2
28天	401.4	400.3	403.2

表 4 試體 C 實驗結果

項目 \ 編碼			C 1	C 2	C 3	平均值
7 天	荷重	kg	5172	5748	6048	5656
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	206.9	229.9	241.9	226.2
14 天	荷重	kg	5508	6240	6348	6032
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	220.3	249.6	253.9	241.3
21 天	荷重	kg	6516	7284	8064	7288
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	260.6	291.4	322.6	291.5
28 天	荷重	kg	7596	7668	7140	7468
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	303.8	306.7	285.6	298.7

抗壓強度(kg/cm<sup>2</sup>)

C系試體不同齡期抗壓強度比較

齡期	C1	C2	C3
7天	206.9	229.9	241.9
14天	220.3	249.6	253.9
21天	260.6	291.4	322.6
28天	303.8	306.7	285.6

表 3 試體 B 實驗結果

項目 \ 編碼			B 1	B 2	B 3	平均值
7 天	荷重	kg	5976	6324	5640	5980
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	239.0	253.0	225.6	239.2
14 天	荷重	kg	6912	7124	6480	6839
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	276.5	285.0	259.2	273.5
21 天	荷重	kg	9012	10044	10212	9756
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	360.5	401.8	408.5	390.2
28 天	荷重	kg	10449	9624	9980	10018
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	418.0	385.0	399.2	400.7

抗壓強度(kg/cm<sup>2</sup>)

B系試體不同齡期抗壓強度比較

齡期	B1	B2	B3
7天	239.0	253.0	225.6
14天	276.5	285.0	259.2
21天	360.5	401.8	408.5
28天	418.0	385.0	399.2

表 5 試體 D 實驗結果

項目 \ 編碼			D 1	D 2	D 3	平均值
7 天	荷重	kg	4968	4728	4560	4752
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	198.7	189.1	182.4	190.1
14 天	荷重	kg	5052	4596	4724	4791
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	202.1	183.8	189.0	191.6
21 天	荷重	kg	6108	6480	5904	6164
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	244.3	259.2	236.2	246.6
28 天	荷重	kg	5628	6108	5997	5911
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	225.1	244.3	239.9	236.4

抗壓強度(kg/cm<sup>2</sup>)

D系試體不同齡期抗壓強度比較

齡期	D1	D2	D3
7天	198.7	189.1	182.4
14天	202.1	183.8	189.0
21天	244.3	259.2	236.2
28天	225.1	244.3	239.9

表 6 試體 E 實驗結果

項目 \ 編碼			E 1	E 2	E 3	平均值
7 天	荷重	kg	3996	4416	4080	4164
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	159.8	176.6	163.2	166.6
14 天	荷重	kg	4152	4200	4522	4291
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	166.1	168.0	180.9	171.7
21 天	荷重	kg	4800	4848	4956	4868
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	192.0	193.9	198.2	194.7
28 天	荷重	kg	4596	4260	4548	4468
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	183.8	170.4	181.9	178.7

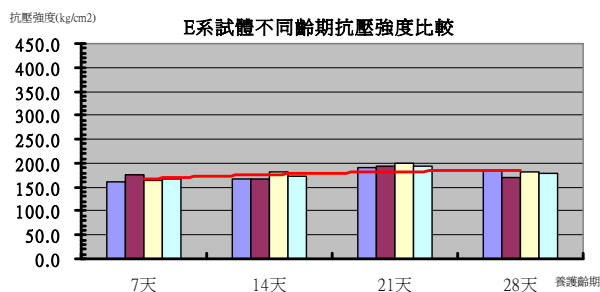


表 8 試體 G 實驗結果

項目 \ 編碼			G 1	G 2	G 3	平均值
7 天	荷重	kg	2544	2388	2148	2360
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	101.8	95.5	85.9	94.4
14 天	荷重	kg	2676	2688	2664	2676
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	107.0	107.5	106.6	107.0
21 天	荷重	kg	2268	2256	2136	2220
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	90.7	90.2	85.4	88.8
28 天	荷重	kg	2304	2436	2388	2376
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	92.2	97.4	95.5	95.0

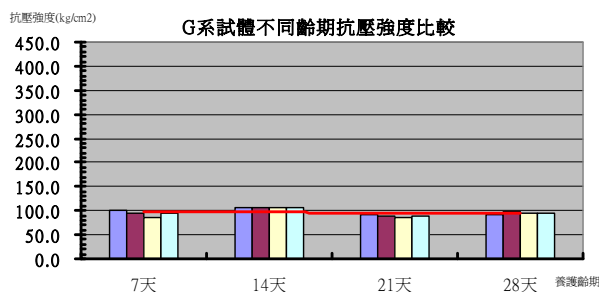


表 7 試體 F 實驗結果

項目 \ 編碼			F 1	F 2	F 3	平均值
7 天	荷重	kg	3228	3672	3336	3412
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	129.1	146.9	133.4	136.5
14 天	荷重	kg	3744	3336	3456	3512
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	149.8	133.4	138.2	140.5
21 天	荷重	kg	3300	3288	3468	3352
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	132.0	131.5	138.7	134.1
28 天	荷重	kg	3792	3684	3732	3736
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	151.7	147.4	149.3	149.4

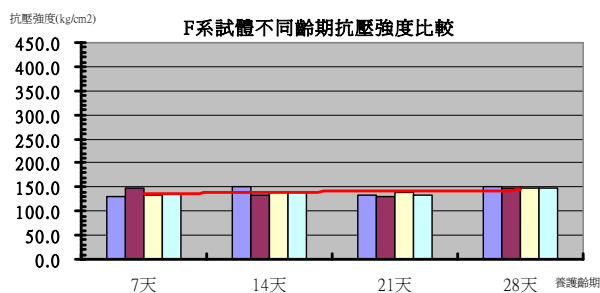


表 9 試體 H 實驗結果

項目 \ 編碼			H 1	H 2	H 3	平均值
7 天	荷重	kg	7612	7452	7968	7677.3
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	304.5	298.1	318.7	307.1
14 天	荷重	kg	6924	7176	7860	7320
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	277.0	287.0	314.4	292.8
21 天	荷重	kg	8232	7920	8124	8092
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	329.3	316.8	325.0	323.7
28 天	荷重	kg	8256	8928	8328	8504
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	330.2	357.1	333.1	340.2

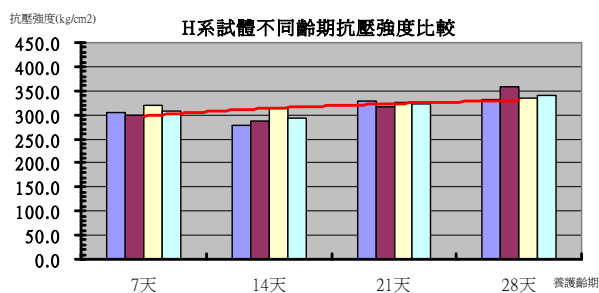


表 10 試體 I 實驗結果

項目 \ 編碼			I 1	I 2	I 3	平均值
7 天	荷重	kg	7212	7816	7224	7417
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	288.5	312.6	289.0	296.7
14 天	荷重	kg	7776	7272	6078	7042
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	311.0	290.9	243.1	281.7
21 天	荷重	kg	8124	7488	7740	7784
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	325.0	299.5	309.6	311.4
28 天	荷重	kg	7440	7824	7740	7668
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	297.6	313.0	309.6	306.7

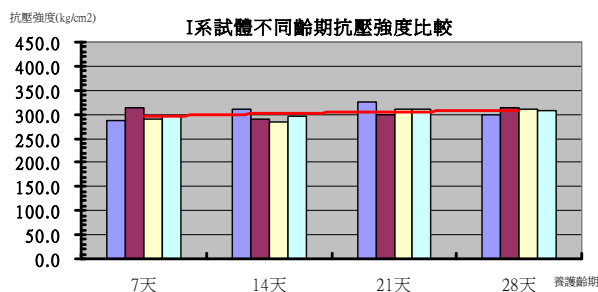


表 12 試體 K 實驗結果

項目 \ 編碼			K 1	K 2	K 3	平均值
7 天	荷重	kg	6684	6784	6744	6737.3
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	267.4	271.4	269.8	269.5
14 天	荷重	kg	7200	6588	6870	6886
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	288.0	263.5	274.8	275.4
21 天	荷重	kg	5248	6264	6192	5901.3
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	209.9	250.6	247.7	236.1
28 天	荷重	kg	6609	6133	6441	6394
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	264.4	245.3	257.6	255.8

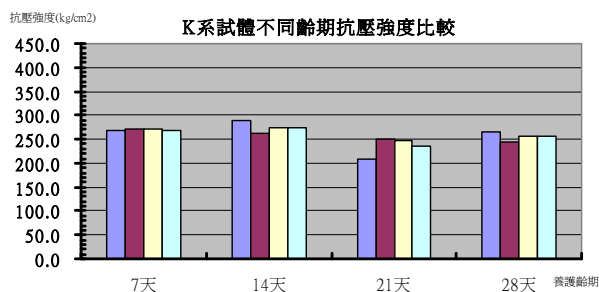


表 11 試體 J 實驗結果

項目 \ 編碼			J 1	J 2	J 3	平均值
7 天	荷重	kg	7416	7212	7152	7260
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	296.6	288.5	286.1	290.4
14 天	荷重	kg	7398	8085	7800	7761
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	295.9	323.4	312.0	310.4
21 天	荷重	kg	6672	6720	6720	6704
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	266.9	268.8	268.8	268.2
28 天	荷重	kg	6520	6424	7144	6696
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	260.8	257.0	285.8	267.8

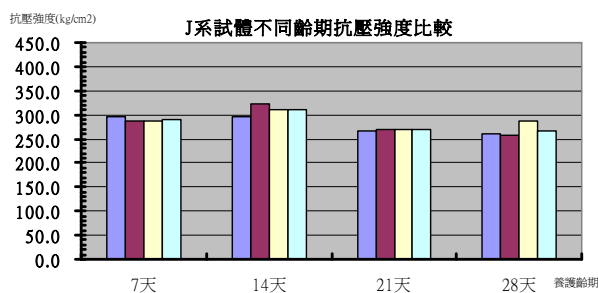
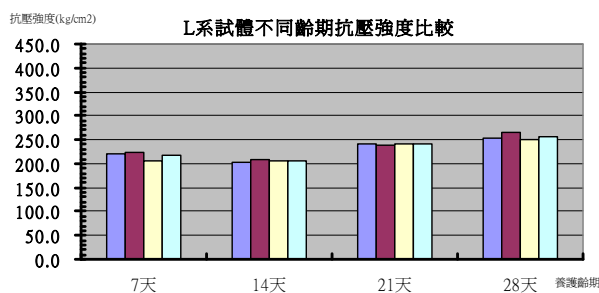


表 13 試體 L 實驗結果

項目 \ 編碼			L 1	L 2	L 3	平均值
7 天	荷重	kg	5496	5616	5136	5416
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	219.8	224.6	205.4	216.6
14 天	荷重	kg	5088	5208	5172	5156
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	203.5	208.3	206.9	206.2
21 天	荷重	kg	6036	5988	6060	6028
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	241.4	239.5	242.4	241.1
28 天	荷重	kg	6336	6600	6228	6388
	強度	kg/cm <sup>2</sup>	253.4	264.0	249.1	255.5





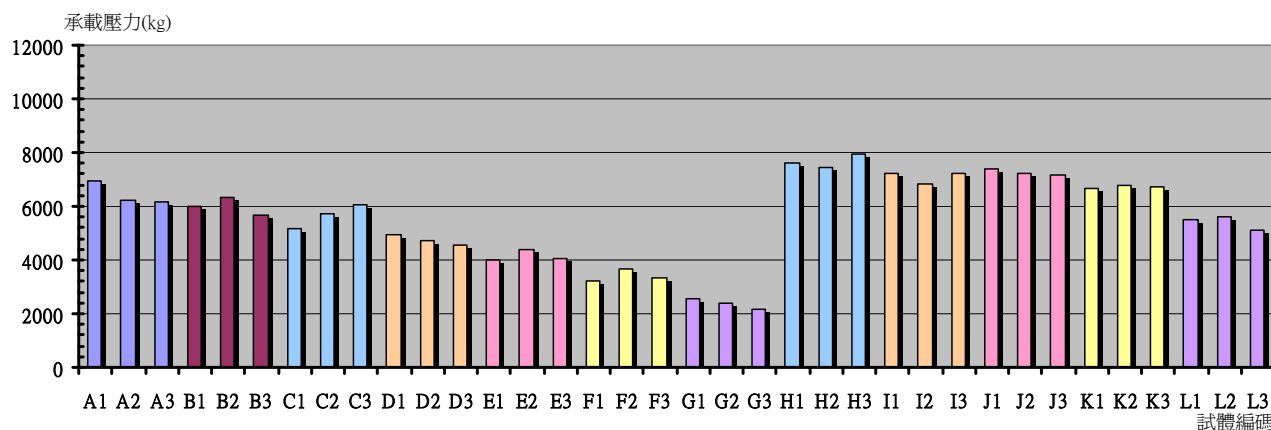


圖 14 各試體七天齡期之抗壓強度對照圖

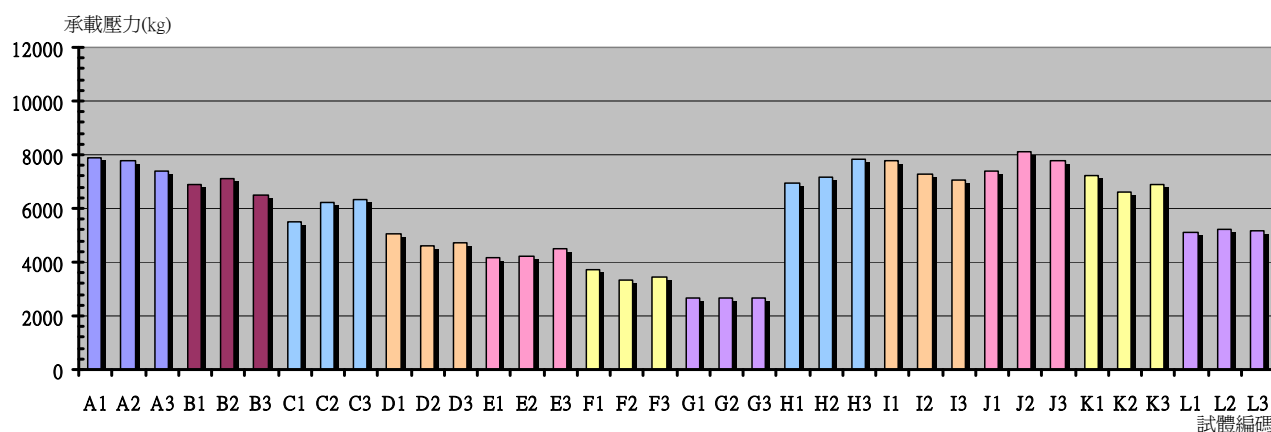


圖 15 各試體十四天齡期之抗壓強度對照圖

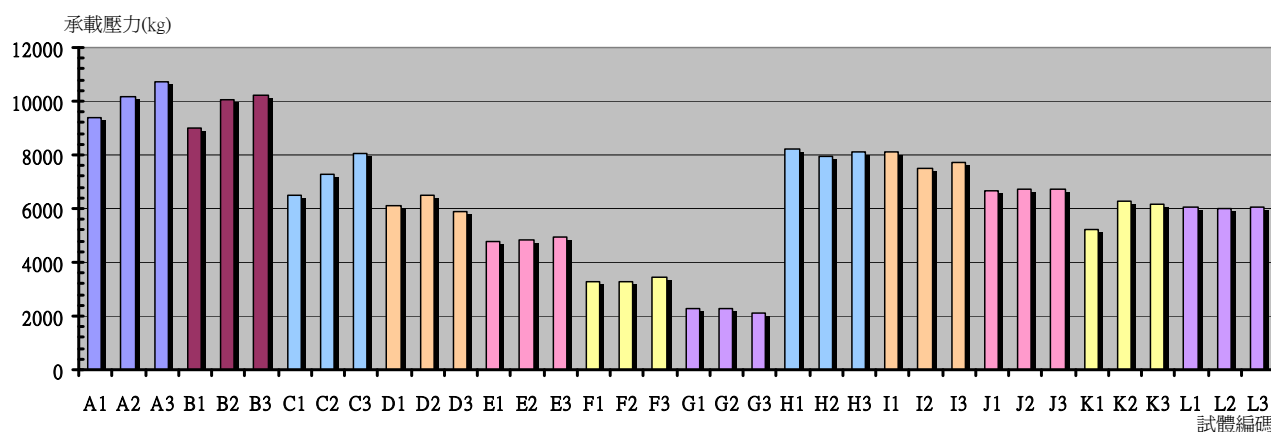


圖 16 各試體二十一天齡期之抗壓強度對照圖

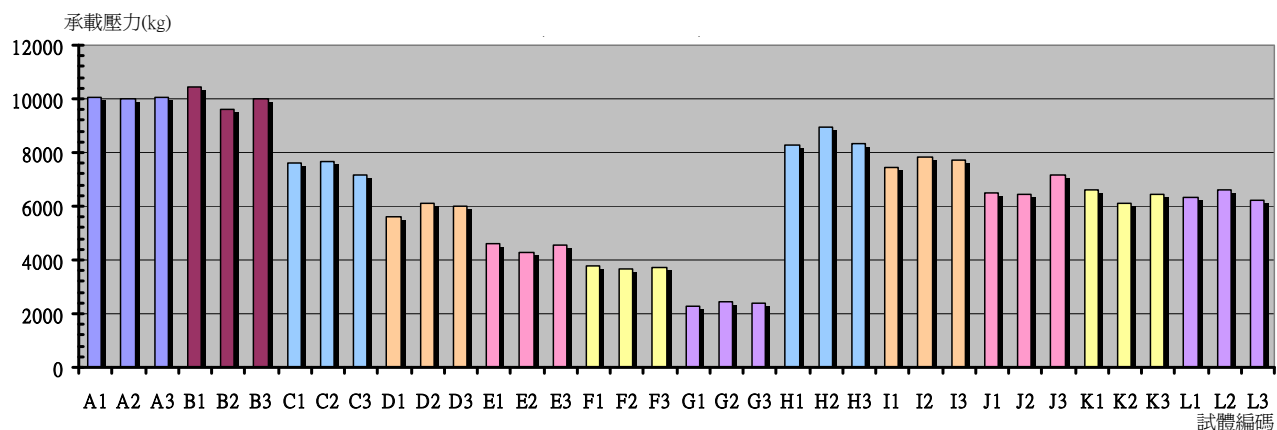


圖 17 各試體二十八天齡期之抗壓強度對照圖

備註

- 一、A 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝ 1： 0：2.75：0.485
- B 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝ 1： 0：3.00：0.500
- C 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝0.9：0.1：3.00：0.500
- D 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝0.8：0.2：3.00：0.500
- E 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝0.7：0.3：3.00：0.500
- F 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝0.6：0.4：3.00：0.500
- G 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝0.5：0.5：3.00：0.500
- H 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝ 1：0.1：3.00：0.500
- I 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝ 1：0.2：3.00：0.500
- J 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝ 1：0.3：3.00：0.500
- K 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝ 1：0.4：3.00：0.500
- L 組： 水泥：金紙灰：砂：水＝ 1：0.5：3.00：0.500
- 二、編碼 1.2.3 代表上述 A～L 每組不同配比實驗，均各有 3 個試體
- 三、荷重（承載壓力）：各試體破壞前所能承載之最大壓力值
- 四、強度（抗壓強度）：試體單位面積所能負荷之最大壓力值  

$$\sigma = P/A$$
其中  $\sigma$ ：強度，P：荷重，A：受力面積
- 五、平均值為各組三個試體承載壓力、抗壓強度之算術平均值

## 陸、討論

文獻回顧得知，飛灰或火山灰等卜作嵐材料之水泥替代量不可大於百分之三十。飛灰水泥早期強度不足，晚期強度卻比一般波特蘭水泥還要高，且可降低工程成本。本研究試著將台灣特有的「金紙灰」摻入水泥砂漿試體，除針對摻品討論其本身物性外，分別 1.以金紙灰當作水泥替代品、2.以金紙灰同時替代部分水泥及砂進行實驗討論；取代及添加比率分別不超過百分之五十、百分之十五的範圍內，測試各試體不同齡期抗壓強度、耐久性的表現。

### 一、摻入品「金紙」之相關性質討論：

#### （一）金紙原料與製程

製作金紙的成分及添加物大致包含原紙、錫箔、漿糊、金油、紅花膏等，主要原料為紙漿，現今製金紙廠紙類來源包含紙板、報紙、雜誌、廢紙等，加水打碎成紙漿，加入木屑及適當染料，經瀝水及烘乾處理而成；經裁切錫箔、裱錫箔以及在金紙上塗金油，並裁切韋成品尺寸，再貼覆紙面上的錫箔、鋁箔，最後將金紙綑綁再做側面蓋印。

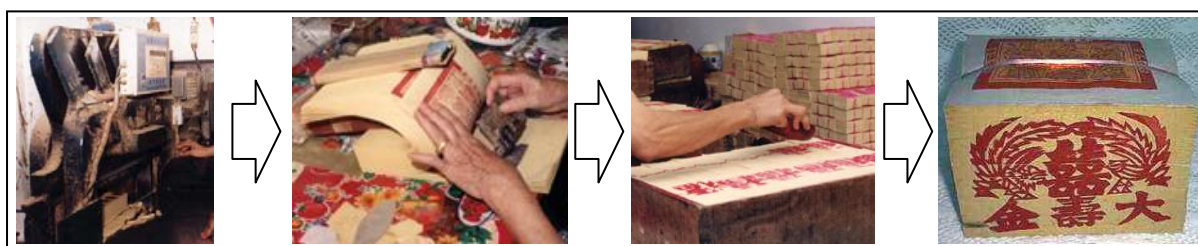






圖 18 金紙簡易製造流程圖

#### （二）金紙種類與應用

本省金紙約可分五至十二種，其分類與用途乃依照神佛階級、神格高低不同而有所差異。目前在台灣最常使用的金紙種類包含了以下數種，如表 14。

本研究所取得的金紙灰是來自南部某朝天宮，金紙種類主要有：天公金、壽金、補運金、發財金等，這些金紙皆是普遍常使用的紙錢。

表 14 常用金紙的種類與用途

金紙名	用途	金紙名	用途
頂極金	於初九拜天公(玉皇大帝)時用，用於表示信徒最高誠敬。	壽金	用於祭拜一般神祇。祈求許願或神誕時，是最為普遍的金紙。
太極金	用於祭拜玉皇大帝或三界公(天官、地官、水官)時燒用。	刈金	用於祭拜一般神祇。人死時，會作為死者之枕，並以覆蓋顏面。
蓮花金	用來祭拜鄉土神祇，或位階較低的神祇。	福金	民間用來祭祀福德正神(土地公)特有的金紙。
補運金	用於祭祀城隍爺、大眾爺、諸府王爺等消災改禍所用。	天金	和頂極金、太極金一樣，用於祭拜天公或三界公時燒用。
天公金	為祭祀玉皇大帝或三官大帝所用的金紙。	發財金	燒化給八路武財神趙公明，用來祈求財利、補財庫的金紙。
補運金	壽金	天公金	發財金
			

### (三) 金紙灰處理與回收

多數廟宇燒完金紙後，將金紙灰集體收集起來一併移送焚化爐處理；有些則是將它埋入土內，或直接倒入水溝內，無論何種方式都在在顯示當前金紙灰屬於低度價值之廢棄物。期望透過本研究的討論，賦予它新的利用價值！近年來各縣市政府積極推動「金紙集中燒」活動，透過集中燃燒處理非但能降低空氣污染，還能成為將來大量回收再利用之材料來源。

### (四) 金紙灰成分檢測

利用電子掃描式顯微鏡(SEM)觀測金紙灰顆粒，並檢視金紙灰成分。透過量化結果，金紙灰的成分有： $\text{SiO}_2$  (18.08%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12.23%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1.30%)、 $\text{CaO}$  (39.79%)、 $\text{MgO}$  (2.51%)、 $\text{SO}_3$  (2.18%)、 $\text{K}_2\text{O}$  (0.48%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (2.00%) 等。由於成分中含有類似水泥的化學物質，將有助於後續研究討論。

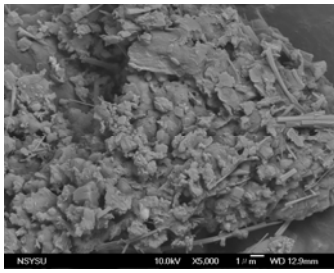


圖 19 金紙灰 SEM 掃描電顯圖

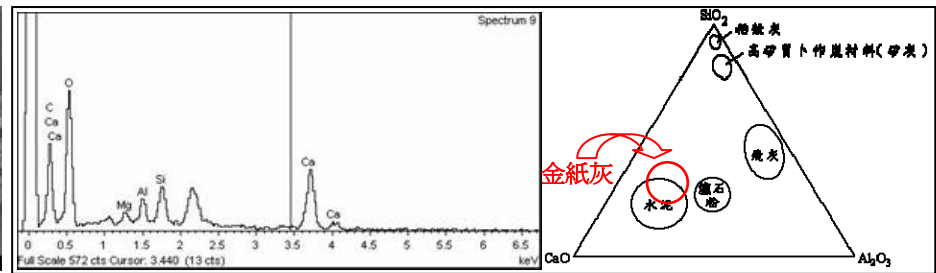


圖 20 金紙灰成分及三相圖

### (五) 金紙灰比重測試

利用測定水泥比重的原理：以少量煤油和砂清洗李氏比重瓶，再將煤油倒入比重瓶至 0~1 刻度間（a），置於恆溫養生水槽中直到體積達穩定。同時將金紙灰烘乾，輕輕搗碎顆粒，秤取適量金紙灰（W）緩緩倒入比重瓶，旋轉並輕搖瓶子逐出氣泡，待液面體積達穩定再讀取油面刻度（a'）。

實驗數據如下表 15，金紙灰平均比重值約 2.43，較新鮮水泥 3.15 為小。

表 15 金紙灰比重實驗數據

	金紙灰重量(W)公克	讀數(a)	讀數(a')	比重
實驗一	32	0	18	2.33
實驗二	45	0.5	18.7	2.47
實驗三	45	0	18	2.50
平均值	—	—	—	2.43
計算式	金紙灰比重 = $\frac{W}{a' - a}$			

### (六) 金紙灰酸鹼性測試

初步選用金紙灰作為摻品後，我們利用簡易的酸鹼試驗(圖 21 所示)，以玻璃棒攪拌、調製金紙灰飽和溶液，利用廣用試紙測試其酸鹼性，溶液呈現弱鹼反應，若添加於水泥砂漿或混凝土中，將有助於鋼筋之保護。

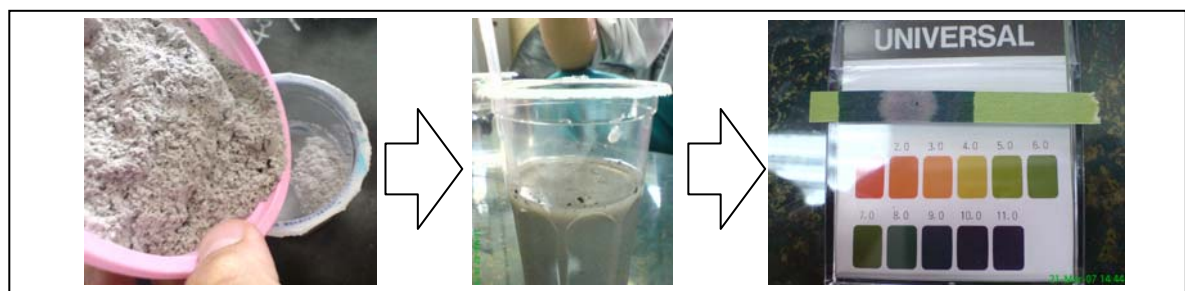


圖 21 金紙灰酸鹼性實驗

## 二、簡易實驗設計之可行性討論

實驗 A、B 組為對照組，A 組是按照 CNS 標準規範之水泥砂漿配比，B 組是為了便於計算，簡化後之配比設定。實驗結果如圖 22，相同齡期 A、B 兩組共六個試體之抗壓試驗結果具有一定之穩定性與一致性，整體數據波動皆未超過 8%，由於本研究是以有限的職校資源，自製簡易設備實驗流程，此一強度差異仍在可接受範圍。因此本研究據此結果建立重複實驗之效度，後續研究即以 B 組配比為基底，進行金紙灰替代率和添加率之各項試驗，並以 B 組作為對照組進行比較、討論。

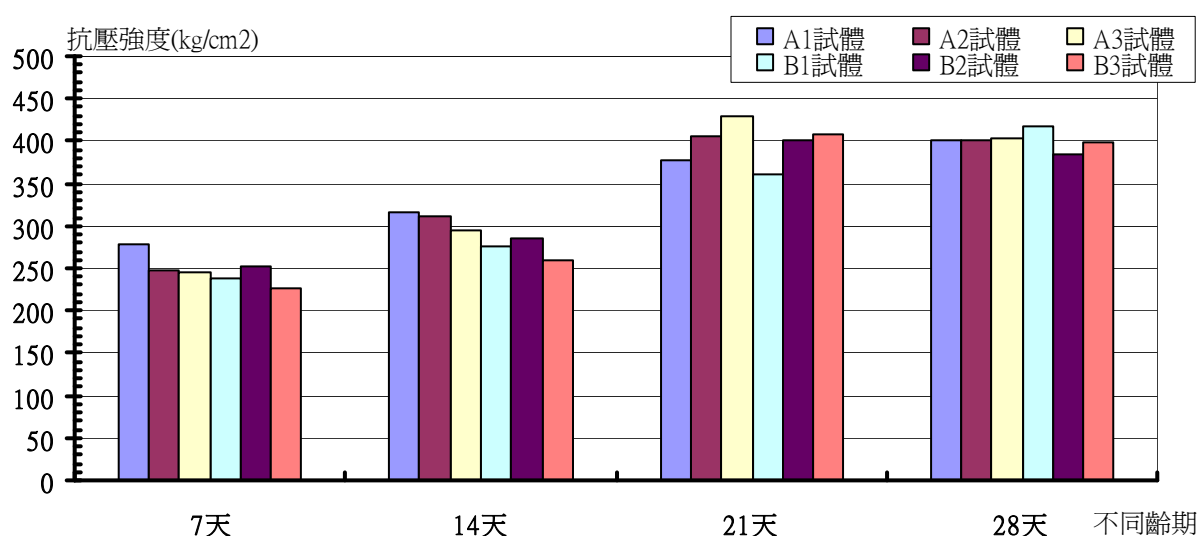


圖 22 各齡期 A、B 組抗壓強度比較圖

## 三、以金紙灰取代部分水泥對水泥砂漿試體抗壓強度的影響

以 B 組為基底，研究以金紙灰取代部分水泥，替代率由 0~50% 分別進行 C~G 組試體。結果顯示（如圖 23），無論何種取替代率，各組試體的抗壓強度相較於沒有金紙灰的 B 組實驗，的確有顯著減低；而且隨著替代率提高，抗壓強度逐漸降低，在不同齡期都有相似結果。隨著齡期增加時，除了 C 組（取代率 10%）能夠逐漸提升晚期強度外，其他組（D~G 組）的數據則呈現了不規則的跳動；且養護齡期愈長，對照組強度與不同取代率的試體強度差異日益增大，如圖 24 所示。推測其原因可能是本研究所設定的替代率過高，大量的金紙灰反而阻礙水泥的水化反應，造成抗壓強度不佳。更直接地說，金紙灰並不能完全取代水泥角色，提供主要的膠結反應。



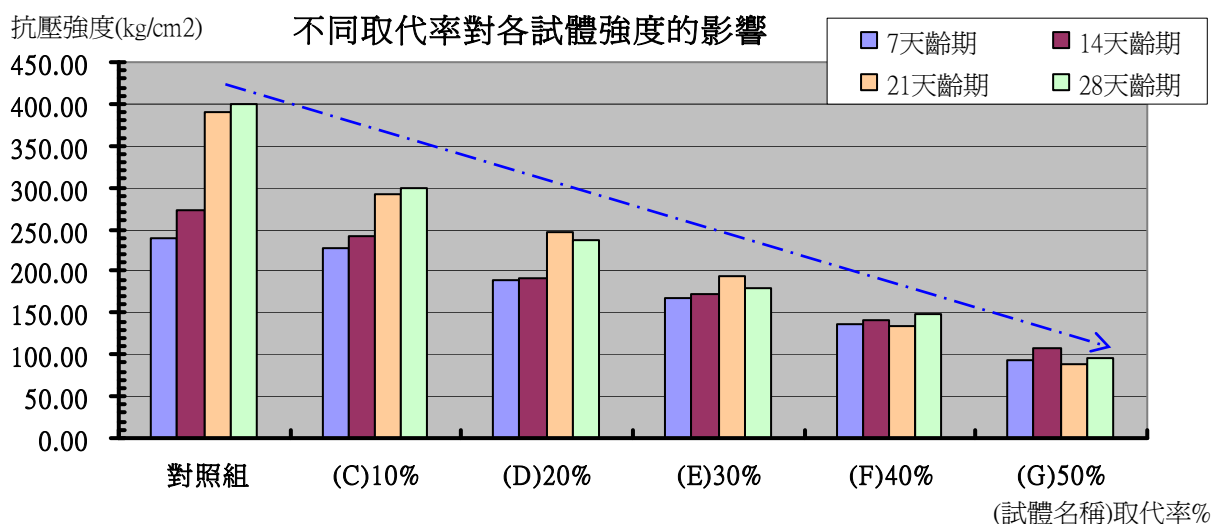


圖 23 不同替代率之試體抗壓強度比較圖

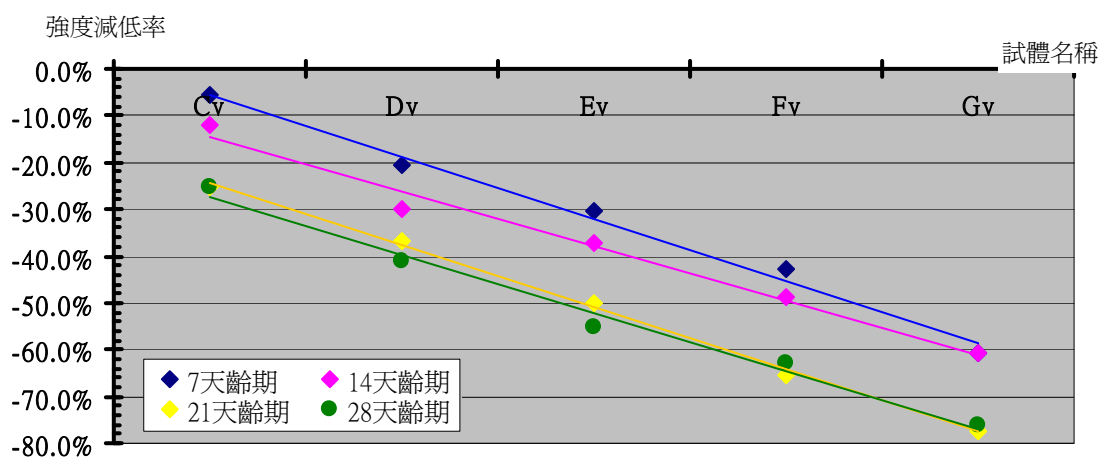


圖 24 不同替代率之試體強度減低率比較圖

#### 四、添加不同比例的金紙灰對水泥砂漿試體抗壓強度的影響

以 B 組為基底，固定水泥與砂之配比為 1：3，總重量不變下，分別添加不同比例之金紙灰，即同時取代部分水泥、細砂含量（但不改變比例），觀察圖 25(a)的數據統計資料：對照組強度隨齡期增長而逐漸顯著提升，直至 21 天以後強度趨於穩定，約成長 1.5 倍；而本研究添加少量金紙灰的 H、J 組試體，七天強度就已經接近對照組十四天強度值，早期強度表現甚佳，但相同添加率的不同齡期抗壓曲線(如圖 25(b))則相當平緩，即七天後強度隨時間增長提升相當有限。

由圖 25(c)綜觀整體數據，在 7 天和 14 天時，除了添加率達 12.5% 的 L 組沒有大於 B 組的抗壓強度以外，其他 H~K 組的抗壓強度均大於對照組強度。但在 21 天及 28 天齡期的實驗結果卻完全相反，所有有添加金紙灰的試體，無論添加率為多少，它的強度

都明顯低於對照組。圖 25(d)早期階段強度顯示，低添加率有提升強度作用，若添加率太高則產生負面影響，降低抗壓強度。圖 25(e)晚期階段結果：當添加率增大時，強度隨之趨於線性減低，全數金紙灰水泥砂漿試體都未能達到對照組強度。

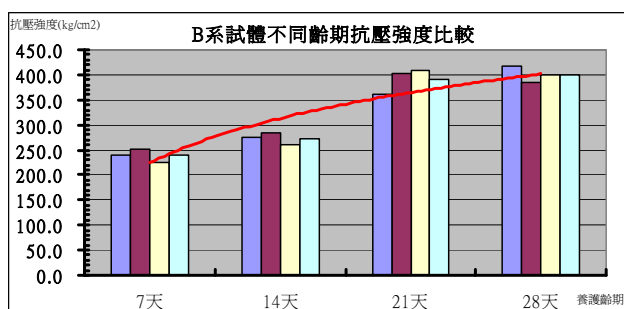


圖 25(a)

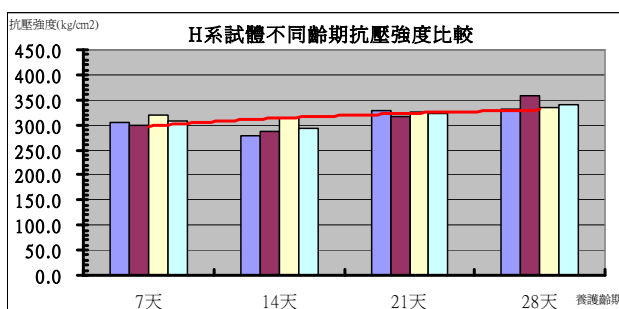


圖 25(b)

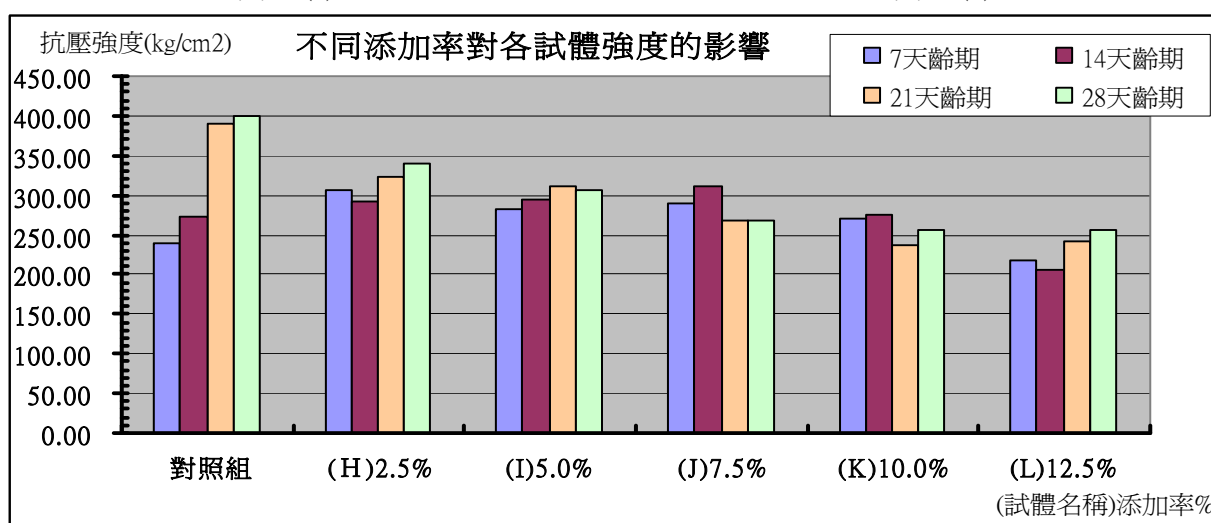


圖 25(c)

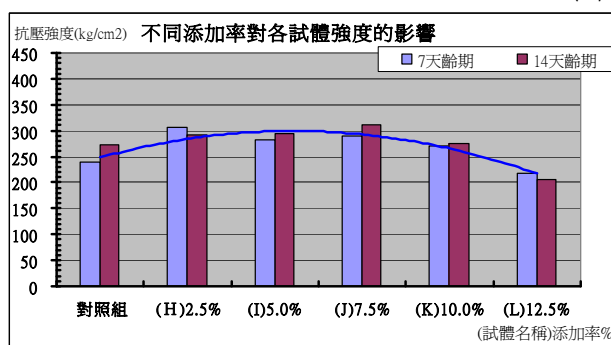


圖 25(d)

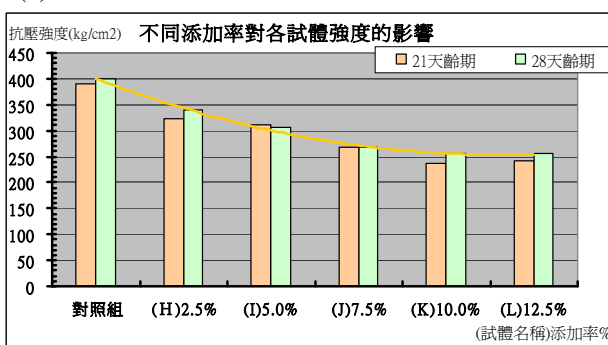


圖 25(e)

圖 25 不同添加率與 B 組試體抗壓強度比較圖

經過小組討論後發現，飛灰之所以能應用於混凝土中取代部份水泥，主要原因為飛灰具有卜作嵐反應活性，其成份中高量的  $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，可與水泥水化產生之  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  發生化學反應<sup>註3</sup>，生成緻密的 C-S-H 膠體，此即卜作嵐反應可使混凝土孔隙更加緻密化，有助提升耐久性、晚期強度的原因。而金紙灰屬紙類燃燒產物，根據前述實驗分析得知，

註3 公共工程飛灰混凝土使用手冊之介紹（上）



金紙灰含有  $\text{SiO}_2$  (18.08%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12.23%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1.30%)、 $\text{CaO}$  (39.79%) 等，與一般水泥、飛灰、礬土水泥的化學成分相比較，如表 16 所示。與一般卜特蘭水泥相比：金紙灰的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量明顯偏高，雖然還未達礬土水泥 40%，仍可能是造成試體早期強度偏高的原因之一。再者，一般火力發電副產品飛灰，含有一半以上的  $\text{SiO}_2$ ，且鮮少含有  $\text{CaO}$ ，但是本研究之金紙灰氧化鈣含量高達 40%，這將有助於早期水化反應速率的提高，故推論添加金紙灰試體早強現象的主因即源於此。當然，我們亦無法排除，早強的原因或許也和燒失量太高有關，由於燒失量吸取部分水量，造成水灰比降低，間接致使早期強度變高。而這些未燒失部分於微結構當中形成弱面，則造成晚期強度不足。再者，一般混凝土中氧化鉀與氧化鈉的含量不可大於其 0.6%。在我們討論中發現，可能由於金紙灰氧化鉀、氧化鈉的含量大過於一般水泥所能含有的用量，易與帶有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  活性之骨材產生化學變化生成類似「水玻璃」之物，使混凝土產生破裂崩潰等現象，造成混凝土的鹼骨材反應，破壞了其應有的抗壓強度，使得數據中的晚期強度表現欠佳。

表 16 金紙灰與常見水泥成分比較

%	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
金紙灰	18.08	12.23	1.3	39.79	2.51	2.18	0.48	2.00
普通卜特蘭水泥 <sup>註4</sup>	21.6	5.3	3.4	64.5	1.4	2.1	0.46	0.23
飛灰 <sup>註3</sup>	45.1	17.1	4.91	6.41	1.45	0.8	0.37	0.05
礬土水泥 <sup>註5</sup>	5	40	15	40				

<sup>註4</sup> 邱玟韶 (民 93)。焚化灰渣取代部分水泥生料燒製環保水泥之可行性研究。雲林科技大學營建工程系碩論。

<sup>註5</sup> 劉叔松。建築材料 I。旭營文化事業

## 五、金紙灰對水泥砂漿試體耐久性的影響

表 17 金紙灰水泥試體耐久性實驗

金紙灰水泥試體泡硫酸鈉前後烘乾之重量										
試體	前重量 kg	後重量 kg	試體	前重量 kg	後重量 kg	試體	前重量 kg	後重量 kg	前平均值	後平均值
A1	0.286	0.290	A2	0.284	0.288	A3	0.284	0.288	0.285	0.289
B1	0.282	0.288	B2	0.280	0.286	B3	0.282	0.288	0.281	0.287
C1	0.281	0.286	C2	0.279	0.284	C3	0.281	0.286	0.280	0.285
D1	0.281	0.288	D2	0.277	0.284	D3	0.277	0.284	0.278	0.285
E1	0.255	0.262	E2	0.260	0.266	E3	0.261	0.268	0.259	0.265
F1	0.271	0.278	F2	0.269	0.278	F3	0.269	0.278	0.270	0.278
G1	0.265	0.274	G2	0.265	0.274	G3	0.269	0.278	0.266	0.275
H1	0.281	0.292	H2	0.281	0.294	H3	0.283	0.294	0.282	0.293
I1	0.280	0.290	I2	0.279	0.290	I3	0.280	0.290	0.280	0.290
J1	0.280	0.290	J2	0.280	0.290	J3	0.281	0.292	0.280	0.291
K1	0.261	0.272	K2	0.266	0.276	K3	0.264	0.274	0.264	0.274
L1	0.278	0.288	L2	0.279	0.288	L3	0.279	0.290	0.279	0.289

表 18 金紙灰水泥試體耐久性抗壓強度實驗

抗壓強度試驗							結果分析	
試體	重量 kg	試體	重量 kg	試體	重量 kg	平均值	<p>1. 由於硫酸鈉內硫酸根離子與金紙灰、水泥內的 CaO 成化學反應出石膏，因此泡硫酸鈉前烘乾重量比泡後烘乾重量輕。</p> <p>2. 從試體觀察得知，泡硫酸鈉後之試體表面並無明顯之損壞，且取適量之金紙灰與水泥混合使用可幫助強度及減少耐蝕性。</p> 	
A1	9528	A2	9396	A3	9240	9388		
B1	8240	B2	8364	B3	8424	8343		
C1	7344	C2	7392	C3	7392	7376		
D1	5484	D2	5253	D3	5535	5424		
E1	3945	E2	4152	E3	4032	4043		
F1	3303	F2	2856	F3	3240	3133		
G1	2991	G2	3151	G3	2820	2987		
H1	7266	H2	7668	H3	7968	7634		
I1	7272	I2	6780	I3	7044	7032		
J1	6528	J2	6768	J3	6633	6643		
K1	6120	K2	6537	K3	6444	6367		
L1	6240	L2	6504	L3	6681	6475		

## 六、改良式水泥砂漿之經濟效益討論

由上述討論得知：不同替代率、添加率之金紙灰對水泥砂漿強度具有不同的影響，由於前者皆使抗壓強度下降，無法全然以金紙灰取代水泥膠結角色，在經濟評估的分析上，我們僅以添加之模組進行後續成本計算，欲簡易呈現改良式水泥砂漿的經濟效益。

### （一）各材料之市場價格

	水泥	砂
市場價格	一包（50kg）≒150 元	一方（1m <sup>3</sup> ）≒800 元
換算	⇒ 一公噸=3000 元	⇒ 一公噸=600 元
	⇒ 一公斤= 3 元	⇒ 一公斤=0.6 元
備註：市場價格乃是電訪數家南部營造施工廠商所得		

### （二）改良式水泥之經濟效益討論：以一公噸水泥砂漿為例

依本研究不同添加率之實驗模組（H～L 組）配比，以各材料之市場單價計算一公噸改良式水泥砂漿之總價，如表 19、表 20 所示，其中本研究將金紙灰視為廢棄物再利用，假定其成本為零。

以 B 組為對照組，分別計算各試體的成本效益及強度效益：

$$\text{成本效益} = \frac{B\text{試體總價} - X_i\text{試體總價}}{B\text{試體總價}} \times 100\% \quad , \quad \text{其中 } X_i \text{ 為 H} \sim \text{L}$$

$$\text{強度效益} = \frac{X_i\text{試體抗壓強度} - B\text{試體抗壓強度}}{B\text{試體抗壓強度}} \times 100\% \quad , \quad \text{其中 } X_i \text{ 為 H} \sim \text{L}$$

表 19 不同金紙灰添加率之每公噸水泥砂漿成本列表

試體	添加率 (%)	配比			重量(kg)			各材料成本		總價格 (元)	效益 (%)
		水泥	金紙灰	砂	水泥	金紙灰	砂	水泥 (元)	砂 (元)		
B	—	1	—	3	250	—	750	750	450	1200	—
H	2.5	1	0.1	3	243.90	24.39	731.71	732	439	1171	2.42%
I	5.0	1	0.2	3	238.10	47.62	714.29	714	429	1143	4.75%
J	7.5	1	0.3	3	232.56	69.76	697.67	698	419	1117	6.92%
K	10.0	1	0.4	3	227.27	90.91	681.82	682	409	1091	9.08%
L	12.5	1	0.5	3	222.22	111.11	666.66	667	400	1067	11.1%

H 組金紙灰添加率 2.5% 的情形下，早期強度效益提升近 30%，晚期強度約減低 15%，整體材料成本可微幅降低 2.4%，對需要早強的工程富有應用價值。

其他 J、K、L 組，雖然晚期強度效益相對於 B 組有 30% 以上的降幅，但在成本效益的表現上，幾乎皆有近 7% 以上的成效，若能根據不同使用目的之需求，在強度與價格上選取適當之平衡點，就可獲得最佳之材料配比，同時兼顧材料性質及工程成本的雙重考量！

表 20 不同金紙灰添加率之成本效益與強度效益

	B	H	I	J	K	L
經濟效益	—	2.42%	4.75%	6.92%	9.08%	11.1%
早期強度效益(7 天)	—	28.38%	24.04%	21.40%	12.66%	-9.43%
晚期強度效益(28 天)	—	-15.11%	-23.46%	-33.16%	-36.17%	-36.23%

## 柒、結論

透過上一章節的討論分析，第一階段由文獻回顧：

- (一) 金紙成分有紙漿、木屑、染料、錫箔、金油、紅花膏等，以回收廢紙為主要原料。
- (二) 本省金紙約可分五至十二種，本研究取自南部某朝天宮，主要有：天公金、壽金、補運金、發財金等普遍常使用的紙錢。
- (三) 目前各環保局積極推動金紙回收計畫，將便於此材料再利用之取得。

透過實驗我們獲得以下幾點結論：

- 一、飽和金紙灰溶液為弱鹼性，將不改變原始水泥砂漿、混凝土之鹼性特質
- 二、金紙灰化學成分： $\text{SiO}_2$  (18.08%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12.23%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1.30%)、 $\text{CaO}$  (39.79%)、 $\text{MgO}$  (2.51%)、 $\text{SO}_3$  (2.18%)、 $\text{K}_2\text{O}$  (0.48%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (2.00%)
- 三、本研究利用職校有限資源之簡易實驗設計具有一定之穩定性與效度
- 四、以金紙灰取代部分水泥將顯著降低水泥砂漿試體各齡期的抗壓強度，且隨著替代率提高，抗壓強度逐漸降低。隨著齡期增長，與對照組相比，強度減低率擴增。
- 五、添加適當比例的金紙灰（添加率 2.5、5.0、7.5%）對水泥砂漿早期抗壓強度有正向提升的效果。最高可提升近 30%。推測應是成分中的氧化鈣產生初期水化反應，有效提供早期強度。然而添加過量金紙灰則造成反效果，減低水泥砂漿抗壓強度。
- 六、對晚期強度而言，所有有添加金紙灰的試體，無論添加率為多少，強度都明顯低於沒有添加金紙灰的對照組。推測應與成分中的鹼性物質及燒失量太大有關。
- 七、改良式水泥砂漿之經濟效益、強度效益如圖 26、圖 27 所示

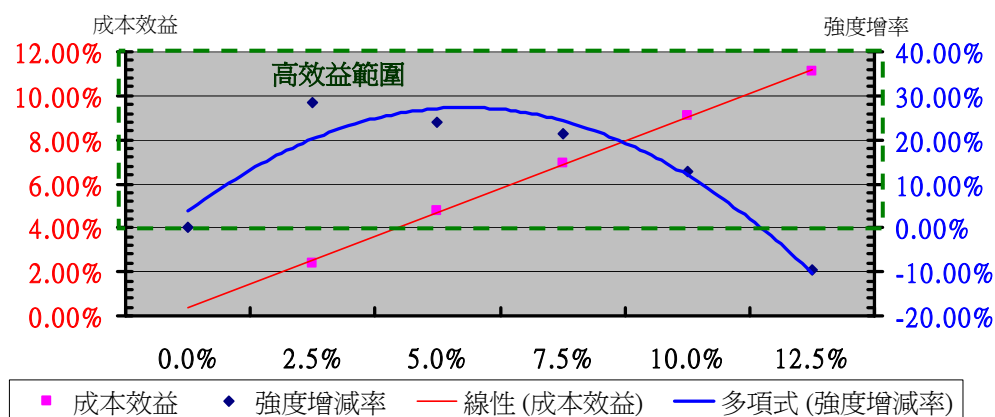


圖 26 改良式水泥砂漿經濟效益、7 天強度效益參考圖

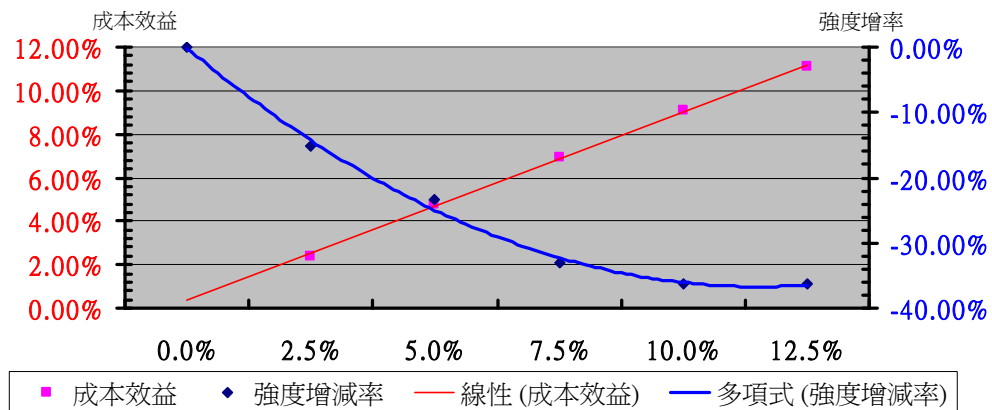


圖 27 改良式水泥砂漿經濟效益、28 天強度效益參考圖

本實驗除了添加低量金紙灰時，能節省成本同時亦能提升早期強度；其他不同金紙灰替代率或添加率過大的實驗結果，雖然在抗壓強度表現上略為降低，但就環境保護、資源再生利用及節約工程成本的角度來說，仍具有實用價值；整體而言，本研究試體的晚期強度普遍不佳，部分導因於我們所取得的金紙灰是直接來自寺廟燃燒金紙後的灰燼，只經過簡易的篩析，這應該是屬於所謂的「底灰」，而底灰是一種非均質性混合物，包含熔渣、以及未完全燃燒的有機物質，這些雜質可能影響其晚期強度降低，若能在原料取得上獲得改進、或在取得後進行加工，配合縣市環保局金紙回收政策之大量來源，將有助於此一本土特有產物的再利用。在一般建築工程中，無論磚砌工程、泥水工程，水泥砂漿用量都佔有極大比例，若能依不同使用目的，在允許強度範圍找尋適當強度之相應材料配比，「金紙灰水泥砂漿」就能成為經濟又環保的本土材料來使用。

## 捌、參考資料及其他

劉叔松。建築材料 I。旭營文化事業

杜清遠（89）。施工估價。正文出局有限公司

邱展富、陳朱昇、李文仰。建築工程實習 3。儒林圖書公司

中國土木水利工程學會／混凝土編輯委員會（民 90）。混凝土工程施工須知。科技圖書公司  
C N S 水泥砂漿試體規範

吳卓夫、葉基棟原著 吳卓夫、黃立昌增訂（民 80）。營造法與施工（下冊）。茂榮圖書公司

中國土木水利工程學會（民 94）。混凝土工程施工規範與解說。科技圖書股份有限公司

水分子集團（無日期）。減縮處理對水泥砂漿性能影響之探討。民 96 年 2 月 24 日，取自：  
<http://www.kyu.edu.tw/kyitpage/paper/Documents/e/pdf/90-109.pdf>

Sika Taiwan Ltd. | Taiwan。水泥砂漿添加劑。（民 93）。民 96 年 2 月 24 日，取自：  
<http://www.sika.com.tw/tw-con-pd-sec4-2.htm>

吳文龍（民 90）。電弧爐煉鋼還原渣取代水泥材料之可行性探討。民 96 年 2 月 24 日，取自：  
[http://www.environet.org.tw/publication/monthly10\\_m1.htm](http://www.environet.org.tw/publication/monthly10_m1.htm)

邱玟韶（民 93）。焚化灰渣取代部分水泥生料燒製環保水泥之可行性研究。雲林科技大學營建工程系碩論。

統偉貿易股份有限公司（民 83）。科狀水泥材料。民 96 年 2 月 24 日，取自：  
<http://www.tondalee.com.tw/link4.htm>

詹穎雯、柴希文（無日期）。飛灰混凝土。民 96 年 2 月 24 日，取自：  
[http://www.pcc.gov.tw/PCCWeb2/upload/files/5/g\\_5.doc](http://www.pcc.gov.tw/PCCWeb2/upload/files/5/g_5.doc)

湛淵源（民 94）。輕質骨材混凝土研究介紹。民 96 年 2 月 24 日，取自：  
<http://www.twce.org.tw/info/%A7%DE%AEv%B3%F8/245-2-1.htm>

工程施工維護（無日期）。奇摩網。民 96 年 2 月 24 日，取自：  
[http://water.nchu.edu.tw/main/ler\\_ebook/soilwater4/engin/L3.html](http://water.nchu.edu.tw/main/ler_ebook/soilwater4/engin/L3.html)

【評語】

091201

讓神明保佑“泥”！金紙灰水泥砂漿

試體試驗

本作品利用民間「拜拜」儀式中燒各類金紙之殘餘金紙灰滲入水泥砂漿拌合，以探討其強度為行。探討過程佐以電子儀器分析其研究步驟合理可信，唯水泥材料硬化過程之化學反應之理論並未詳加探討。唯其廢物利用於綠色建材之概念乃具創意性，且以台灣民間燒金紙之習俗引入研究題材中尤其具有鄉土觀念，值得鼓勵。