

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 生活與應用科學科

第三名

080810

六隻小豬的夢想屋

— 「三合土」灰漿探討與古建築復舊

學校名稱：嘉義市東區民族國民小學

作者：	指導老師：
小六 蔡幸好	杜明展
小六 杜靜云	陳映均
小六 簡愷廷	
小六 楊舒涵	
小六 邱慈茵	
小六 侯冠佑	

關鍵詞：三合土、灰漿、古建築

摘要

我們的研究主要探討古建築「三合土」灰漿的施作與應用，並以實驗所得的「三合土」灰漿進行古蹟復舊。研究過程中，分別就「不同白灰配比」、「添加不同纖維材料」和「養灰」三個實驗變因進行灰漿的力學性質測試，希望由實驗過程得到灰漿的最適配比。進而針對「三合土」灰漿與現代建材—水泥的力學性質進行比較，並實際搭建古蹟建築。

研究結果顯示：(1) 內層灰漿重量配比为，蚵殼灰：水：糯米漿：糖漿：麻絨絲=1：0.4：0.4：0.05：0.005。(2) 外層灰漿重量配比为，石灰（養灰）：糯米漿：糖漿：麻絨絲=1：0.4：0.05：0.005。(3) 「三合土」灰漿在黏結力、結構強度透氣性三種建築需求上均優於水泥。(4) 「三合土」灰漿可應用於古蹟建築的復舊與修復。

壹、研究動機

在一次校外教學的參觀活動中，我們到訪了台南著名古蹟—熱蘭遮城。當地耆老介紹老祖先將糯米煮熟並混以蚵殼灰、糖等材料，製成「三合土」灰漿作為建築灰漿。而這座建於1624年的熱蘭遮城迄今仍屹立不搖的站立在安平港邊，顯示了老祖先們的建築智慧與「三合土」的耐久性。此外，我們獲悉「三合土」古建築的特別之處，在於以「三合土」所製作的牆面是會呼吸的牆面，能避免壁癌、牆面吸濕…等情形產生。這不禁引發了我們對「三合土」古建築的興趣，希望可以復舊「三合土」灰漿的原配比，探討灰漿的基本力學性質，並在其中添加農村廢棄的纖維材料，製作出更具實用性與環保概念的建築灰漿。

貳、研究目的

- 一、探討古建築「三合土」灰漿的材料成分與建築工法
 - (一) 「三合土」灰漿的材料成分分析與施作流程
 - (二) 「三合土」灰漿與建築結構之關係
- 二、探討「三合土」灰漿的最佳配比
 - (一) 「白灰配比」對「三合土」灰漿力學性質之影響
 - (二) 添加「不同纖維材料」對「三合土」灰漿力學性質之影響
 - (三) 「養灰」對「三合土」灰漿力學性質之影響
- 三、「三合土」與水泥基本力學性質之比較
- 四、以「三合土」灰漿實際進行古建築的復舊

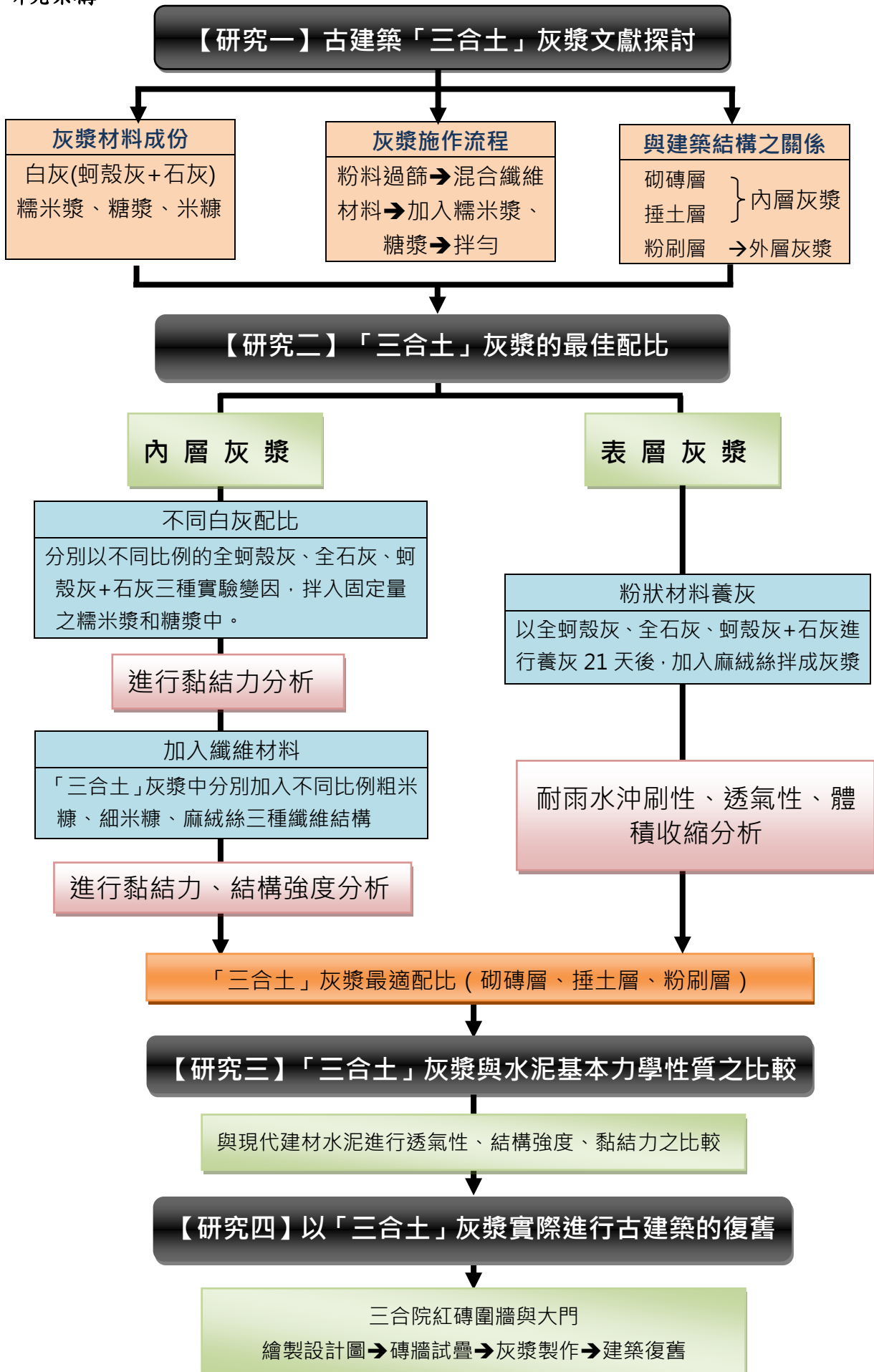
參、研究設備與器材



糯米粉	蚶殼灰	石灰	紅糖	粗米糠
細米糠	麻絨絲	砧碼	木條	小鐵釘
電子秤	量杯	美工刀	攪孔器	冰棒棍
抹布	氣球	奇異筆	水泥	玻璃棒
棉線	尺	燒杯	酒精	酒精燈
塑膠積木	橡膠模具	養樂多瓶	滴管	烤箱
A3 木板	量筒	吸水海綿	紅磚塊	磚瓦片
水桶	S 型掛勾	螺絲掛勾	抹刀	養灰水桶
捲尺	砂紙	鐵製支架	針車油	篩網

肆、研究架構及方法

一、研究架構



文獻探討

實驗進行與分析

應用性探討

二、各項研究方法說明

【研究一】古建築「三合土」灰漿文獻探討

(一) 探討古建築「三合土」灰漿的材料成分

綜覽相關研究資料後，我們發現就熱蘭遮城的部份，台灣縣誌（1807）提及，「台灣城，在安平鎮一鯤身，沙磧孤浮海上。……大抵比城磚砌，層疊悉以糖水糯米搗灰傳之，堅不可劈。」，說明熱蘭遮城磚砌是用白灰、糯米漿、糖漿混合而成；其中白灰可依其來源分為礦物性「石灰」及生物性「蚵殼灰」（馮佳福，2003）。傅朝卿（2001）在「台南市古蹟與歷史建築總覽」則更清楚的說明，熱蘭遮城是由糯米汁、糖漿、蚵殼粉等材料混合磚砌而成。因砌磚材料主要成分為糯米漿、糖漿、蚵殼粉三項，故稱為「三合土」灰漿。此外，台灣早期屬農村社會，建築工匠會在「三合土」灰漿中加入稻殼作為填充料。有關「三合土」建材的成份、功能及應用對象如下表。

表一：「三合土」建材的成份、功能及應用對象表

建材	功能	化學成分	應用於傳統磚砌建築之特色
蚵殼灰	黏著料	CaO、CaCO ₃ …等	常見於濱海地區磚造建築
石灰	黏著料	CaO、MgO…等	土埆磚(極少數)、紅磚、斗子砌磚造建築為主
糯米漿	黏著料	澱粉類之碳水化合物	公共建築(城堡、砲台基座、橋樑)、大戶人家之建築
糖漿	黏著料	多糖類之碳水化合物	土埆磚、紅磚、斗子砌磚造建築為主
稻殼	填充料	粗纖維、灰分、無氮抽出物、粗蛋白質	以土埆磚、紅磚磚造建築為主

(二) 探討「三合土」灰漿施作流程

1. 「三合土」配比

目前針對古建築「三合土」文獻中有正式標準可供依循的資料甚少，在文獻中所見的配比、材料、施工方法皆是透過匠師口述而記錄下來的流程進行相關研究，各地方法不盡相同。因此，我們預試實驗參考周志明(2003)與游晏愷(2007)之研究，以文獻配比白灰：水：糯米漿：糖漿＝1：0.6：0.03：0.01，進行實驗。

2. 「三合土」配置步驟

為了解「三合土」灰漿的配置步驟，我們除了參考周志明(2003)與游晏愷(2007)之研究外，更進一步前往安平探訪當地耆老、匠師，針對文獻的步驟向老匠師討論提問。在向老匠師討教的過程中，我們發現施作流程中有許多細節必須注意與修正。最後，我們統整出「三合土」灰漿正式施作標準流程如下圖。



其中「糯米漿」與「糖漿」的配比如下。

- 糯米漿之製備方法(100g 的糯米漿)：本研究採用日正牌水磨糯米粉來製作糯米漿。
 - a. 先秤出 10g 的糯米粉與 100g 的水。
 - b. 將糯米粉加入水中攪拌均勻。
 - c. 將未煮沸之糯米汁放置於酒精燈上，進行加溫的動作。
 - d. 加熱過程不停地攪拌糯米汁，以免糯米產生結塊之現象；煮至糯米汁呈現黏稠狀，便可將糯米漿秤重，持續煮沸至 100g 重為止即完成。
- 紅糖漿製備法(90g 的紅糖漿)：
 - a. 先秤出 60g 的紅糖與 40g 的水。
 - b. 將紅糖與水混合攪拌。
 - c. 將紅糖水放置於酒精燈上加熱至沸騰，此時須不停攪拌，以免底部紅糖焦掉。
 - d. 紅糖漿沸騰後開始將進行秤重，持續煮至重量 90g 為止。

(三) 「三合土」灰漿與建築結構之關係

在文獻探討的過程中，我們發現「三合土」灰漿的配比與建築結構有關係，主要可分為砌磚層、捶土層、粉刷層。其中粉刷層為增加防水性，過去建築工法會增加養灰的程序。此種建築工法的古蹟在台南、高雄地區相當普遍，如台南神農老街、安平蚵灰寮、高雄鳳山老街。



因此，我們也實際到訪了高雄的三合瓦窯，向當地的古蹟復舊工匠詢問砌磚、捶土層、粉刷層的配比與施作方法。統整後歸納出「三合土」灰漿的配比與建築結構有關係如下。

表二：建築結構與「三合土」灰漿的重量配比表

項目		材料		水	建築需求說明		
		白灰	醱類				
			糯米漿	糖漿			
內層灰漿	砌磚灰漿	1 (蚵殼灰或石灰)	0.032	0.008	適量	0.6	砌磚黏結力 結構強度
	捶土層灰漿	1 (蚵殼灰或石灰)	0.032	0.008	適量	0.6	砌磚黏結力 結構強度
表層灰漿	粉刷層灰漿	1 (需養灰，石灰比例高)	0.032	0.008	適量	0.6	耐沖刷性 透氣性 龜裂程度

【研究二】探討「三合土」灰漿的最適配比





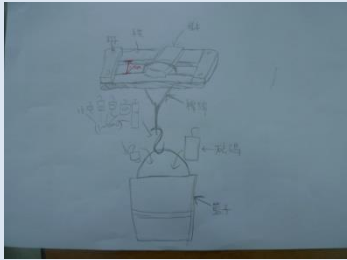
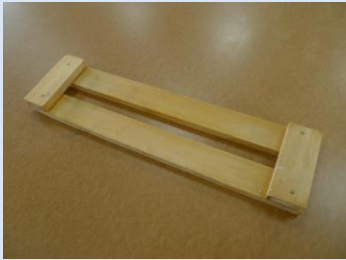






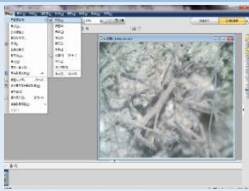
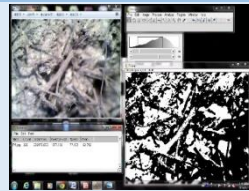
(一) 白灰配比對「三合土」灰漿力學性質之影響

◇黏結力測試方法

製作拉力測試的試體			
			
在積木中點上標記位置鑿洞	將 1g 灰漿試體平均塗抹於 1cm ² 的積木表面	將兩塊積木黏上，直立靜置 14 天	兩端嵌入螺絲掛勾進行拉力測試
拉力測試歷程			
			
將灰漿試體一端掛勾掛上測試支架	試體另一端逐漸加掛砝碼	增加一個砝碼靜待 10 秒	不斷增加砝碼重量，直到兩積木分開，紀錄砝碼總重量

(二) 添加不同纖維材料對「三合土」灰漿力學性質之影響

◇ 結構強度測試方法

製作結構強度測試的試體			
			
將灰漿試體製作完成	將塑膠模具塗上針車油，以方便脫模	將灰漿倒入塑膠模具，靜置 14 天	脫模完成灰漿試體
結構強度測試歷程			
			
自製測試器設計圖	完成自製測試器		
			
將灰漿試體綁上棉線，置於測試器上	於棉線下方加掛小型水桶，並逐一加入砝碼	增加一個砝碼靜待 10 秒	不斷增加砝碼重量，直到灰漿試體斷裂，紀錄砝碼總重量
結構強度顯微鏡分析歷程			
			
將斷裂之灰漿試體以砂紙磨平	以光學顯微鏡針對側面觀察及拍照	將顯微照片以 photoimpact 恢復色階。	以 ImageJ 分析結構材料比例。

(三) 養灰對「三合土」灰漿力學性質之影響

◇耐雨水沖刷性測試方法

耐雨水沖刷性測試試體製作			
			
養灰 21 天，配製粉刷層的「三合土」灰漿	將 3g 灰漿試體平均塗抹於紅磚表面上	靜置 14 天，待其完全乾燥	
耐雨水沖刷性測試歷程			
			
將灰漿試體稱重，紀錄其重量	稱重後的灰漿試體置於固定水流（10ml/s）下，沖水 60 秒	將沖水試體放入烤箱以 120°C 烘烤 30 分鐘	將烤乾之試體稱重，紀錄其重量，與沖水前重量進行比較。

◇透氣性測試方法

透氣性測試試體製作			
			
將圓形塑膠模具塗上針車油，以便脫模。	將灰漿試體填入，高度 0.5cm。	靜置 14 天，待其完全乾燥後脫模進行實驗。	
透氣性測試歷程			
			
割除養樂多瓶底部，將底部外緣與試體以樹脂黏合。	將氣球充氣後，測量由吹口→頂部的周長為 25cm，並以橡皮筋綁緊避免漏氣。	將氣球吹口套置養樂多瓶口，鬆開橡皮筋，開始計時。	漏氣至氣球復原為吹氣前大小時，紀錄透氣的時間。

◇ 體積收縮測試方法

體積收縮試體製作		
		
將立方體塑膠模具塗上針車油，以便脫模。	將灰漿試體填滿模具。	靜置 14 天，待其完全乾燥後進行實驗。
體積收縮測試歷程		
		
分別以 100ml 的水量填入塑膠模具的試體中。	以水將試體收縮之體積填滿	填滿後，逐一紀錄剩餘的水重量。 (100g - 剩餘水量) × 1 = 試體收縮之體積。




伍、研究結果與討論

一、探討古建築「三合土」灰漿材料與施作流程

【實驗一】「三合土」灰漿預試實驗

(一) 實驗步驟

1. 以文獻所歸納的灰漿配比製作灰漿，白灰：水：糯米漿：糖漿=1：0.6：0.03：0.01。

Step1 :	Step2 :	Step3 :	Step4 :
將白灰（蚵殼灰）過篩	配置糯米漿 (降溫至室溫)	配置糖漿 (降溫至室溫)	將蚵殼灰和糯米漿、糖漿、水拌和
			

2. 將實驗過程中所遭遇之問題記錄下來，造訪實際進行古蹟修復的三合瓦窯與安平蚵灰寮，向當地的耆老與工匠討論提問。

瞭解砌磚的方式	老匠師解說「三合土」配比	向老匠師提問討論
		

(二) 實驗結果

1. 預試實驗過程中，發現灰漿的濃稠度不佳，無法黏合積木
2. 養護的過程出現出水、發霉等情形。
3. 經探訪古蹟復舊工匠後，將三合土灰漿的重量配比調整為下：
白灰：水：糯米漿：糖漿=1：0.4：0.16：0.02。
4. 老工匠提醒：糯米漿和糖漿必須在加熱後立即與粉材、填充物混合均勻，及配及用，不可如文獻所說冷卻備用。

二、探討「三合土」灰漿的最適配比

【實驗一】白灰配比對「三合土」灰漿力學性質之影響

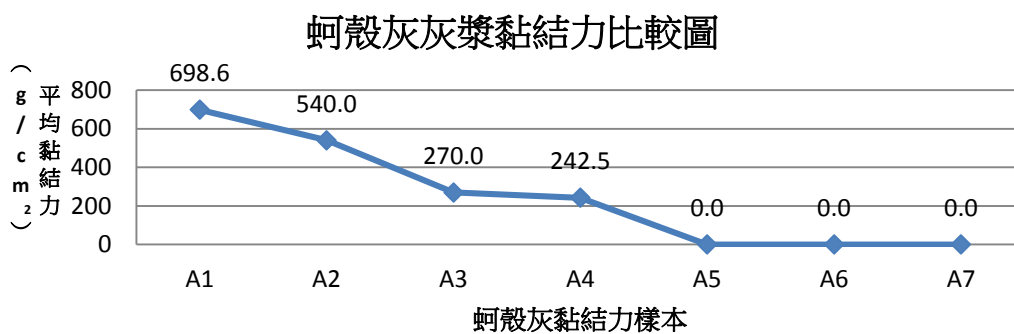
(一) 實驗步驟

1. 使用預試實驗之配方為基準，以白灰配比作為實驗變因進行實驗。
2. 以蚵殼灰為白灰，分別以 40g、60g、80g、100g、120g、140g、160g 之蚵殼灰，加入固定量的糯米漿和糖漿，製成灰漿樣本 A1~A7。
3. 以上述方法，製成全石灰灰漿樣本 B1~B7；以石灰：蚵殼灰=3：1、2：1、1：1、1：2、1：3，製成灰漿樣本 C1~C5。
4. 將每一灰漿樣本製作 7 個黏結力試體，進行黏著力測試。

(二) 實驗結果與討論：

1. 蚵殼灰灰漿平均黏結力之情形

樣本	白灰	糯米漿	糖漿	水	平均黏結力 (g/cm ²)	
全蚵殼灰	A1	40	16	2	16	698.6
	A2	60	16	2	24	540.0
	A3	80	16	2	32	270.0
	A4	100	16	2	40	242.5
	A5	120	16	2	48	0
	A6	140	16	2	56	0
	A7	160	16	2	64	0



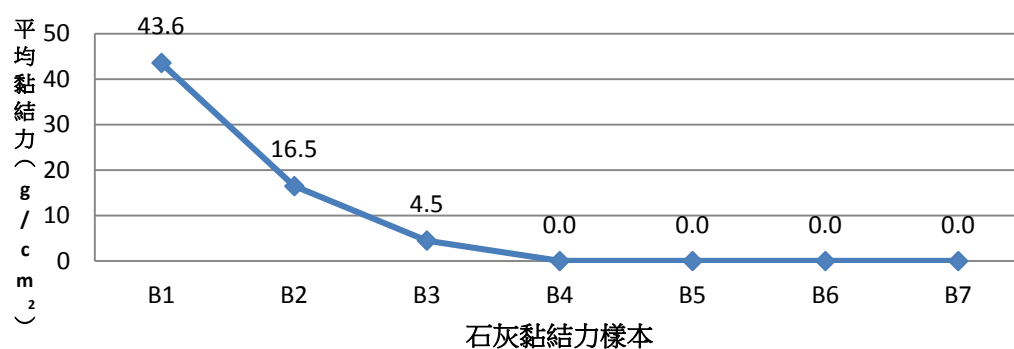
◇ 實驗結果：

- (1) A1 樣本 (蚵殼灰：糯米漿：糖漿=1：0.4：0.05) 的平均黏結力 698.6 g/cm²，效果最好。
- (2) 蚵殼灰的重量配比增加，平均黏著力逐漸下降；增加至 A5、A6、A7 樣本已不具黏結力。

2. 石灰灰漿平均黏結力之情形

樣本	白灰	糯米漿	糖漿	水	平均黏結力 (g/cm ²)	
全 石 灰	B1	40	16	2	16	43.6
	B2	60	16	2	24	16.5
	B3	80	16	2	32	4.5
	B4	100	16	2	40	0
	B5	120	16	2	48	0
	B6	140	16	2	56	0
	B7	160	16	2	64	0

石灰灰漿黏結力比較圖

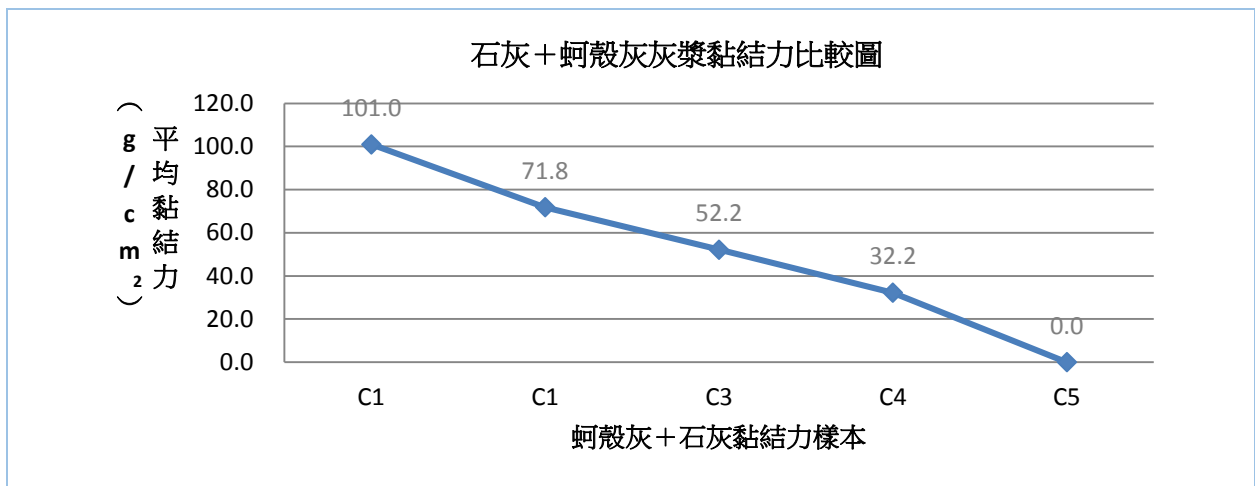


◇ 實驗結果：

- (1) B1 樣本 (石灰：糯米漿：糖漿=1：0.4：0.05) 的平均黏結力 43.6 g/cm²，效果最好。
- (2) 石灰的重量配比增加，平均黏著力逐漸下降；增加至 B5、B6、B7 樣本已不具黏結力。

3. 蚵殼灰+石灰灰漿平均黏結力之情形

樣本	白灰	糯米漿	糖漿	水	平均黏結力 (g/cm ²)	
蚵 殼 灰 + 石 灰	C1	75g 蚵灰+25g 石灰	16	2	40	101.0
	C2	60 g 蚵灰+30 g 石灰	16	2	36	71.8
	C3	50 g 蚵灰+50 g 石灰	16	2	40	52.2
	C4	30 g 蚵灰+60 g 石灰	16	2	36	32.2
	C5	25 g 蚵灰+75 g 石灰	16	2	40	0

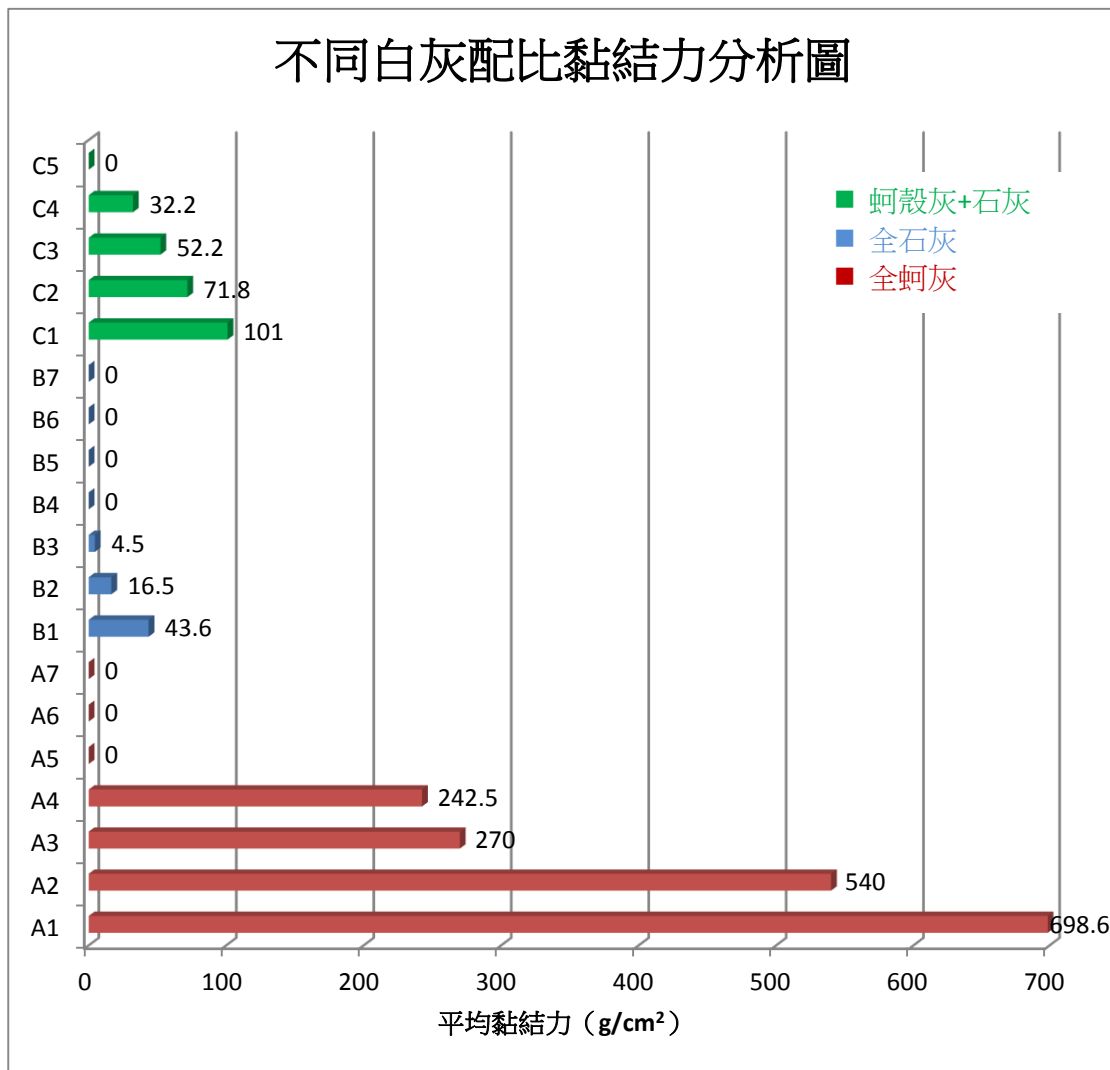


◇ 實驗結果：

(1) C1 樣本 (蚵殼灰：石灰=3：1) 的平均黏結力 101g/cm²，效果最好。

(2) 石灰的重量配比增加，平均黏著力逐漸下降；增加至 C5 樣本已不具黏結力。

4. 不同白灰配比平均黏結力之綜合比較



◇ 實驗結果：

- 1.提高白灰比例，灰漿黏結力會逐漸下降。
- 2.以蚵殼灰為白灰的灰漿，在各種白灰配比中黏結力最好。
- 3.以石灰為白灰的灰漿，在各種白灰配比中黏結力最差。
- 4.添加蚵殼灰在白灰配比中，可以增加灰漿的黏結力。
- 5.不同白灰配比實驗中，以蚵殼灰：水：糯米漿：糖漿=1：0.4：0.4：0.05，平均黏結力最好。

【實驗二】添加不同纖維材料對「三合土」灰漿力學性質之影響

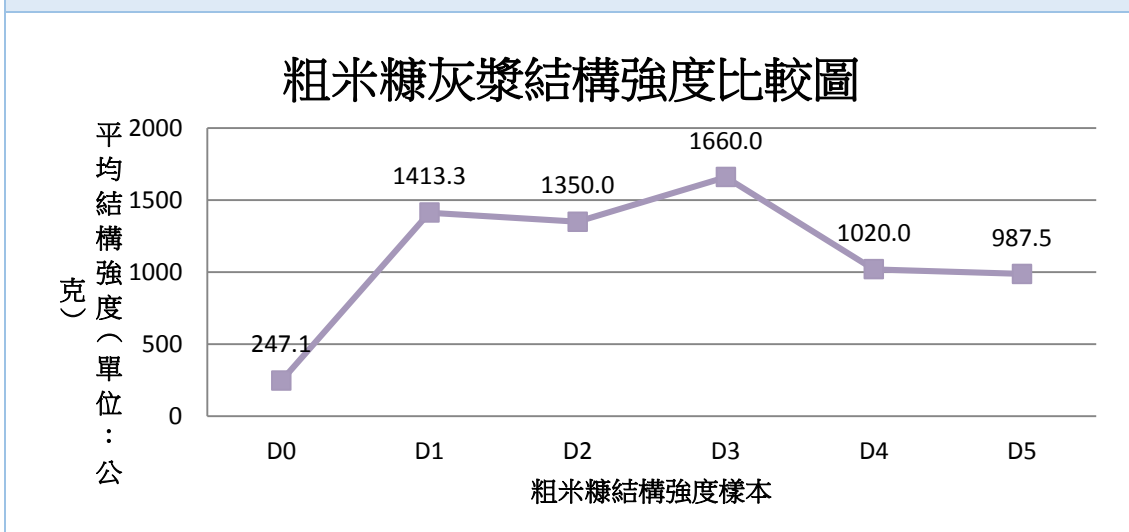
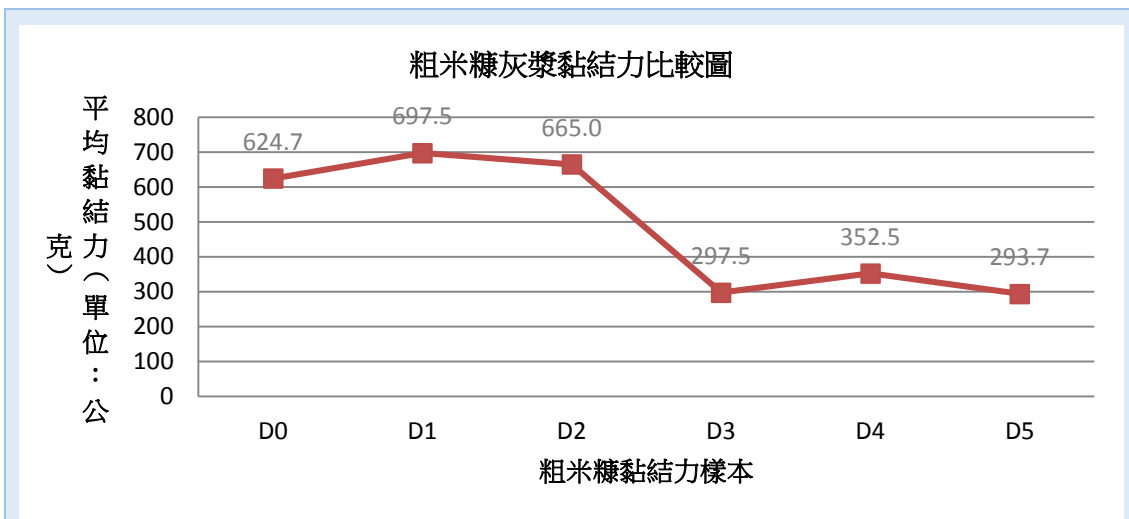
(一) 實驗步驟

1. 使用【實驗一】之實驗結果，以黏結力最佳的灰漿配比，進行添加不同纖維材料實驗。
蚵殼灰：水：糯米漿：糖漿=1：0.4：0.4：0.05。
2. 蚵殼灰與粗米糠 0g（對照組）、2.4g、3g、3.6g、4.2g、4.8g 拌和後，加入固定量的糯米漿和糖漿，製成灰漿樣本 D0~D5。
3. 以上述相同方法，製成細米糠灰漿樣本 E0~E5；麻絨絲灰漿樣本 F0~F5。
4. 將每一灰漿樣本製作 5 個黏結力試體和 5 個結構強度試體，進行黏著力測試。

(二) 實驗結果：

1. 加入粗米糠平均黏結力與結構強度之情形

樣本	蚵殼粉 (g)	粗米糠 (g)	糯米漿 (g)	糖漿 (g)	水 (g)	平均黏結力 (g/cm ²)	結構強度 (g)	
無添加	D0	120	0	48	6	48	624.7	247.1
粗米糠	D1	120	2.4	48	6	48	697.5	1413.3
	D2	120	3	48	6	48	665	1350.0
	D3	120	3.6	48	6	48	297.5	1660.0
	D4	120	4.2	48	6	48	352.5	1020.0
	D5	120	4.8	48	6	48	293.7	987.5



◇ 黏結力

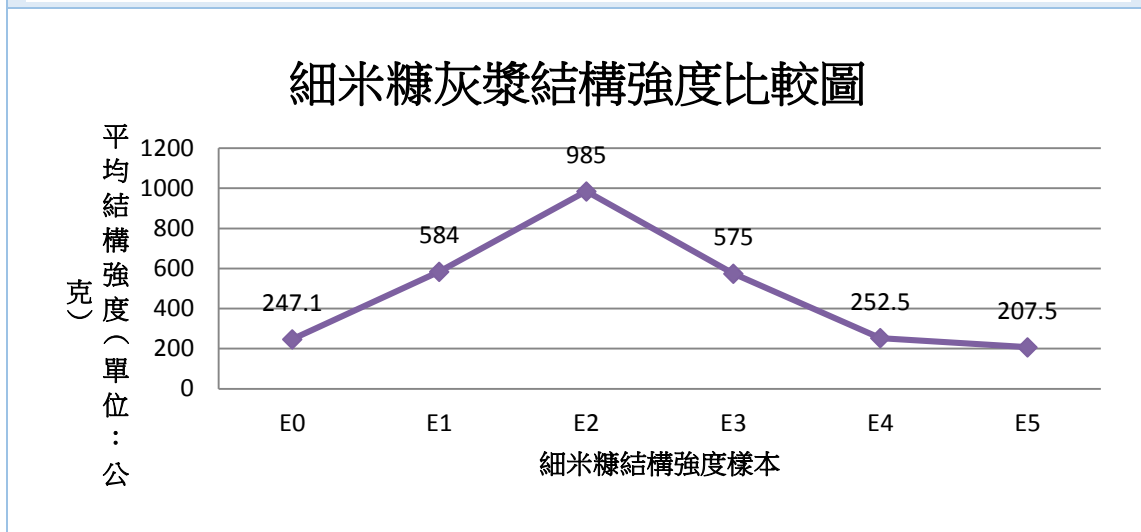
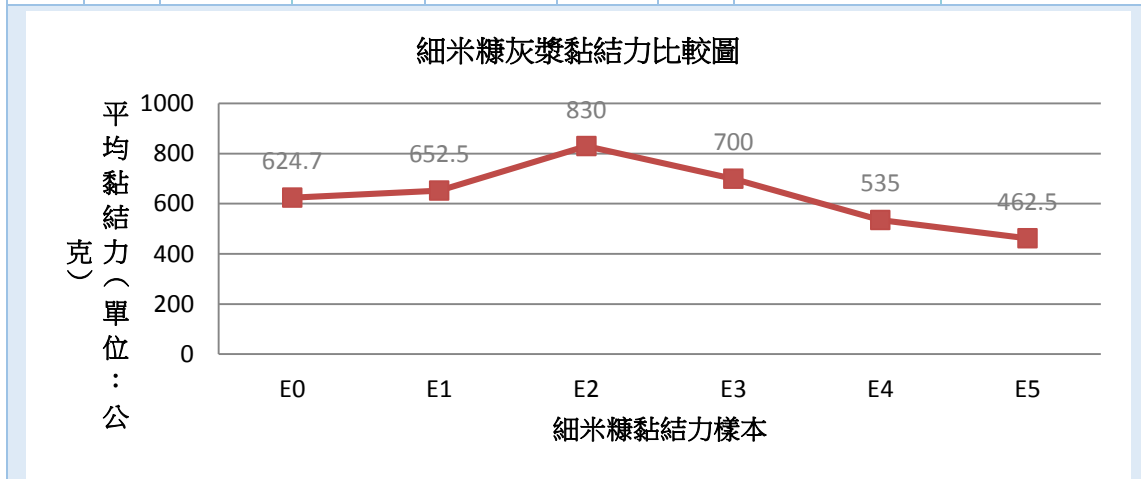
- (1) 灰漿加入粗米糠後的平均黏結力呈現先增後減的趨勢。
- (2) D1 樣本 (粗米糠 2.4g) 的平均黏結力 $697\text{g}/\text{cm}^2$ ，效果最好。
- (3) D0~D1 樣本隨著粗米糠的比例增加，黏著力上升。
- (4) D2 的黏著力已與未添加對照組相當。
- (5) D3~D5 樣本隨著粗米糠的比例增加，黏著力有下降的趨勢。

◇ 結構強度

- (1) 添加粗米糠製成的灰漿，在結構強度上有明顯的增加。
- (2) D3 樣本 (添加 3.6g 粗米糠) 結構強度為 1660g ，效果最好。
- (3) 隨著粗米糠的比例增加，結構強度有下降的趨勢，但仍比未添加的對照組高。
- (4) 加入粗米糠，可使灰漿結構強度增加 4~5 倍。

2. 加入細米糠平均黏結力與結構強度之情形

樣本	蚵殼粉 (g)	細米糠 (g)	糯米漿 (g)	糖漿 (g)	水 (g)	平均黏結力 (g/cm ²)	結構強度(g)	
無添加	E0	120	0	48	6	48	624.7	247.1
細米糠	E1	120	2.4	48	6	48	652.5	584
	E2	120	3	48	6	48	830	985
	E3	120	3.6	48	6	48	700	575
	E4	120	4.2	48	6	48	535	252.5
	E5	120	4.8	48	6	48	462.5	207.5



◇ 黏結力

- (1) 灰漿加入細米糠後的平均黏結力呈現先增後減的趨勢。
- (2) E2 樣本 (細米糠 3g) 的平均黏結力 830g/cm²，效果最好。
- (3) E0~E2 樣本隨著細米糠的比例增加，黏著力上升。
- (4) E3~E5 樣本隨著細米糠的比例增加，黏著力有下降的趨勢。
- (5) E4、E5 樣本平均黏著力已經低於對照組 E0 的平均黏著力。

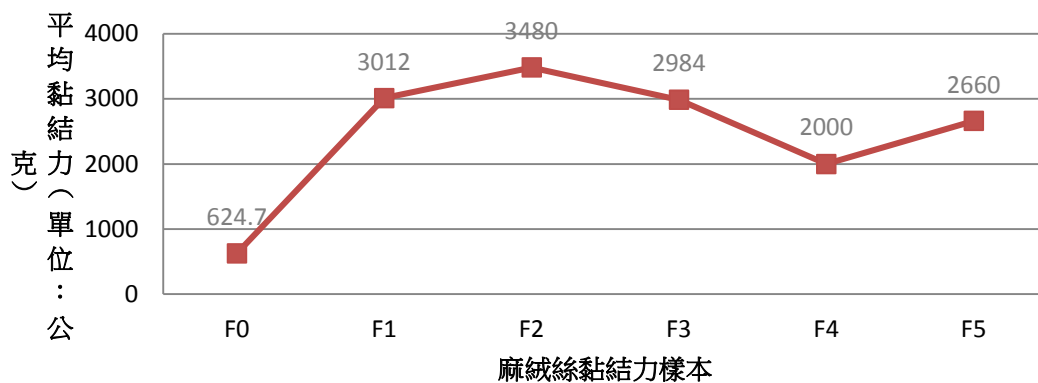
◇ 結構強度

- (1) 添加細米糠製成的灰漿，在結構強度上有明顯的增加。
- (2) E2 樣本 (添加 3g 細米糠) 結構強度為 985g，效果最好；約為對照組的 3 倍。
- (3) E3~E5 隨著細米糠的比例增加，結構強度有下降的趨勢；E4、E5 樣本的結構強度已與對照組相當。

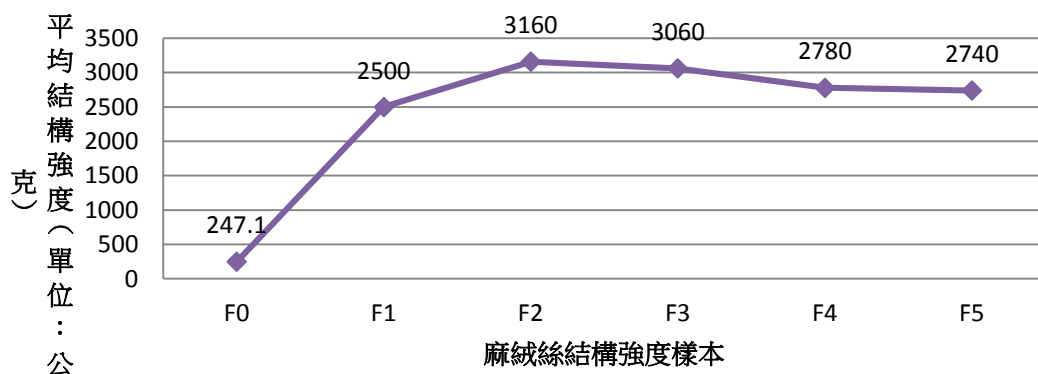
3. 加入麻絨絲平均黏結力與結構強度之情形

樣本	蚵殼粉 (g)	麻絨絲 (g)	糯米漿 (g)	糖漿 (g)	水 (g)	平均黏結力 (g/cm ²)	結構強度 (g)	
無添加	F0	120	0	48	6	48	624.7	247.1
麻絨絲	F1	120	0.6	48	6	48	3012	2500
	F2	120	0.8	48	6	48	3480	3160
	F3	120	1	48	6	48	2984	3060
	F4	120	1.2	48	6	48	2000	2780
	F5	120	1.4	48	6	48	2660	2740

麻絨絲灰漿黏結力比較圖



麻絨絲灰漿結構強度比較圖



◇ 黏結力

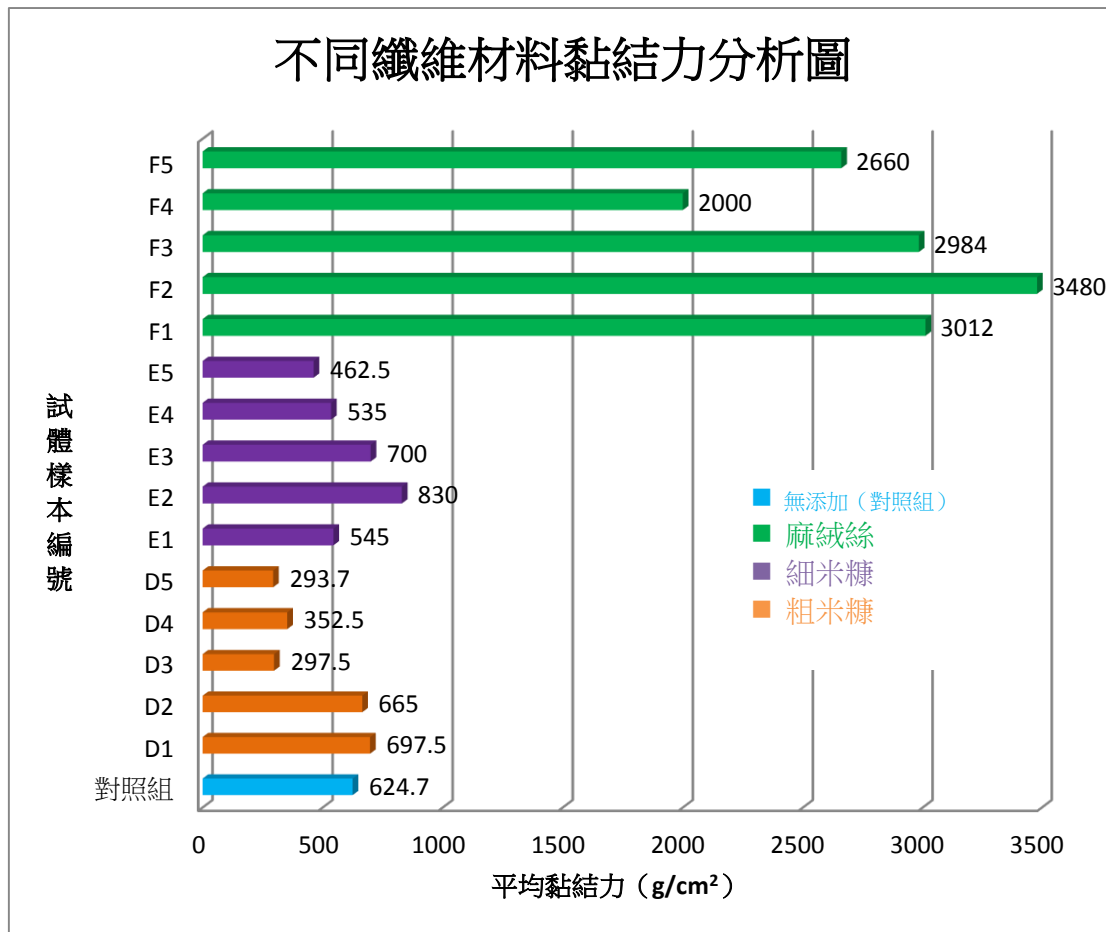
- (1) 灰漿加入麻絨絲後的平均黏結力有顯著的增加。
- (2) F2 樣本（麻絨絲 0.8g）的平均黏結力 $3480\text{g}/\text{cm}^2$ ，效果最好。
- (3) F1~F5 樣本隨著麻絨絲的比例增加，黏著力呈現先增後減的趨勢。
- (4) F3~F5 樣本隨著麻絨絲的比例增加，黏著力有下降的趨勢，但仍比對照組高。
- (5) 灰漿加入麻絨絲後的平均黏結力增為對照組的 4~5 倍。

◇ 結構強度

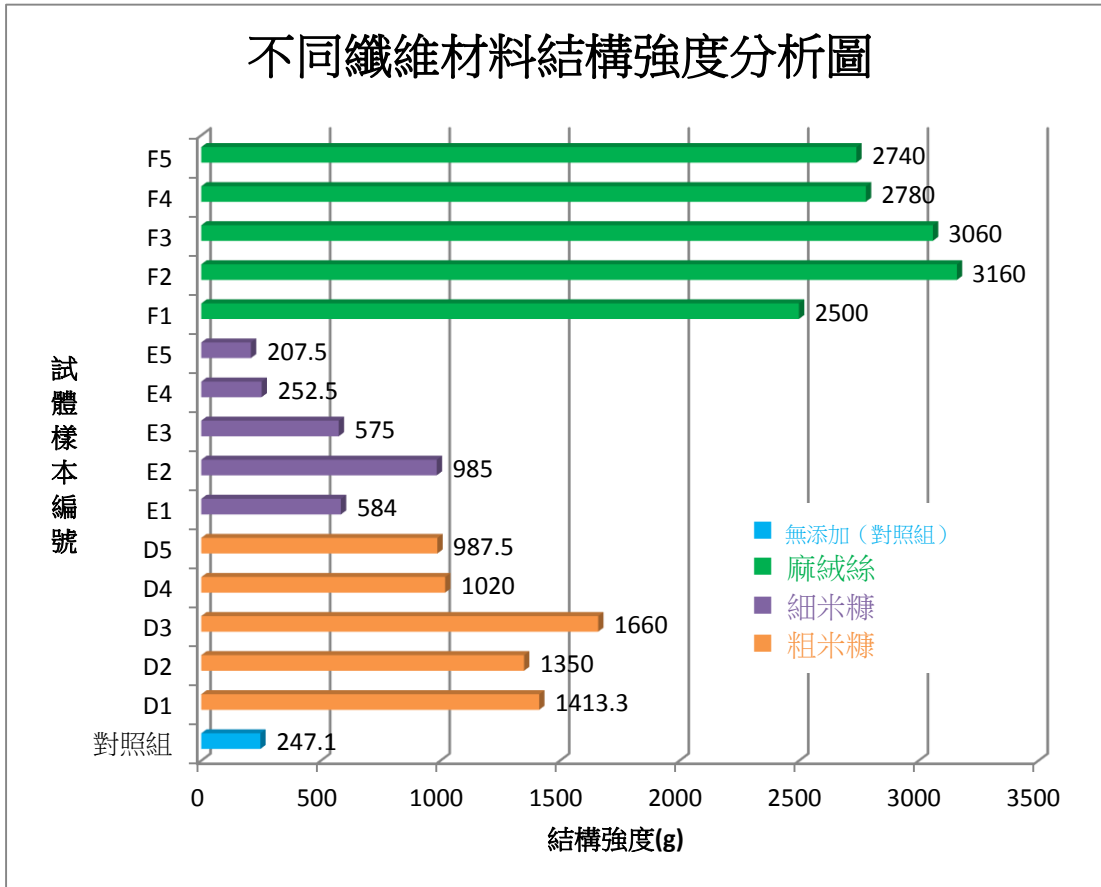
- (1) 添加麻絨絲製成的灰漿，在結構強度上有明顯的增加。
- (2) F2 樣本（添加 0.8g 細米糠）結構強度為 3160g ，效果最好。
- (3) F3~F5 隨著麻絨絲的比例增加，結構強度有些微下降的趨勢；但仍比對照組高。
- (4) 灰漿加入麻絨絲後的平均結構強度增為對照組的 10~12 倍。

4. 添加不同纖維材料平均黏結力與結構強度之綜合比較

● 黏結力綜合比較



● 結構強度綜合比較







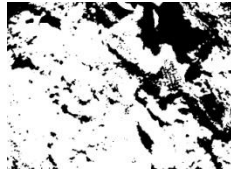
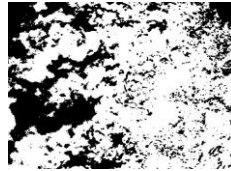
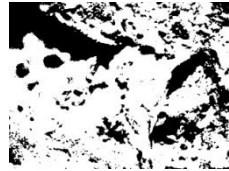



◇ 實驗結果：






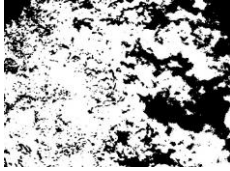
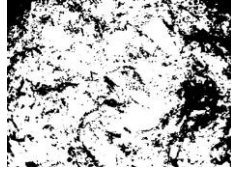
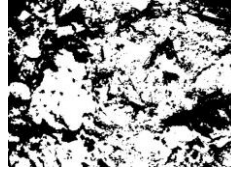
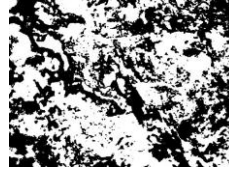
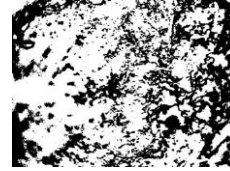
1. 加入不同的纖維材料，可增加黏結力與結構強度；但需按一定的比例添加，若增加過多會有逐漸下降的情形產生。
2. 在加入不同纖維材料的實驗中，以加入麻絨灰的效果最佳。
3. 灰漿中加入麻絨灰，以 F2 (添加 0.8g) 效果最佳。在黏結力可達到 $3480\text{g}/\text{cm}^2$ ，結構強度可達到 3160g。
4. 灰漿中加入細米糠的效果最差，添加量增加多造成黏結力與結構強度均降至與對照組相同，甚至比對照組差的情形。

5. 不同纖維材料之材料比率分析






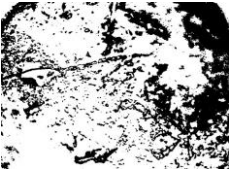

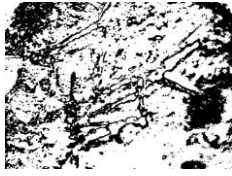
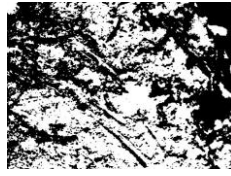

● 加入粗米糠之分析情形

樣本名稱	D1	D2	D3	D4	D5	<ol style="list-style-type: none"> 1. 從顯微照片中可發現粗米糠與蚵殼灰交錯膠結。 2. 斷裂面可觀察到米糠介於斷裂面中間，增加試體兩端的結構強度。 3. 黏結力最好的 D1 樣本，米糠比率約為 31.6%。 4. 結構強度最好的 D3 樣本，米糠比率約為 45.1%。 5. 米糠比例到 50% 左右，黏結力與結構強度開始下降。
斷面顯微照片						
斷面結構材料分析						
結構材料比率	31.6%	39.3%	45.1%	50.2%	59.3%	

● 加入細米糠之分析情形

樣本名稱	E1	E2	E3	E4	E5	<ol style="list-style-type: none"> 1. 從顯微照片中可發現細米糠與蚵殼灰膠結，但較不明顯。 2. 斷裂面可觀察到細米糠突出於斷裂面。 3. 黏結力與結構強度最好的 E2 樣本，米糠比率約為 37.4%。 4. 細米糠比例到 50% 左右，黏結力與結構強度開始下降。
斷面顯微照片						
斷面結構材料分析						
結構材料比率	25.3%	37.4%	44.2%	56.3%	62.4%	

● 加入麻絨絲之分析情形

樣本名稱	F1	F2	F3	F4	F5	
斷面顯微照片						
斷面結構材料分析						
結構材料比率	27.3	36.1	42.3	48.2	52.3	<ol style="list-style-type: none"> 1. 從顯微照片中可發現麻絨絲與蚵殼灰交錯膠結，且麻絨絲彼此也相互纏繞。 2. 斷裂面可觀察到麻絨絲介於斷裂面中間，增加試體兩端的結構強度。 3. 試體中的灰漿部份斷裂時，仍有麻絨絲介於兩端，拉住整個試體結構。 4. 黏結力與結構強度最好的F2樣本，米糠比率約為36.1%。 5. 米糠比例到50%左右，黏結力與結構強度開始下降。

◇ 實驗結果：

1. 從斷面顯微照片中，我們發現麻絨絲體積細長，容易與灰漿膠結在一起。且麻絨絲本身亦有纏繞的情形發生，所以使得整個灰漿試體的黏結力與結構強度較堅固。而粗米糠與細米糠，因為其體積較為短小，導致整體的膠結較鬆散，所以在黏結力與結構強度部份皆不及麻絨絲來的好。尤其是細米糠的在斷面顯微照面部份，若未經色階回覆，幾乎難以分辨灰漿與細米糠。由此可知，纖維材料的選擇以細長的麻絨絲較佳著。
2. 而在纖維材料的比率部份，從分析發現，當纖維材料的比率在30%~39%之間，整體結構強度會最好。當纖維材料的比率超過50%，整體的結構強度會開始下降。
3. 歸納內層灰漿最適重量比例為→蚵殼灰：水：糯米漿：糖漿：麻絨絲=1：0.4：0.4：0.05：0.005。

【實驗三】養灰對「三合土」灰漿力學性質之影響

(一) 實驗步驟

● 養灰

1. 將蚵殼灰、石灰過篩備用
2. 以【實驗二】麻絨配比，將 250 克麻絨絲泡水一天
3. 麻絨絲取出瀝水後放入水桶，加水 5L 搥打至麻絨分散
4. 依實驗變因加入 5kg 的全蚵殼灰、石灰+蚵殼灰(1:1)、全石灰攪拌均勻，製成三種配方的養灰桶。
5. 加蓋靜置沈澱(確認水淹過白灰 5cm)
6. 早晚攪拌一次，21 天後即可使用

● 製作外層灰漿試體

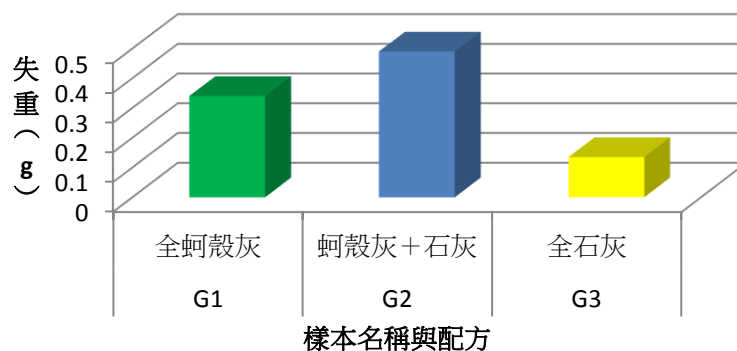
1. 將養好的白灰取出瀝水。
2. 以【實驗一】之配比加入糯米漿、糖漿拌勻，製成外層灰漿。
3. 製作耐雨水沖刷性測試試體 G1~G3，各 8 個；透氣性測試試體 H1~H3，各 8 個；製作體積收縮測試試體 I1~I3，各 8 個。

(二) 實驗結果

● 耐雨水沖刷性測試結果

樣本名稱	養灰配方	平均失重(g)
G1	全蚵殼灰	0.34
G2	蚵殼灰+石灰	0.49
G3	全石灰	0.135

沖水後失重情形比較圖

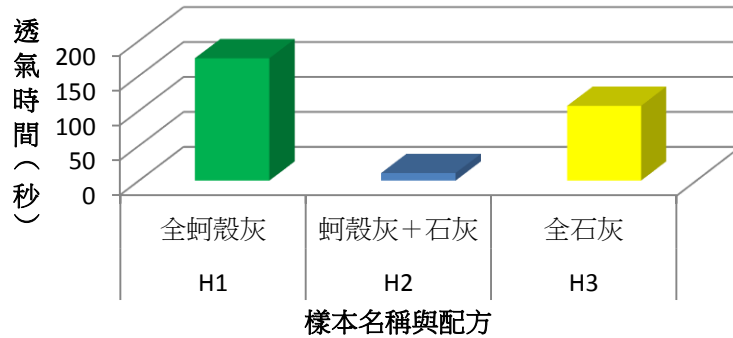


1. 耐雨水沖刷性測試中，以全石灰之樣本失重最少，全蚵殼灰失重次之，蚵殼灰+石灰的樣本失重最多。
2. 全石灰的平均失重最少，表示全石灰進行養灰所製作之表層灰漿的防水效果最好。
3. 依實驗結果可知，就耐雨水沖刷性測驗而言，全石灰之養灰灰漿較適合作為表層灰漿。

● 透氣性實驗結果

樣本名稱	養灰配方	平均透氣時間(s)
H1	全蚵殼灰	175
H2	蚵殼灰+石灰	10.8
H3	全石灰	107

透氣時間比較圖

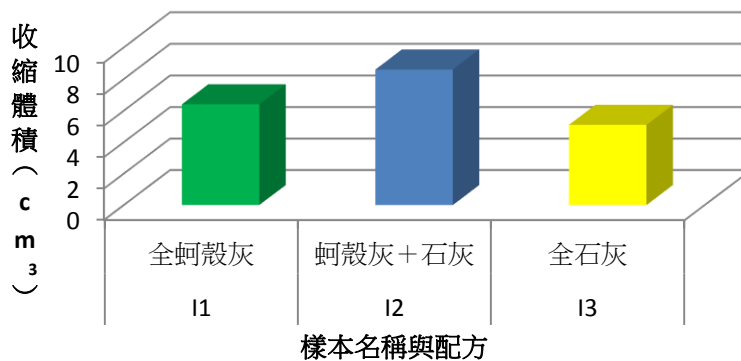


1. 透氣性測試中，以全蚵殼灰之樣本透氣時間最長，全石灰次之，蚵殼灰+石灰的透氣時間最短。
2. 觀察實驗樣本可發現，全石灰與全蚵殼灰的樣本，表面未出現肉眼可見之孔隙，仍有透氣的效果。
3. 蚵殼灰+石灰的樣本出現肉眼可見之孔隙，由此可知此為透氣速度最快的原因。

● 體積收縮結果

樣本名稱	養灰配方	養護後收縮體積(cm ³)
I1	全蚵殼灰	6.4
I2	蚵殼灰+石灰	8.6
I3	全石灰	5.1

體積收縮比較圖



1. 體積收縮測試中，以全石灰之樣本收縮的體積最少，全蚵殼灰次之，蚵殼灰+石灰的收縮的情形最嚴重。
2. 觀察體積收縮試體發現，全石灰的體積收縮試體結構較完整，表面未出現龜裂與孔隙；全蚵殼灰的樣本，在試體邊緣出現裂縫，結構不均勻；蚵殼灰+石灰的樣本則出現表面龜裂，向下凹陷的行情。

综合比較

由文獻探討過程中，我們得知表層灰漿的建築要求，希望表層灰漿能兼具防水、透氣和避免龜裂三項特性。以全石灰養灰的試體，在耐兩水沖刷性的測試上表現最佳。而在體積收縮與透氣性結果的表現上雖居中，但我們進一步觀察試體外觀發現，全石灰的試體的結構較完整，且表面不會出現龜裂的情形。因此，我們綜觀實驗結果可發現，全石灰所製作的養灰試體最適合作為表層灰漿，其配比为→石灰（養灰）：糯米漿：糖漿：麻絨絲=1：0.4：0.05：0.005。

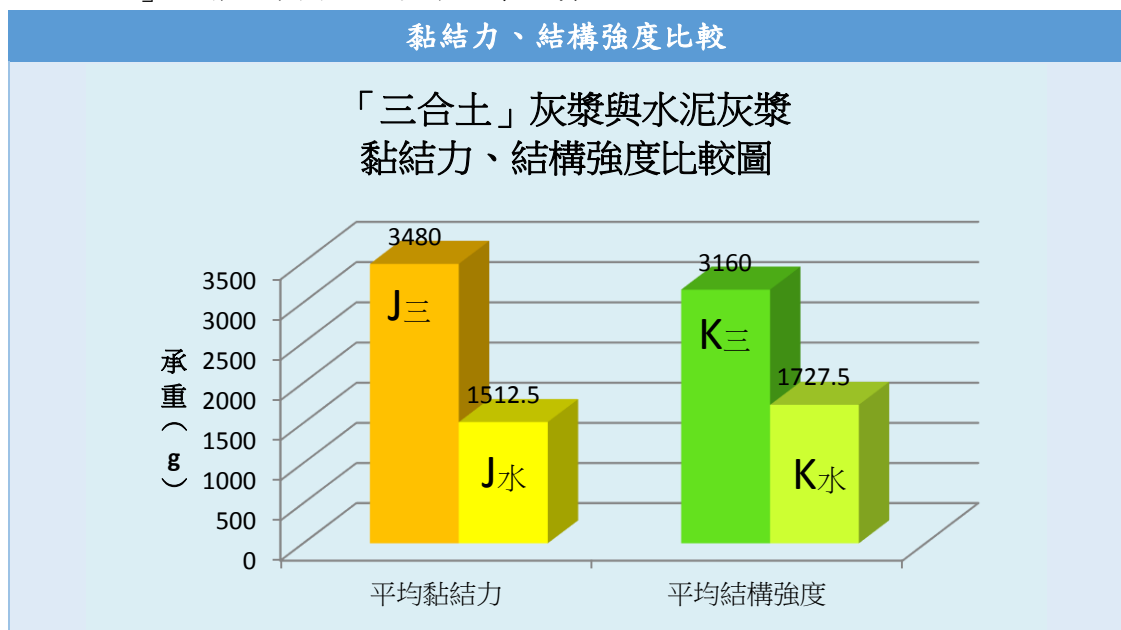
【研究三】「三合土」灰漿與水泥基本力學性質之比較

(一) 實驗步驟

1. 以【研究二】探討的「三合土」灰漿最適配比，配置內層灰漿與外層灰漿。
2. 內層灰漿分別製作黏結力試體 $J_{\text{三}}$ 和結構強度試體 $K_{\text{三}}$ ；外層灰漿製作透氣性試體 $L_{\text{三}}$ ，各 8 個。
3. 使用市售水泥，以 2:1（水泥：水）配製成水泥灰漿。
4. 以水泥灰漿製成黏結力試體 $J_{\text{水}}$ 、結構強度試體 $K_{\text{水}}$ 和透氣性試體 $L_{\text{水}}$ ，各 8 個。
5. 將上述之樣本進行黏結力測試、結構強度測試和透氣性測試。

(二) 實驗結果

- 「三合土」內層灰漿與水泥基本力學性質



1. 在平均黏結力部份，「三合土」灰漿的平均黏結力大於水泥的平均黏結力；
3480g/cm² > 1512.5 g/cm²。
2. 在平均結構強度的部份，「三合土」灰漿的結構強度力大於水泥的結構強度；
3160g > 1727.5g。
3. 以「三合土」內層灰漿力學性質優於水泥。

● 「三合土」外層灰漿與水泥透氣性之比較

平均透氣時間比較		
樣本名稱 實驗次數	L 三	L 水
第一次測試	102s	>4hrs
第二次測試	98s	>4hrs
第三次測試	121s	>4hrs
第四次測試	99s	>4hrs
第五次測試	119s	>4hrs
第六次測試	111s	>4hrs
第七次測試	89s	>4hrs
第八次測試	116s	>4hrs
平均透氣時間	106.1s	>4hrs

1. 「三合土」外層灰漿，平均透氣時間為 106.1 秒；水泥試體的平均透氣時間大於 4 小時，在 4 小時期間，氣球完全沒有透氣消退。
2. 以「三合土」外層灰漿透氣性比水泥佳。
3. 由文獻探討中，我們發現現代建築中常常會發生壁癌、牆壁吸濕等情形，往往是因為水泥材料不透氣的結果，而我們的實驗結果也確實呼應到此情形。

【研究四】以「三合土」灰漿實際進行古建築的復舊

(一) 實驗步驟

● 復舊工程前製作業

1. 蒐集三合院建築結構資料，設定復舊範圍為四合院圍牆與門進。



圍牆正面之砌磚方式與結構



圍牆側面之砌磚方式與結構



2. 繪製四合院建築門進、圍牆設計圖，磚塊試堆，確認建築架構。

繪製四合院建築門進、圍牆設計圖



門進磚塊試堆



圍牆正面之砌磚試堆 1



圍牆正面之砌磚試堆 2



● 實際復舊工程

1. 配製內層灰漿，進行砌磚；砌磚完成後，養護 14 天。
2. 配製內層灰漿塗抹在完成之磚牆表面，增加建築結構強度。
3. 待養護 14 天候，配製表層灰漿，粉刷於最外層，完成復舊之建築。



(二) 實驗結果

1. 利用【實驗一】、【實驗二】的灰漿配方，依照古建築的建築工法進行四合院門進和圍牆的搭建，可以完成古蹟的復舊。
2. 在建築過程中，每層灰漿必須經過14天的養護時間，養護的過程必須保持通風，以利灰漿完全乾燥成型。
3. 每次搭蓋建築物時，必須確實估計灰漿的使用量與工程進度，確保建築結構的穩固性。

陸、研究結論

- 一、「三合土」灰漿依建築的結構可分為內層灰漿和外層灰漿。內層灰漿的最適重量配比为，蚵殼灰：水：糯米漿：糖漿：麻絨絲=1：0.4：0.4：0.05：0.005。外層灰漿的最適重量配比为，石灰（養灰）：糯米漿：糖漿：麻絨絲=1：0.4：0.05：0.005。
- 二、「三合土」內層灰漿的白灰部份，以蚵殼灰為白灰黏結效果最佳，添加石灰或以石灰為白灰，則會使黏結力下降。主要原因在於蚵殼是蚵仔將碳酸氫根（ CO_3^{2-} ）與鈣離子（ Ca^{2+} ）在生物體內形成碳酸鈣，並以豐富的動物性膠結物將二氧化碳封存在蚵殼中。因此由蚵殼經高溫燒製而成燒蚵富黏性，可增加灰漿的黏結力。
- 三、在「三合土」灰漿中加入 30%~39%纖維材料可以增加黏結力和結構強度。其中纖維材料多取材自農村的廢棄材料，例如米糠、稻桿…等。由實驗結果可知，纖維材料的選擇上以細長的麻絨絲效果最好，主要是因為麻絨絲在與灰漿攪拌的過程中能充分結合，且麻絨絲也會有彼此纏繞的情形，所以可以大大的提昇灰漿的結構性。
- 四、在「三合土」外層灰漿的部份，經養灰的石灰灰漿表面會產生一層水膜結晶包裹，增加其耐雨水沖刷性的效果與表面的平整性。以蚵殼灰養灰的灰漿，則因容易收縮導致試體表面出現空隙、龜裂的情形。因此，以石灰灰漿較適合作為粉刷層的塗料。
- 五、「三合土」灰漿在黏結力、結構強度、透氣性三種建築結構需求上均優於現代建材-水泥；尤其是在透氣性的部份特別值得注意。因為可藉此改善現代建築容易產生壁癌、牆面吸濕的情形，亦可以增加建築物內外的氣體交換。
- 六、「三合土」灰漿可實際應用於古蹟建築的復舊與修復，以重建過去建築的樣貌與保存祖先們的智慧結晶。
- 七、「三合土」灰漿所使用的蚵殼灰與麻絨絲是屬於農漁村廢棄材料，可達到廢物再利用的概念，實屬具實用性與環保概念的建築灰漿。

柒、參考資料

- 一、黏度大考驗。中華民國四十八屆國民中小學科學展覽會。
- 二、傅朝卿，「台南市古蹟與歷史建築總覽」，台灣建築與文化資產出版社，台南，2001。
- 三、馮佳福，「臺灣傳統屋面灰漿基本性質之研究」，國立成功大學建築研究所，2003。
- 四、周志明，「台灣傳統砌體建築「灰縫」之基礎研究」，國立雲林科技大學，2002。
- 五、游晏愷，「灰漿之配比分析與工程性質研究」，國立成功大學土木工程研究所，2007。

【評語】 080810

該作品提供廢棄物（蚵殼、麻絨絲等）結合生活中易取得膠合物質，除體驗老祖先建築智慧外，並提供建築用綠色建材之選擇，建議可考慮探討台灣高濕高熱之熱帶型氣候對建築穩固性的影響。