

中華民國第 54 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(鄉土)教材獎

091202

小米立大功－糯米橋秘辛之探究

學校名稱：國立員林高級農工職業學校

作者：  職二 許淳媛  職二 張佑瑄  職二 洪麒政	指導老師：  詹雅晶  曾銘文
---	-----------------------------

關鍵詞：糯米橋配比、衝錘試驗、灰分分析

## 摘要

本研究在探討糯米橋灰漿成份與配比，查詢糯米橋相關文獻資料隨後進行田野調查與試驗。田野調查項目包含耆老訪談、結構尺寸量度、灰漿非破壞性試驗錘試驗、取樣等；化學檢驗分析包含灰分含量及鈣含量之測定，根據化學檢驗分析的含量數據進行糯米橋灰漿的配比實驗，試驗出最符合目前糯米橋的性質與強度的灰漿配比。

實驗結果得知糯米橋灰漿灰分含量約佔 93%~96%、有機物含量約佔 4%~7%、鈣含量約佔灰分含量 1%~14%，由此推測糯米橋灰漿之主要成分非為糯米及黑糖，而是黏土及石灰。然而在抗壓及抗彎之強度試驗中發現，糯米橋灰縫強度並不高，抗壓強度約為  $7.911\text{kgf/cm}^2$ 、抗彎強度約為  $1.119\text{kgf/cm}^2$ ，與本實驗試體測試結果相近。最後建議以糯米 3.830%、黑糖 1.915%、石灰 44.364%、黏土 49.891%作為設計最佳配比。

## 壹、研究動機

曾經到過嘉義縣竹崎鄉之清水橋<sup>註1</sup>，發現一旁之道路因天然災害損毀並傷及清水橋，而重新修建之建材卻是以鋼筋混凝土連接清水橋。這些具有文化價值與歷史內涵的拱型糯米橋卻與現今普遍構築的鋼筋混凝土工法產生了極大的衝突，破壞了整體之美感，並顯示出古蹟修復的重要性。而在些許之文獻記載<sup>註2</sup>與書面資料中僅僅提及到在民國四、五十年代，水泥相當昂貴且稀少，遂利用糯米混和紅糖、石灰等作為砌石填縫之材料，並且發現以此材料建造的橋樑強度亦不亞於現代建築工法。為更深入了解古人建造橋樑之技術以及材料之配比，但卻無明確之製作過程與配方以及整座橋樑在百年中不輕易動搖之奧秘，引發了我們尋找解答的動機。



圖 1、受損修復後的清水橋

希望藉由本次的實驗找到適合目前糯米橋修復的材料配比，畢竟古蹟與歷史建築的傳統工法須以原物、原樣之修復方式來呈現，才得以保留歷史遺跡與價值。

<sup>註1</sup> 相關資料報導：中央社 <https://tw.news.yahoo.com/嘉義百年糯米橋-傳統建築寶典-025107797.html>（中央社記者黃國芳）

<sup>註2</sup> 資料來源：南投縣政府文化局圖書館-文化局縣史館圖書

## 貳、研究目的





本研究在於探究糯米橋之灰漿成份，以實驗探討日據時期至今不易因風災地震而動搖之『糯米橋』。糯米橋的構築材料如糯米、黑糖、石灰其使用之含量並無任何文獻記載，為維護歷史古蹟，並更深入探討糯米橋之建造過程與方式，我們運用各個材料之配比與特性來試驗灰漿的抗壓及抗彎強度。進而了解糯米橋屹立不搖之原因。

主要目的有以下四點：

- 一、彙整糯米橋田野調查資料，建構完整糯米橋文獻資料。
- 二、檢驗分析糯米橋灰漿之成份及配合比例。
- 三、研究不同灰漿配比及不同實驗步驟對糯米橋灰漿之抗壓、抗彎強度的影響。
- 四、確認糯米橋灰漿之配合比例。

## 參、研究設備及器材

表 1、本研究相關材料及儀器設備彙整資料

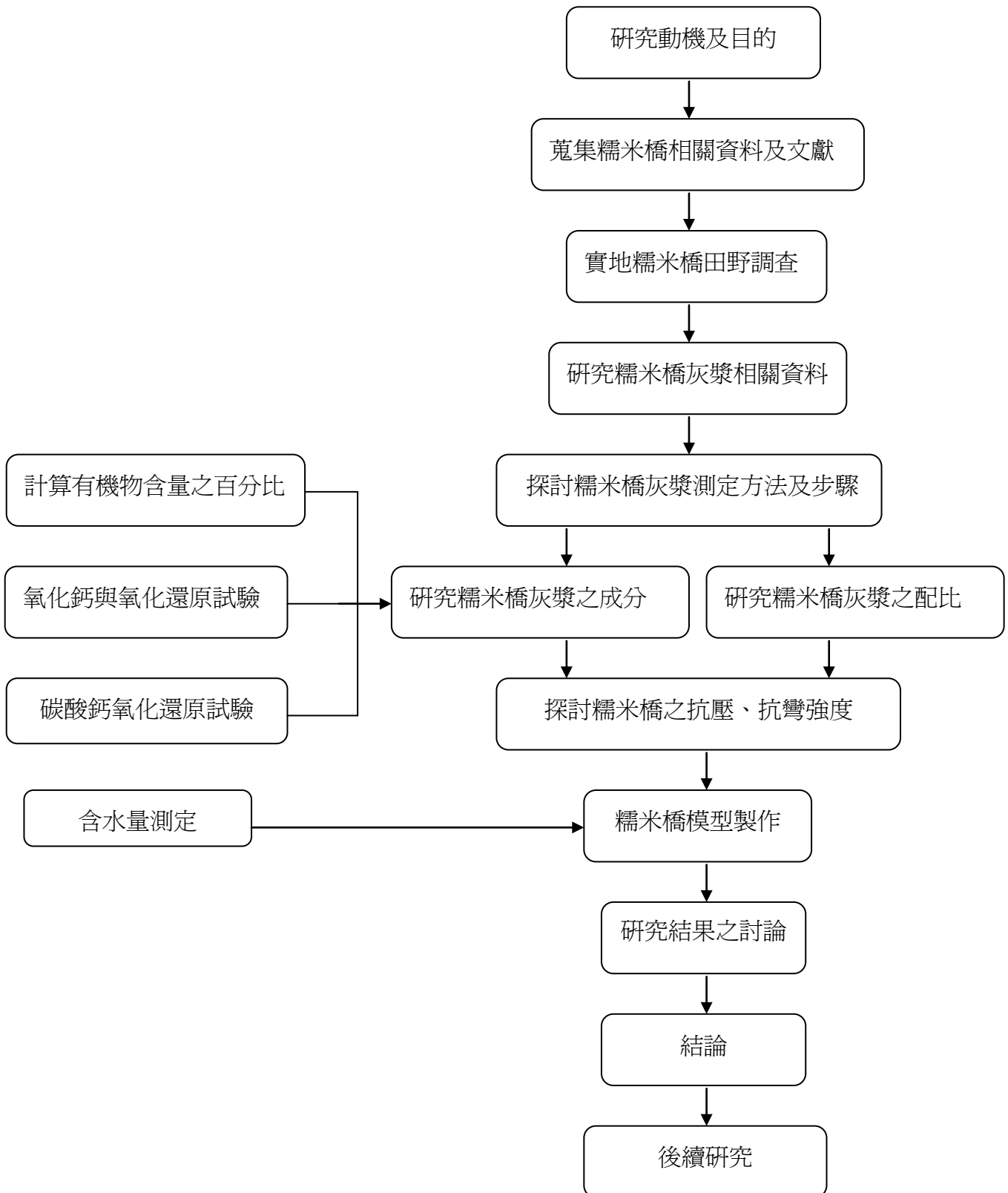
編號	材料名稱	圖片	用途	備註
1	糯米粒 (或糯米粉)		糯米灰漿原料，黏結石材的材料	顆粒狀(或粉狀)
2	黑糖		糯米灰漿原料，黏結石材的材料	粉狀
3	生石灰塊		糯米灰漿原料之一，黏結石材的材料	廠牌：和興石灰工廠(股)公司
4	黏土		糯米灰漿原料之一，黏結石材的材料	

5	減壓過濾儀		利用水將瓶內壓力降低，使沉澱物與液體分離	
6	乾燥器		保持乾燥	
7	精密天秤		秤取準確的重量	
8	化學儀器		鈣含量測定實驗使用	溫度計、玻棒、球型吸管、安全吸球、定量瓶、三角瓶、漏斗、濾紙
9	化學試劑		鈣含量測定實驗使用	鹽酸、甲基紅、草酸氨、氨水、硫酸、氧化錳
10	石臼		用來搗碎、拌和糯米灰漿	石製，直徑(外)15cm(內)12cm、高度10cm 厚度 3cm
11	電子磅秤		量測所有試驗物的重量	廠牌 JWL-3K
12	抗壓試體模		抗壓強度試驗	邊長 5x5 之立方體標準模具
13	抗彎試體模		抗彎強度試驗	5X5X16 公分長方體標準模具

14	萬能試驗機		測試試體的抗壓、抗彎強度	試驗機用液壓試或螺旋式均可
15	灰化爐		高溫灰化	數量 1 個
16	荷重儀		測定抗彎強度數據	以每次加載 4kg 為單位
17	數據讀取機		讀取抗彎強度	數量 1 個
18	搗棒		搗實試體模型	數量 1 個
19	抗彎支承鐵塊		抗彎試驗器材	數量 2 個
20	烘箱		使試體水量蒸發	數量 1 個

## 肆、研究過程或方法

### 一、研究流程



## 二、研究方法：

(一) 糯米橋相關文獻中並無明確之記載成分之配比，但與耆老訪談及網路記載糯米橋灰漿成分為有糯米<sup>註3</sup>、黑糖與石灰。因此我們最初利用這些成分試驗。(如表 2 至表 4 所示)。

表 2、糯米灰漿製作過程的失敗試驗一




		
將糯米蒸熟	放入石臼搗拌	加入石灰與糯米拌和
實驗步驟	先將糯米與黑糖搗拌 → 再加入石灰拌和	
配比	糯米：黑糖：石灰	實驗結果
	1：1：2	過程中發現原本黏稠之糯米糰加入石灰後，糯米粉會被石灰包覆而無法產生黏性。
	2：1：1	糯米開始拌和時黏性強，但加入石灰後糯米團也被石灰包覆而導致無黏性產生。

表 3、糯米灰漿製作過程的失敗試驗二







		
將黑糖加熱至約 90 度	加入糯米粉與黏土拌和	加入石灰拌和均勻
實驗步驟	黑糖與糯米粉拌和 → 加入石灰拌和 → 最後加入黏土拌和	
配比	糯米：黑糖：石灰：黏土	實驗結果
	1：2：3：3.3	在實驗二中首先將黑糖與糯米拌和後加入石灰，再加入黏土拌和，此時拌和不易，而糯米橋灰漿也無黏性。
	3：2：1：3.3	當糯米含量提高，石灰含量降低，利用相同之拌和程序，此時糯米灰漿也無黏性產生。

表 4、糯米灰漿製作過程的失敗試驗三

		
將黑糖加熱至約 90 度	加入糯米粉與黏土拌和	加入石灰拌和均勻
實驗步驟	黑糖加熱 → 加入糯米粉與黏土一起拌和 → 最後加入石灰拌和	
配比	糯米：黑糖：石灰：黏土	實驗結果
	1：2：3：3.3	首先將黑糖與糯米拌和，先加入黏土後加入石灰，我們發現糯米橋灰漿產生黏性，又因加入之黑糖量多而使黏性大增，但也因黑糖含量多使試體硬固緩慢。
	3：2：1：3.3	將糯米與石灰比例對調以相同方法製作糯米灰漿，我們發現試體因石灰含量少，糯米含量多導致灰漿更加黏稠。

<sup>註3</sup> 糯米：本研究使用圓糯米以及糯米粉進行實驗

嘗試多種實驗方式卻都失敗，在無法得知原料之拌和方式與實驗步驟及文獻資料輔助情況下，我們也不知所措，在經過討論與分析過後，發現原料拌和之順序會影響成敗，但確實之配比依舊無法得知。爲了建構糯米橋完整之資料我們決定先行採集目前糯米橋灰漿的檢驗試體，利用檢驗分析來檢測糯米灰漿之成分配比，並以此失敗實驗做爲經驗，尋找較合適的配比製作方法。

(二)糯米橋田野調查：本次研究中糯米橋田野調查之現況如表 5、表 6 所示。

表 5、糯米橋田野調查

萬安橋	地點	苗栗縣 公館鄉北河村		
	現況	損壞		
	建造日期	約民國十七年		
			損壞之橋	非破壞性抗壓強度試驗
北辰橋	地點	苗栗縣 公館鄉北河村		
	現況	損壞		
	建造日期	不明		
			損毀之橋之全部點位	損毀之橋之局部點位
紙湖一橋	地點	苗栗縣 獅頭鄉百壽村		
	現況	完整		
	建造日期	民國十年至二十年間		
	尺寸	長 12.00、寬:4.70m、 高:3.50m、一拱		
			橋的全貌景觀	做非破壞性抗壓強度試驗
清水橋	地點	嘉義縣 竹崎鄉昇季村		
	現況	完整		
	建造日期	民國初年		
	尺寸	長:25m、寬:2m、 高:3.65m、兩拱		
			橋的全貌景觀	量測試驗錘與糯米橋之角度



神橋	地點	雲林縣 古坑鄉華山庄		
	現況	完整		
	建造日期	民國十一年		
	尺寸	長:8.7m 寬:4.52m 高:4.57m 一拱	橋的全貌景觀	作非破壞性抗壓強度試驗
北港溪石橋	地點	國姓鄉北港村		
	現況	完整		
	建造日期	民國二十九年		
	尺寸	長:56.7m 寬:5.5m 高:8.9m、四拱	橋的全貌景觀	作非破壞性抗壓強度試驗

表 6、耆老訪談資料彙整表

日期	地點	耆老年齡	糯米橋名稱	訪談內容
102.11	苗栗縣北河村萬安橋	83 歲	萬安橋	當地居民告訴我們糯米橋是用糯米、紅糖、石灰。
102.11	苗栗縣北河村	90 歲	北辰橋	當地居民告訴我們當地其實有很多無記載之糯米橋。
102.03	國姓鄉北港村	70 歲	北港溪石橋	民國 40 至 50 年代，水泥相當昂貴且稀少，遂利用糯米混合紅糖、石灰等作為砌石填縫的材料。

由以上耆老訪談可得知，糯米橋是以糯米、紅糖、石灰為主要原料建造而成，係利用石頭堆砌成拱形來承受橋面的重量。但並無相關明確的成分配比及製作方法，則我們將田野調查中所採集的檢驗試體進行化學檢驗分析來探討糯米灰漿之成分。

### (三)拱之力學原理<sup>註4</sup>

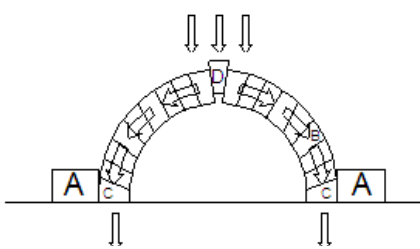


圖 2、拱橋受力傳遞力學行為

拱形是一種很特別的結構，它可以將拱頂所負載的重量，傳遞到兩側；以拱橋為例，用來做橋的石材，本身是很重的，但是這個重量會被分散到兩邊的拱柱，因此，拱形特別的耐重。堅固有石拱、磚拱和木拱之分，其中磚拱橋極少見。拱橋的原理是利用拱形本身具有的上推力量，來承受橋面上車輛或行人的重力，同時也具有美學作用。

<sup>註4</sup> 資料來源：<https://tw.knowledge.yahoo.com/question/question?qid=1609100207451>

#### (四)強度衝錘試驗法

強度衝錘試驗法<sup>註5</sup>又稱為反彈錘法(如表 7 所示)，利用司密特衝錘撞擊結構物表面後，以其反彈數來求得糯米橋表面之硬度，以評估測試點之抗壓強度。其原理是一質量以定速率敲擊表面，由此質量回彈之高度決定表面附近之硬度，進而推測其整體強度與均勻性。進行強度衝錘試驗法需要依照下列注意事項進行:

- 1.衝錘和打擊面要保持垂直。
- 2.檢測面要平滑，檢測表面的灰漿、加工層或塗物應塗去。
- 3.檢測面上的凹凸部份，要用金鋼砂磨石把表面磨平，如有硬塊、空洞、不良灌漿位置，不宜當作測試點。
- 4.記錄打擊角度，以廠商所附角度校正值對照表來校正混凝土強度值。

表 7、衝錘強度試驗步驟

		
強度試驗錘	強度試驗錘垂直試驗	量測與傾斜壁面角度

#### (五)灰漿灰分含量測定

表 8、灰漿試體

		
採集灰縫中的灰漿試體	將採集試體依序編號	將試體磨成粉末

1.試體取樣磨粉：(如表 8 所示)

2.灰分含量測定原理<sup>註6</sup>：

灰分為測定物中的礦物質，或稱無機鹽，主要為鉀、鈉、鈣、鎂、硫、矽、磷、鐵及其它微量元素。測定方法是在適當的溫度下使測定物中的有機物質灼燒氧化後，把殘餘的白色物質用分析天秤稱重，即得灰分的重量。

3.灰漿灰分含量測定<sup>註6</sup>：

將試體磨粉，以灰分含量測定有機物經灼燒或被完全氧化後所殘留的無機殘存物。然而礦物質(鉀、鈉、鈣、鎂、硫、矽、磷、鐵及其它微量元素)為灰分之主要成份，其在主要礦物質中則以測定鈣之含量為主要試驗。

<sup>註5</sup> 資料來源：<http://cae-so.com/NDT-2.html>

<sup>註6</sup> 資料來源：乙級化學學術科快攻寶典試題全收錄-台科大

乾式灰化主要用於測定灰分。將樣品置於 550~ 600°C 高溫灰化爐灼燒樣品中的水份及揮發物質以氣態放出，有機物被灼燒成二氧化碳和氮的氧化物，稱量殘留物的重量即可計算出樣品中粗灰分的含量。

4.灰化測驗方式(如表 9 所示):

- (1)乾鍋於使用前須先浸泡於 10%鹽酸溶液，並在沸水浴中加熱兩小時。
- (2)放冷後取出，再以蒸餾水進行水洗。
- (3)放入灰化爐中以 550~600°C 之溫度加熱 4 小時，稍放冷，移入乾燥器中。
- (4)冷卻置室溫後，精密稱量，並重複灼燒直至恒量為止。

表 9、灰分含量測定

		
糯米橋灰縫試體	放入灰化爐加熱至 550~600°C	冷卻後，以精密天平稱量

(六)鈣含量測定<sup>註6</sup>:

經由灰化處理後，進行礦物質測定；並藉由化學分析法測定礦物質中之鈣含量。鈣含量之測定為將試體經灰化分解後，溶解於酸性溶液中，並利用草酸根將樣品中之鈣離子變為難溶的草酸鈣(CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)沉澱。經過濾後，草酸鈣沉澱並生成草酸，再以已知濃度之過錳酸鉀(KMnO<sub>4</sub>)溶液來滴定草酸，得以求知試體中之鈣含量，(如表 10 所示)。

相關化學分析如下：

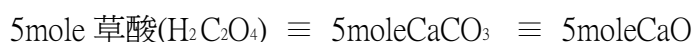
- 1.以鹽酸將樣品溶解成 Ca<sup>2+</sup>  
粗灰分+HCl→Ca<sup>2+</sup>
- 2.加入草酸銨，使 Ca<sup>2+</sup>產生 CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 沉澱  
CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>→CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+2NH<sub>4</sub>
- 3.再加入硫酸，使 CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 沉澱溶解成 H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>  
CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>→CaSO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>
4. 以 KMnO<sub>4</sub> 滴定 H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>
5. H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+2KMnO<sub>4</sub>+3H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>→K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+2MnSO<sub>4</sub>+10CO<sub>2</sub>+8H<sub>2</sub>O

此化學分析以草酸鈉標定，因在室溫進行時反應相當緩慢，所以通常加熱到 70~80°C 滴定，以增加反應速率。並藉由紫紅色的過錳酸鉀，與草酸反應形成 Mn<sup>2+</sup> 顏色則褪掉，當所加入的過錳酸鉀顏色不消失，即表示已達滴定終點。

其反應如下:

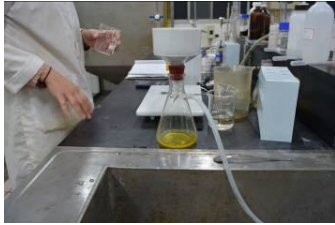




由反應式得知莫耳數之間關係、2mole KMnO<sub>4</sub>



精秤 0.50±0.02g 乾燥試樣，以 5ml 濃鹽酸溶解並過濾後，稀釋至 250ml。




表 10、鈣含量測定

		
灰分加入濃硫酸後減壓過濾	加入草酸鉍，靜置 30 分鐘 產生 $\text{CaC}_2\text{O}_4$ 沉澱	過濾沉澱之物質

(七)以氧化還原滴定法測定氧化鈣含量<sup>註6</sup> (如表 11 所示)

- 1.精取試樣溶液 25.0ml，加熱至沸騰，並加入 40ml 熱草酸鉍溶液。
- 2.加入 1~2 滴甲基紅，逐滴加入 6m 氨水，使草酸鈣沉澱直至溶液成黃色為止。
- 3.靜置至少半小時後過濾。
- 4.將沉澱物移入燒杯中，加入 50mL1.0M 硫酸溶液使沉澱物溶解。
- 5.加熱至 60°C 左右，以過錳酸鉀溶液滴定。








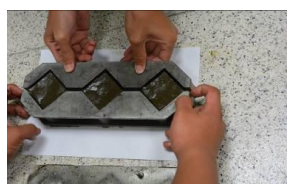
表 11、氧化還原滴定步驟

		
加熱至沸騰	錳酸鉀溶液來滴定草酸，得以求 知試體中之鈣含量。	加入的過錳酸鉀顏色不消失，呈 淡紫色，即表示已達滴定終點

(八) 抗壓、抗彎強度試驗試體製作

試驗步驟(如表 12 所示)如下：

表 12、試體製作之用具與步驟

			
篩析	秤重	加熱黑糖 溫度約 90 度	拌和黑糖與糯米粉溫度約 50 度
			
拌和	灌漿、搗實 (抗壓強度試體模)	灌漿、搗實 (抗彎強度試體模)	拆模

- 1.篩析：利用搗鎚將黏土搗成碎塊狀，再利用篩網將試驗之黏土篩至細顆粒狀。
- 2.秤取原料：取設計配比之石灰、黑糖、糯米粉及黏土秤重，來完成配比的工作。
- 3.拌和：將各個配比設計的石灰、黑糖、糯米粉及黏土，倒至拌和板上，用人工均勻拌和。
- 4.灌漿、搗實：拌和完成之不同配比設計之糯米灰漿，放進抗壓、抗彎試體模具內，分層搗實共 25 次，再將灰漿刮平至與模子頂相齊完成，靜置等待 2 至 3 天後拆模。

#### (九) 抗壓、抗彎強度試驗

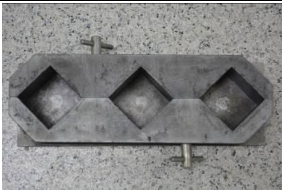
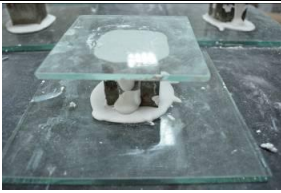

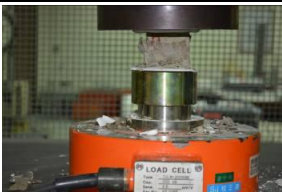

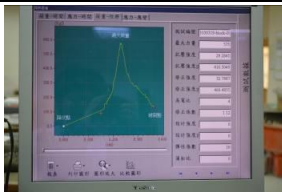
##### 1.抗壓強度試驗(如表 13 所示)

試驗目的乃在測定不同糯米橋灰漿抵抗壓力性質之強弱。糯米橋灰漿抗壓試驗所用之試體為每邊長各 5cm 之立方試體之鐵模。

- (1)室溫靜置至實驗齡期(14 天)後，將試體頂部以石膏蓋平，使承壓面平整均勻受壓。
- (2)將蓋平完成之試體置於油壓機之平台中央，啟動油壓機，使試體承受壓力，其加壓速度約為 1.5 至 3.5kg/cm<sup>2</sup>/sec。壓力逐漸增加，至試體破壞為止，並記錄其破壞荷重。

抗壓強度之計算如下式： $\sigma = P/A$

表 13、抗壓強度試驗

		
抗壓試體模	蓋平	抗壓試驗
		
加壓破壞	試體破壞	破壞曲線圖

##### 2.抗彎強度試驗(如表 14 所示)

抗彎強度試驗之試體為 5x5x16cm 之長方體，分兩層倒入試體模內，製成抗彎試體，拆模後至預定齡期。並將試體置於抗彎強度試驗機，其兩反力支撐點距離(有效跨度)定為 14 公分，進行抗彎強度試驗。

$$\text{抗彎強度之計算式如下； } b = \frac{\langle \frac{P}{2} \times 7 \times 2.5 \rangle}{\langle \frac{1}{12} \times 5 \times 5^3 \rangle} = 0.168P$$

表 14、抗彎強度試驗



(十) 糯米橋灰漿之配比設計

1.說明：根據化學檢驗分析結果之數據，利用不同之配比方式實驗出最符合糯米橋黏結材之性質。灰漿配比依據為重量百分比。

(1)依據田野調查試體檢驗分析配比(如表 15 所示)

表 15、檢驗分析配比

試體編號 \ 配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
0221(清水橋)	3.830%	1.915%	13.364%	80.891%
0224(萬安橋)	3.311%	1.104%	4.853%	90.732%
0225(北辰橋)	3.975%	2.982%	8.043%	85%

(2)以清水橋為例，石灰為變數，有機物為固定值，作為設計配比(如表 16 所示)

表 16、有機物為固定值，石灰為變數之配比

試體編號 \ 配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
0221	3.830%	1.915%	13.364%	80.891%
0226	3.830%	1.915%	19.364%	74.891%
0227	3.830%	1.915%	24.364%	70.611%
0303	3.830%	1.915%	34.364%	59.891%
0302	3.830%	1.915%	44.364%	49.891%

(3) 以清水橋為例，有機物為變數，石灰為固定值，作為設計配比(如表 17 所示)

表 17、石灰為固定值，有機物為變數之配比

試體編號 \ 配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
0304-1	4.788%	0.958%	13.364%	80.891%
0321	3.830%	1.915%	13.364%	80.891%
0304-2	2.876%	2.876%	13.364%	80.891%
0305	1.915%	3.830%	13.364%	80.891%
0306	0.958%	4.788%	13.364%	80.891%

## 伍、研究結果

### 一、田野調查糯米橋非破壞性強度試驗錘試驗：

以苗栗縣萬安橋、北辰橋、紙糊一橋、雲林縣古坑鄉華山神橋、嘉義清水橋、南投縣國姓鄉糯米橋之田野調查資料(如表 18 至表 35 所示)。

表 18、萬安橋強度試驗點位及位置圖

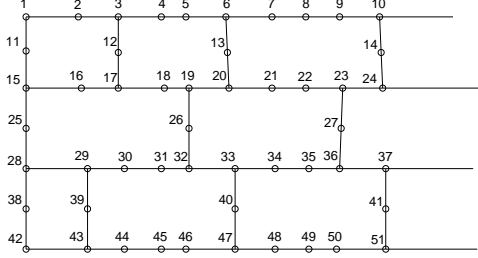

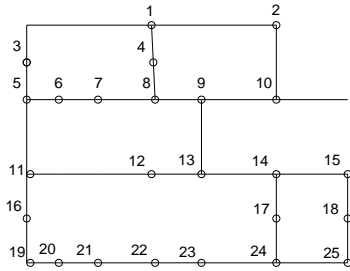
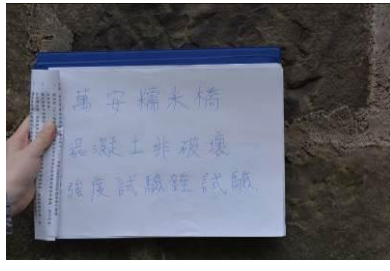
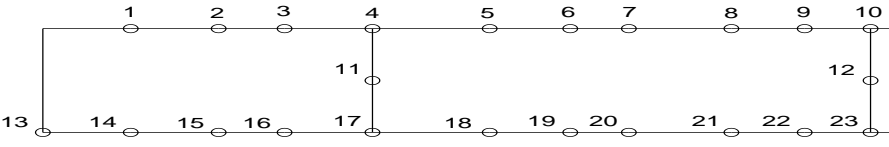
	
<p>萬安橋(橋墩)點位編號</p>	<p>現場非破壞性試驗位置圖</p>
	
<p>萬安橋(拱內)點位編號</p>	<p>現場非破壞性試驗位置圖</p>
	
<p>萬安橋(拱側)點位編號</p>	

表 19、萬安橋（橋墩）點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	4.4	2	4.6	3	4.3	4	5.3	5	5.0	6	4.8	7	4.2	8	5.0
9	4.9	10	4.6	11	4.8	12	5.0	13	4.9	14	4.8	15	4.5	16	4.8
17	4.8	18	3.0	19	4.6	20	4.8	21	4.5	22	4.0	23	5.6	24	5.0
25	3.6	26	3.7	27	4.2	28	3.0	29	4.3	30	3.7	31	3.6	32	4.2
33	4.2	34	4.0	35	4.4	36	3.6	37	4.6	38	4.7	39	4.5	40	5.0
41	4.6	42	4.4	43	5.4	44	4.9	45	4.9	46	4.2	47	5.0	48	4.1
49	3.4	50	4.8	51	4.8										
<p>點位試驗強度平均值: 4.55Mpa (46.43 kgf/cm<sup>2</sup>)</p>															

表 20、萬安橋（拱內）點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	5.0	2	4.0	3	3.2	4	3.6	5	4.2	6	4.1	7	4.1	8	4.3
9	4.4	10	3.0	11	3.4	12	2.8	13	2.8	14	3.6	15	3.4	16	3.4
17	3.	18	3.0	19	3.2	20	4.0	21	3.4	22	3.5	23	3.1	24	3.0
25	3.4														
點位試驗強度平均值: 3.56Mpa (36.33kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 21、萬安橋（拱側）點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	3.4	2	3.6	3	2.8	4	3.0	5	3.8	6	3.0	7	3.6	8	4.2
9	4.0	10	3.4	11	5.0	12	3.0	13	4.2	14	2.8	15	2.6	16	3.8
17	2.8	18	3.2	19	4.6	20	3.6	21	4.0	22	3.2	23	2.0	24	5.1
點位試驗強度平均值: 3.53Mpa (36.02kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 22、北辰橋強度試驗點位及位置圖

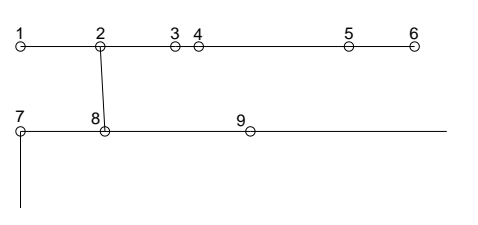

	
北辰橋左側點位編號	現場非破壞性試驗位置圖

表 23、北辰橋(左側)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	2.4	2	2.2	3	2.4	4	2.0	5	2.3	6	2.4	7	2.3	8	1.8
點位試驗強度平均值: 2.23Mpa (22.75 kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 24、紙湖一橋強度試驗點位及位置圖

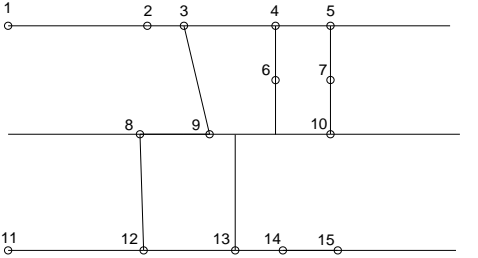
	
紙湖一橋左側點位編號	現場非破壞性試驗位置圖



表 25、紙湖一橋(左側)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	3.5	2	3.3	3	3.0	4	3.0	5	3.7	6	2.3	7	2.8	8	2.8
9	2.0	10	2.8	11	2.8	12	3.7	13	2.3	14	2.1	15	2.0	16	2.7
點位試驗強度平均值: 1.82Mpa (18.57 kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 26、神橋強度試驗點位及位置圖

		
神橋右側點位編號	現場非破壞性試驗位置圖	神橋左側點位編號

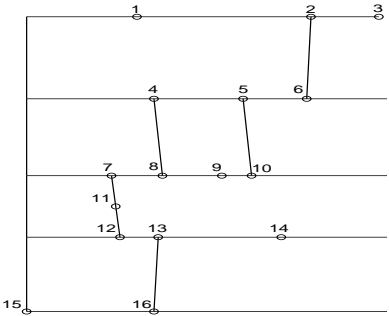
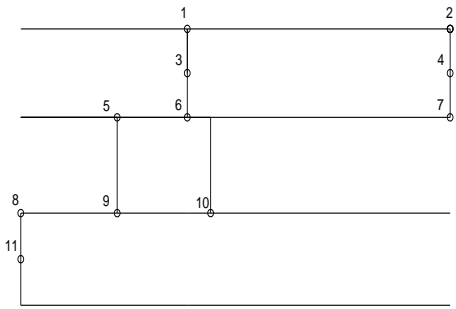
表 27、神橋(右側)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	1.6	2	1.6	3	1.4	4	1.0	5	1.6	6	1.8	7	2.6	8	2.8
9	1.3	10	2.6	11	/	12	1.6	13	1.4	14	2.4	/	/	/	/
點位試驗強度平均值: 1.82Mpa (18.57kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 28、神橋(左側)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	2.0	2	1.6	3	1.2	4	2.2	5	1.6	6	2.0	7	1.6	8	1.8
9	2.6	10	3.4	11	2.0	12	3.0	13	2.4	14	1.8	15	3.2	16	1.0
點位試驗強度平均值: 2.09Mpa (21.33kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 29、清水橋強度試驗點位及位置圖

	
清水橋側面點位編號	清水橋拱內(上)點位編號

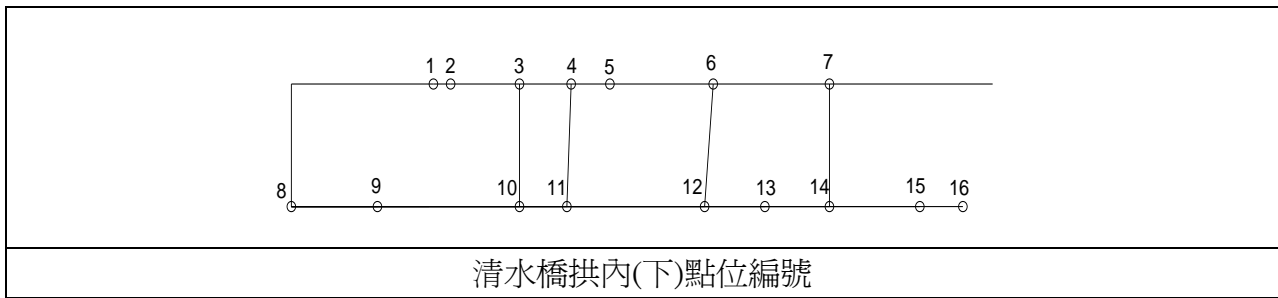


表 30、清水橋(側面)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	4.0	2	3.6	3	3.6	4	4.8	5	4.4	6	4.4	7	4.0	8	4.4
9	3.8	10	4.4	11	2.8	12	3.6	13	4.0	14	3.2	15	3.4	16	4.2
17	2.8	18	3.4	19	3.4	20	3.0								
點位試驗強度平均值: 3.76Mpa (38.37 kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 31、清水橋(拱內上)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	3.2	2		3		4	3.1	5		6	3.2	7	3.0	8	2.8
9	3.0	10	3.4	11	2.8	12	2.6	13	3.6	14	2.2				
點位試驗強度平均值: 2.99Mpa (30.51kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 32、清水橋(拱內下)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	3.1	2	2.6	3	3.2	4	2.7	5	3.6	6	2.8	7	4.0	8	4.4
9	4.8	10	5.2	11	2.4										
點位試驗強度平均值: 3.53Mpa (36.02 kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 33、清水橋(拱內下)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	3.2	2	3.0	3	2.8	4	3.0	5	3.3	6	2.8	7	2.8	8	3.0
9	2.6	10	2.7	11	1.7	12	2.4	13	2.7	14	2.4	15	2.7	16	2.6
17	3.0	18	2.5	19	1.8	20	2.3	21	1.6	22	1.9	23	1.6	24	1.9
25	1.9														
點位試驗強度平均值: 4.55Mpa (46.43kgf/cm <sup>2</sup> )															

表 34、國姓糯米橋強度試驗點位及位置圖

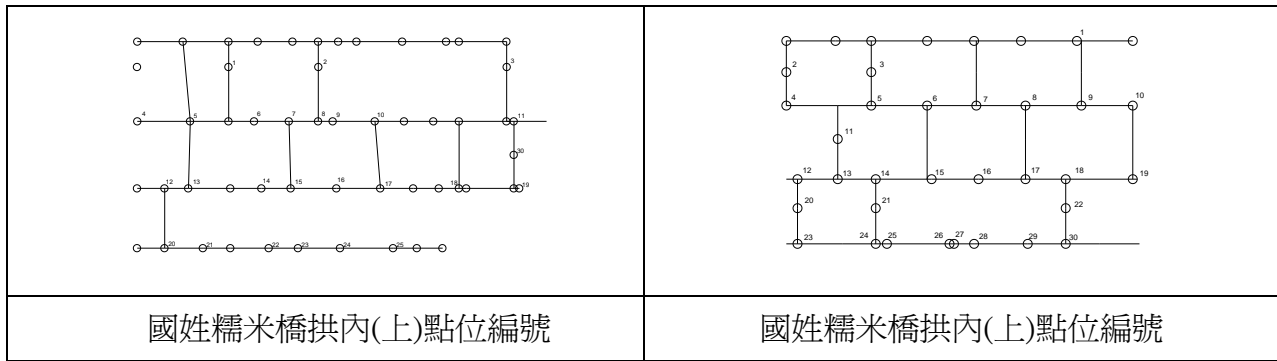


表 35、國姓糯米橋(拱內上)點位編號試驗強度

點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度	點位 編號	試驗 強度
1	1.6	2	2.8	3	2.8	4	3.3	5	2.7	6	3.1	7	3.4	8	2.7
9	3.0	10	3.1	11	2.8	12	3.2	13	3.0	14	2.5	15	3.1	16	3.2
17	2.5	18	2.3	19	2.1	20	2.5	21	2.1	22	2.6	23	3.1	24	2.4
25	2.7	26	2.8	27	2.3	28	2.8	29	3.0	30	2.7				
點位試驗強度平均值:4.55Mpa (46.43kgf/cm <sup>2</sup> )															

非破壞性強度試驗錘試驗(結果如表 36 所示)

表 36、非破壞性強度試驗平均值

橋名	萬安橋	北辰橋	紙湖一橋	清水橋	神橋	國姓鄉糯米橋
非破壞性強度 試驗平均值	41.33kgf/cm <sup>2</sup>	22.75kgf/cm <sup>2</sup>	18.57kgf/cm <sup>2</sup>	39.29kgf/cm <sup>2</sup>	19.99kgf/cm <sup>2</sup>	46.43kgf/cm <sup>2</sup>

二、灰分及有機物計算說明:

(一)測定有機物百分比：將試體放入灰化爐中將有機物燃燒留下無機物。

公式如下：

$$\left[ (\text{空杯重} + \text{試體重}) - \text{灰化後重} / (\text{空杯重} + \text{試體重}) - \text{空杯重} \right] \times 100\%$$

(二)測定灰分百分比：100%－有機物之百分比

表 37、灰份含量測定

試體橋名	試體編號	空杯重 (g) (1)	空杯重+ 試體重(g) (2)	試體重 (g) (2)-(1)= (A)	灰化後重 (g) (3)	灰化前 後差重 (g) (2)-(3)= (B)	有機物 百分比 (B)/(A) *100%= (C)%	有機物 平均 百分比	灰分 百分比 100%-(C)	灰分 平均 百分比
北辰橋	檢體一	35.6117	40.9948	5.3831	40.6195	0.3753	6.97	6.96	93.03	93.04
	檢體二	30.8936	41.6836	10.7900	40.9230	0.7606	7.05		92.95	
	檢體三	30.2737	50.6640	20.3903	49.2673	1.3967	6.85		93.15	
萬安橋	檢體一	35.1710	41.1714	6.0004	40.9150	0.2564	4.27	4.42	95.73	95.58
	檢體二	32.4499	43.1338	10.6839	42.6370	0.4968	4.56		95.44	
清水橋	檢體一	34.8363	36.8550	2.0187	36.7377	0.1173	5.81	5.74	94.19	94.26
	檢體二	28.5574	31.4461	2.8887	31.2810	0.1642	5.68		94.32	
國姓橋	檢體一	30.388	37.989	7.601	37.703	0.2858	3.76	3.76	96.24	96.24

北辰橋:所測值的數據有機物百分比約佔 7%，灰分百分比約佔 93%

萬安橋:所測值的數據有機物百分比約佔 4%，灰分百分比約佔 96%

清水橋:所測值的數據有機物百分比約佔 6%，灰分百分比約佔 94%

國姓橋:所測值的數據有機物百分比約佔 4%，灰分百分比約佔 96%

### 三、鈣含量分析計算說明

(一)灰化後利用剩餘的無機物，進步測定鈣之含量。

$$1. \text{CaO 含量}(\%) = \left[ \frac{\text{試樣中 CaO 之重量(g)}}{\text{試樣重量(g)}} \right] \times 100\%$$

$$2. \text{CaCO}_3 \text{ 含量}(\%) = \left[ \frac{\text{試樣中 CaCO}_3 \text{ 之重量(g)}}{\text{試樣重量(g)}} \right] \times 100\%$$

表 38、鈣含量測定

橋名	試體	重量	次數	MkMoO <sub>4</sub> (mol/l)	VkMnO <sub>4</sub> (ml)	CaO (g)	CaO (%)	CaO(%) 平均	CaCO <sub>3</sub> (g)	CaCO <sub>3</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%) 平均
北辰橋	檢體一	5.3831	一	0.020602	15.00	0.433260	8.17	8.043	0.773193	14.36	14.318
			二	0.020602	14.85	0.429216	7.97		0.765977	14.23	
	檢體二	10.7900	一	0.020602	29.95	0.865211	8.02		1.544049	14.31	
			二	0.020602	29.90	0.863397	8.00		1.540812	14.28	
	檢體三	20.3903	一	0.020602	28.45	1.643021	8.06		2.932125	14.38	
			二	0.020602	28.40	1.639594	8.04		2.926008	14.35	
萬安橋	檢體一	6.0004	一	0.020602	10.25	0.296061	4.93	4.852	0.528349	8.81	8.825
			二	0.020602	10.30	0.297505	4.96		0.530926	8.85	
	檢體二	10.6839	一	0.020602	18.25	0.527133	4.93		0.940718	8.81	
			二	0.020602	18.30	0.528577	4.59		0.943296	8.83	
清水橋	檢體一	2.0187	一	0.020602	9.25	0.267177	13.24	13.364	0.476802	23.62	23.835
			二	0.020602	9.40	0.271510	13.44		0.484534	24.00	
	檢體二	2.8887	一	0.020602	13.25	0.382424	13.24		0.682472	23.63	
			二	0.020602	13.50	0.389934	13.50		0.695874	24.09	
國姓橋	檢體一	7.601	一	0.020602	8.02	0.092656	1.219	1.219	0.165353	2.175	2.175

北辰橋:所測值的數據 CaO 百分比約佔 8%，CaCO<sub>3</sub> 百分比約佔 14%

萬安橋:所測值的數據 CaO 百分比約佔 5%，CaCO<sub>3</sub> 百分比約佔 9%

清水橋:所測值的數據 CaO 百分比約佔 13%，CaCO<sub>3</sub> 百分比約佔 24%

國姓橋:所測值的數據 CaO 百分比約佔 1%，CaCO<sub>3</sub> 百分比約佔 2%

#### 四、試體之抗壓強度

(一)依據檢驗分析之結果製作模型試體進行抗壓及抗彎試驗(如表 39、40、41 所示)，灰漿配比依據為重量百分比。

表 39、清水橋配比模型試體之抗壓試驗

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	非破壞性強度衝錘試驗比較
022101	249	9.96	10.306 kgf/cm <sup>2</sup>	39.29 kgf/cm <sup>2</sup>
022102	241	9.64		
022103	283	11.32		

表 40、萬安橋配比模型試體之抗壓試驗

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.311%	1.104%	4.853%	90.732%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	非破壞性強度衝錘試驗比較
022401	226	9.04	8.947 kgf/cm <sup>2</sup>	41.33 kgf/cm <sup>2</sup>
022402	210	8.40		
022403	235	9.40		

表 41、北辰橋配比模型試體之抗壓試驗

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.975%	2.982%	8.043%	85%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	非破壞性強度衝錘試驗比較
022501	116	4.64	4.480 kgf/cm <sup>2</sup>	22.75kgf/cm <sup>2</sup>
022502	104	4.16		
022503	116	4.64		

(二)以清水橋為例，石灰為變數製作試體模型進行抗壓試驗(如表 42、43、44、45 所示)。

表 42、石灰變數為 19.364%之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	19.364%	74.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
022601	390	15.6	12.547 kgf/cm <sup>2</sup>	
022602	235	9.40		
022603	316	12.64		

表 43、石灰變數為 24.364%之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	24.364%	70.611%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
022701	406	16.24	17.060 kgf/cm <sup>2</sup>	
022702	447	17.88		
022703				

表 44、石灰變數為 34.364%之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	34.364%	59.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
030301	553	22.12	23.253 kgf/cm <sup>2</sup>	
030302	634	25.36		
030303	557	22.28		

表 45、石灰變數為 44.364%之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	44.364%	49.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
030201	799	31.96	31.773 kgf/cm <sup>2</sup>	
030202	773	30.92		
030203	811	32.44		

(三)以清水橋為例，有機物為變數製作試體模型進行抗壓試驗(如表 46、47、48、49 所示)。

表 46、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 5：1 之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	4.788%	0.958%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
03040-1-1	296	11.84	12.267 kgf/cm <sup>2</sup>	
03040-1-2	308	12.32		
03040-1-3	316	12.64		

表 47、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 3：3 之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	2.876%	2.876%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
03040-2-1	345	13.80	12.533 kgf/cm <sup>2</sup>	
03040-2-2	275	11.00		
03040-2-3	320	12.80		

表 48、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 2：4 之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	1.915%	3.830%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
030501	308	12.32	12.800 kgf/cm <sup>2</sup>	
030502	332	13.28		
030503				

表 49、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 1：5 之抗壓強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	0.958%	4.788%	13.364%	80.891
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗壓強度平均值	
030601	132	5.28	5.693 kgf/cm <sup>2</sup>	
030602	187	7.48		
030603	108	4.32		

#### 五、試體抗彎強度

(一)依據檢驗分析之結果製作模型試體進行抗壓及抗彎試驗(如表 50、51、52 所示)

表 50、清水橋配比模型試體之抗彎試驗

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
022101	8	1.34	1.340 kgf/cm <sup>2</sup>	5%
022102	8	1.34		
022103	8	1.34		

表 51、萬安橋配比模型試體之抗彎試驗

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.311%	1.104%	4.853%	90.732%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
022401	10	1.68	1.457 kgf/cm <sup>2</sup>	3%
022402	10	1.68		
022403	6	1.01		



表 52、北辰橋配比模型試體之抗彎試驗

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.975%	2.982%	8.043%	85%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
022501	2	0.34	0.560 kgf/cm <sup>2</sup>	2%
022502	4	0.67		
022503	4	0.67		

(二)以清水橋為例，石灰為變數製作試體模型進行抗壓試驗(如表 53、54、55、56 所示)。

表 53、清水橋配比模型試體之抗彎試驗

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	
022101	8	1.34	1.340 kgf/cm <sup>2</sup>	
022102	8	1.34		
022103	8	1.34		

表 54、石灰變數為 19.364%之抗彎強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	19.364%	74.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
022601	10	1.68	1.680 kgf/cm <sup>2</sup>	5%
022602	10	1.68		
022603	10	1.68		

表 55、石灰變數為 34.364%之抗彎強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	34.364%	59.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
030301	18	3.02	3.020 kgf/cm <sup>2</sup>	4.5%
030302				
030303				

表 56、石灰變數為 44.364%之抗彎強度與含水率

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	3.830%	1.915%	44.364%	49.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
030201	14	2.35	2.35 kgf/cm <sup>2</sup>	7.3%
030202	14	2.35		
030203				

(三)以清水橋為例，有機物為變數製作試體模型進行抗彎試驗(如表 57、58、59、60 所示)。

表 57、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 5：1 之抗彎強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	4.788%	0.958%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
03040-1-1	14	2.35	2.35 kgf/cm <sup>2</sup>	10.3%
03040-1-2	14	2.35		
03040-1-3				

表 58、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 3：3 之抗彎強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	2.876%	2.876%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
03040-2-1	14	2.35	2.35 kgf/cm <sup>2</sup>	13.6%
03040-2-2	14	2.35		
03040-2-3				

表 59、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 2：4 之抗彎強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	1.915%	3.830%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
030501	2	0.34	2.127 kgf/cm <sup>2</sup>	17.6%
030502	18	3.02		
030503	18	3.02		

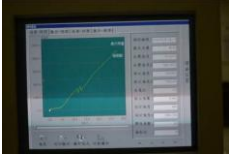
表 60、石灰比例固定，有機物(糯米：黑糖)比例為 1：5 之抗彎強度

灰漿配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
	0.958%	4.788%	13.364%	80.891%
試體編號	最大荷重 (kgf)	抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	抗彎強度平均值	含水率平均值(%)
030601	14	2.35	2.015 kgf/cm <sup>2</sup>	28.5%
030602	10	1.68		
030603				

## 六、疊砌磚之抗壓試驗

運用疊砌磚之抗壓試驗與糯米橋灰漿的抗壓強度數值相互比較，當應力應變曲線呈現直線現象時，至一定數值無降伏點，則該數值為灰漿破壞點抗壓強度。

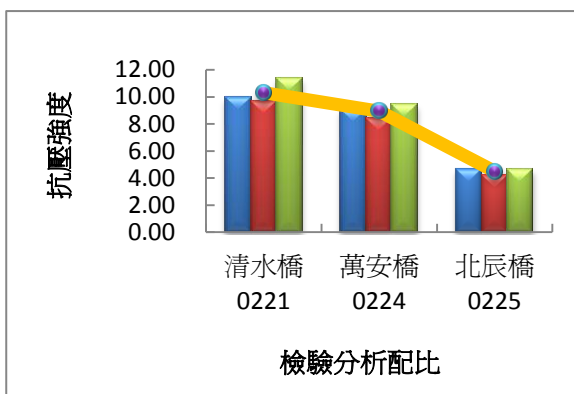
表 61、疊砌磚之抗壓試驗強度

試體編號	2 塊疊砌磚灰漿處抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	3 塊疊砌磚灰漿處抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	與抗壓強度數值比較 (kgf/cm <sup>2</sup> )	圖片說明
0225	5.93	6.01	4.48	
0226	7.46	10.54	12.547	
0305	13.27	8.96	12.800	
0306	7.34	17.5	5.693	

說明：0225與0226為有機物固定石灰為變數之設計配比，而0305與0306為有機物變數，石灰為固定值之設計配比，四組數據中發現3塊磚之抗壓強度都大於2塊磚之抗壓強度，可得知磚塊疊砌時由上往下的力量會增加其抗壓強度，但唯有0305之試體卻大不相同，其原因可能為磚塊本身之強度並不一致，磚塊之缺角也會影響整體之強度，以及磚塊排列時因黑糖含量多，水分不易蒸發，含水量過多導致磚塊灰縫處易滑動偏移，使其無法發揮出真實強度，而蓋平磚塊時，蓋平石膏之厚度會影響抗壓強度，所以石膏用量應足夠填滿與試體間之空隙即可。

## 七、抗壓試驗結果分析說明

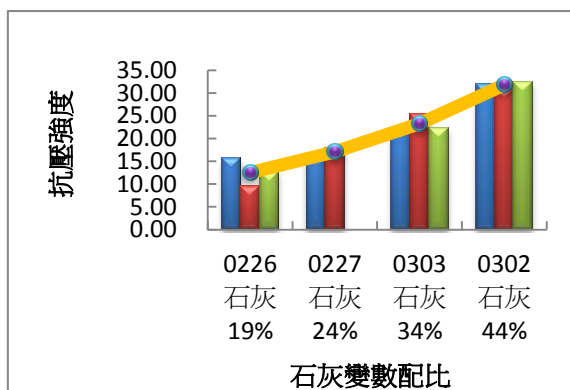
圖 3、利用化學檢驗分析結果之配比進行抗壓試驗



如圖 2 所示，可得知 0221 清水橋試體之抗壓強度 (10.306kgf/cm<sup>2</sup>) 較於萬安橋抗壓強度 (8.947 kgf/cm<sup>2</sup>) 與北辰橋之抗壓強度 (4.480 kgf/cm<sup>2</sup>) 來的高，根據檢驗分析之結果顯示石灰含量 0221>0225>0224，則石灰含量可能影響強度。

橋名 \ 配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
清水橋(0221)	3.830%	1.915%	13.364%	80.891%
萬安橋(0224)	3.311%	1.104%	4.853%	90.732%
北辰橋(0225)	3.975%	2.982%	8.043%	85%

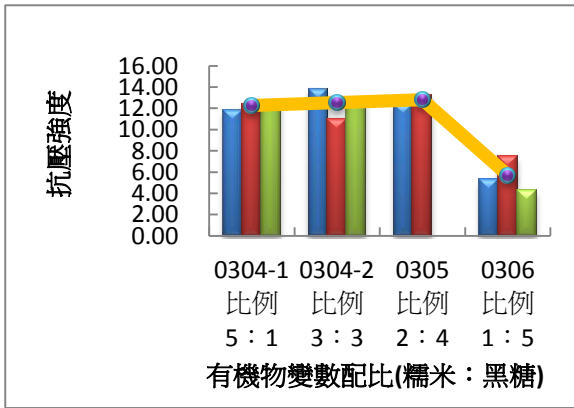
圖 4、以清水橋檢驗分析之配比為依據，石灰為變數進行抗壓試驗



如圖 3 所示，可得知 0226 之試體至 0302 之試體強度逐漸升高，這也顯示出石灰含量愈多，則強度愈高。0227 之試體，因拌和不均導致試體斷裂，所以僅有兩個試體可進行抗壓試驗。

試體編號 \ 配比	糯米	黑糖	石灰	黏土
0226	3.830%	1.915%	19.364%	74.891%
0227	3.830%	1.915%	24.364%	70.611%
0303	3.830%	1.915%	34.364%	59.891%
0302	3.830%	1.915%	44.364%	49.891%

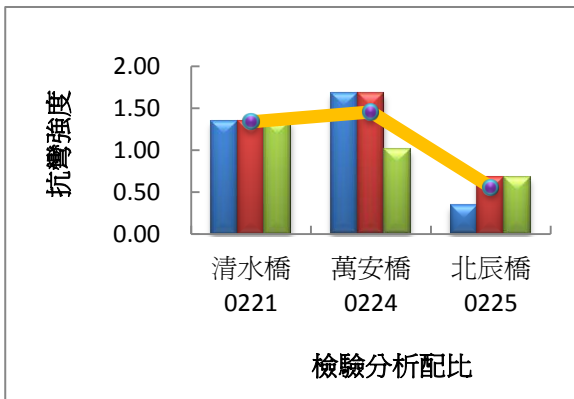
圖 5、以清水橋檢驗分析之配比為依據，並以有機物(糯米：黑糖)為變數進行抗壓試驗



如圖 4 所示，0304-1~0306 試體之配比，發現糯米粉與黑糖比值相近，平均強度也較高；反之，黑糖含量比值較多，所產生的強度較低。

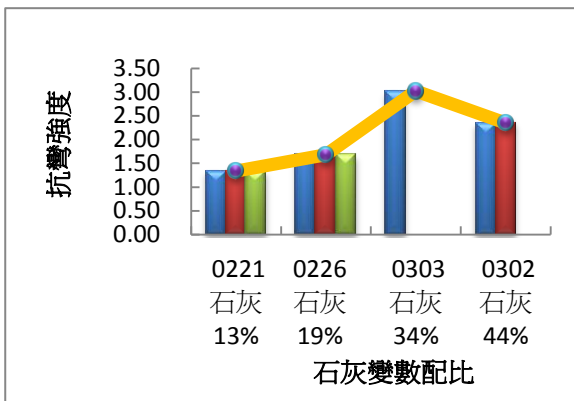
試體編號	糯米	黑糖	石灰	黏土
0304-1	4.788%	0.958%	13.364%	80.891%
0304-2	2.876%	2.876%	13.364%	80.891%
0305	1.915%	3.830%	13.364%	80.891%
0306	0.958%	4.788%	13.364%	80.891%

圖 6、利用化學檢驗分析結果之配比進行抗彎試驗



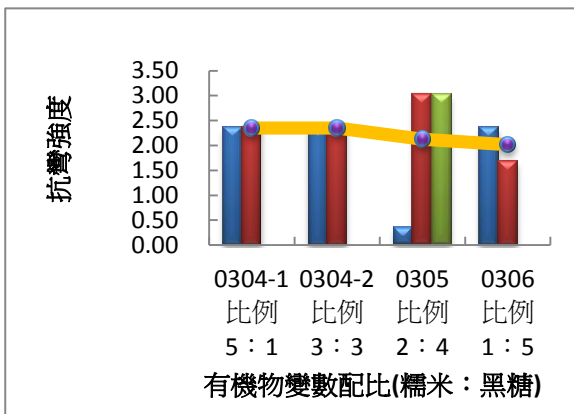
如圖 5 所示，0224 萬安橋試體抗彎強度(1.457kgf/cm<sup>2</sup>)為最高，有可能是因為其黑糖與石灰含量較北辰橋少，0221 清水橋試體石灰含量卻是最多，其抗彎強度(1.340 kgf/cm<sup>2</sup>)卻比北辰橋之抗彎強度(0.560 kgf/cm<sup>2</sup>)還高，可見於石灰含量過少或過高都會影響強度。

圖 7、以清水橋檢驗分析之配比為依據，並以石灰為變數進行抗彎試驗



如圖 6 所示，0221 至 0303 試體之抗彎強度因石灰之調升而提高，但石灰提高至一定的量時，強度逐漸下降，若石灰過量，則導致試體之強度無法提高。0303 之試體因未搗實完整，無法進行抗彎試驗。

圖 8、以清水橋檢驗分析之配比為依據，並以有機物(糯米：黑糖)為變數進行抗彎試驗



如圖 7 所示，0304-1 試體與 0304-2 試體之抗彎強度約略相同，有機物配比分別 5：1 和 3：3；0305 與 0306 黑糖含量都比 0304 配比還多，抗彎強度卻降低。0305 其中之一試體因拌和不均勻與未搗實完整，導致試體強度較低。

## 陸、討論

- 一、經由我們實際田野調查進行數座非破壞性強度試驗錘試驗中實驗出強度數據，介於  $30.60 \sim 45.90 \text{ kgf/cm}^2$  值之間，平均值為  $31.63 \text{ kgf/cm}^2$ ，有部份點位試驗強度變異較大，強度值呈現  $10.20 \sim 24.49 \text{ kgf/cm}^2$  之間，其為因受下列因素影響而影響其準確度：
  - (一)試驗表面光滑度或老化程度，當在粗糙的表面變小，正確的做法是利用金鋼砂將粗糙的表面磨成光滑後，再進行測試。
  - (二)試體的大小、形狀及剛度也會對試驗出來的反彈係數有所影響，由於衝擊而使試驗面進行試驗時，衝擊棒端會對混凝土表面產生過多的擊碎作用，導致反彈係數樣品有所移動，都將使反彈係數降低，改善之道為將試體用其他重物支撐並夾緊以減少其移動量。
  - (三)老舊結構物由於受周遭環境之影響，其表面常有碳化的情況發生，由於衝錘法為表面測試方法，自然會受到影響，一般受碳化之混凝土會有較高之反彈值。
  - (四)衝錘與試體表面間之夾角會導致估算混凝土強度時的誤差。
- 二、灰份之測定中，有機物質約占  $5 \sim 6\%$ ，而石灰中  $\text{CaO}$  約有  $8 \sim 9\%$ ， $\text{CaCO}_3$  約佔  $15\%$ ，故我們推測其他物質可能為三合土中的黏土及細砂成分所組成。從而強度試驗錘試驗中，發現嘉義清水橋的強度約介於  $20 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ ，而石灰中  $\text{CaO}$  含量約有  $13\%$ ， $\text{CaCO}_3$  約佔  $24\%$ ，與北辰橋相較  $\text{CaO}$  含量僅約有  $8\%$ ， $\text{CaCO}_3$  約佔  $14\%$ ，強度介於  $22.75 \text{ kgf/cm}^2$ ，由以上數據可知石灰的含量與強度成正相關。
- 三、非破壞性試驗錘試驗中，觀察同一層數之點位強度約略相近，此為堆砌時的糯米灰漿為同時段拌和，材料所發揮的性質均勻所致。
- 四、觀察抗壓及抗彎的模型試體中，發現石灰較多之配比，試體較容易產生裂痕甚至斷裂。而導致試體模型斷裂之因素，不僅僅是石灰之配比，在實驗過程中，搗實不完全、拌和不均，甚至拆模時也可能破壞其試體，這些都可能造成模型之斷裂，影響整體之強度。
- 五、經過不同配比的實驗後，發現黑糖也較多之模型試體數天後，表面乾硬快速，但內部之水份無法蒸發，所以試體仍然無法完全硬固。然而我們推測糯米灰漿中之黑糖含量並不多，以避免水分積蓄於內部，無法發揮其真實強度。
- 六、抗壓抗彎強度試驗後，將已破壞之模型試體烘乾，並且測定其含水率，佐證出是否符合抗壓抗彎試驗之強度數據。可得知含水率較低者，其抗壓抗彎強度會較高。

## 柒、結論

一開始進行糯米灰漿實驗因無明確的文獻記載，所以我們訂定不同之配比進行相關的實驗與抗壓抗彎強度試驗，但實驗之結果卻不與實際糯米橋之膠結材所產生的特性相符。

經過多次失敗之實驗，我們再次進行田野調查，並取得相關強度及配比參考資料，運用所得的實驗數值進行更深入的研究，探討出糯米灰漿膠結材之成分及配比，為想更進一步了解糯米橋膠結材中之真正成分與特性，我們將檢驗分析數據進行更深入的研究，藉此得知糯米灰漿正確成份與配比，並討論其糯米灰漿強度作為後續研究的發展，因糯米橋常面臨風雨災害。最後我們建議可將糯米灰漿防水之部分做更深入的研究。

- 一、以化學檢驗分析進行相關的測定，灰分含量測定結果中測得有機物含量約佔 4~7%、灰分含量約佔 93~95%，而在鈣含量測定中氧化鈣(CaO)約佔灰分含量比例為 4~13%、碳酸鈣(CaCO<sub>3</sub>)比例約佔 8~23%，然而檢驗出之數據，發現有機物所佔之比例相當微小，就此推測糯米橋中糯米、黑糖等成分並不多，可能為三合土或其他物質所組成。
- 二、依據檢驗分析之結果與配比之設計，隨後我們製作抗壓及抗彎試體模型進行其強度試驗，此試驗中我們發現添加石灰含量愈多，則強度相較於其他配比之試體抗壓強度來的較高，試驗齡期僅各為 14 天，試驗之強度為現地田野調查衝錘試驗強度 1/3~1/4 之間，由此可知，試驗的強度會隨著齡期而增加。
- 三、進行試體含水量測定，並根據含水量之測定結果得知當含水率愈高則強度愈低，相反的，含水率愈低則強度愈高。經由抗壓、抗彎及含水率的實驗求得之結果，找到符合目前糯米橋維護的相關方式與材料配方，以原物、原樣的傳統工法呈現，希望藉此保留歷史遺跡與原貌。
- 四、依化學檢驗分析得知萬安橋相較於其他糯米橋的氧化鈣(CaO)含量少，但其強度卻較高，且萬安橋與其他糯米橋成份之配比並不符合糯米橋之特性，所以我們推測其強度來源可能為修補時摻雜混凝土材料。
- 五、最後建議較符合糯米橋之配比有兩組，第一組以清水橋檢驗分析為例，試體編號 0302 之配比設計為糯米 3.830%、黑糖 1.915%、石灰 44.364%、黏土 49.891%，平均抗壓強度為 31.773 kgf/cm<sup>2</sup>，是所有配比設計中石灰含量最多，強度亦最高的，而其齡期僅有 14 天，其抗壓強度趨近於田野調查中所進行的強度衝錘試驗值 39.29 kgf/cm<sup>2</sup>，具有早期發揮強度的功用，亦可抵抗不預期的風雨災害。

在本次研究結果中，以第二組清水橋檢驗分析之結果為依據，進行最佳之配比設計，其配合比例為糯米 2.876%、黑糖 2.876%、石灰 13.364%，黏土 80.891%，該配比所製作之試體平均抗壓強度為 12.533 kgf/cm<sup>2</sup>，因齡期只有 14 天，能發揮出 1/3 倍的抗壓強度，可預估此試體如果齡期達到 28 天時，較接近符合清水橋之正確配比。透過田野調查得知的糯米橋強度與我們所設計之配比所測得強度較相符，這也證實此兩組設計配比是具有價值的。

## 捌、參考資料及其他

- 一、化學技能檢定工作室。乙級化學學術科快攻寶典試題全收錄 台灣 台科大 (民 102)。
- 二、陳耀如、洪國珍、劉叔松。工程材料(1) 台北 旭營圖書 (民 101)。
- 三、蔡得時、李尙成。材料試驗。矩陣圖書(民 89)。
- 四、漢光建築師事務所(西元 1997)-南投縣第三級古蹟國姓鄉北港溪石橋(糯米橋)之研究與修護計畫台北 蘭臺出版社 (民 86)。
- 五、洪煌凱。(民 92)「古蹟灰漿之力學與微觀特性研究」，取自：  
<http://handle.ncl.edu.tw/11296/ndltd/12811289106813001728>
- 六、陳准之。(民 93)「傳統磚砌建築灰縫材料性質之研究」，取自：  
<http://handle.ncl.edu.tw/11296/ndltd/49550317634765021010>
- 七、陳俊良。(民 93)「古蹟灰漿材料之配比與強度關係之研究」，取自：  
<http://handle.ncl.edu.tw/11296/ndltd/49691148032231463501>
- 八、歐新通。(民 93) 澎湖地區咾咕石建築灰漿之研究，取自：  
<http://handle.ncl.edu.tw/11296/ndltd/91914884433097957040>
- 九、張其樂，趙雅婷，賴姿婷。(民 99) 老祖宗的智慧結晶—糯米橋，取自：  
<http://www.ylvs.chc.edu.tw/old/teach/ylvs770/race-9.html>。
- 十、文化部(縣市文化局) 2012 年 11 月，取自：[http://www.moc.gov.tw/artorg\\_country.do](http://www.moc.gov.tw/artorg_country.do)
- 十一、雲林縣華山糯米橋資料 2012 年 10 月 23 日，取自：<http://eng3.swcb.gov.tw/>
- 十二、和興石灰工廠(股)公司 2012 年 10 月，取自：  
<http://www.hhlime.com.tw/?gclid=CNSCmuOjoLoCFYtfpQodfzMA7Q>
- 十三、強度衝錘試驗，取自：<http://cae-so.com/NDT-2.html>
- 十四、拱力學原理，取自：  
<https://tw.knowledge.yahoo.com/question/question?qid=1609100207451>
- 十五、南投縣政府文化局圖書館-文化局縣史館圖書，取自：<http://library.nthcc.gov.tw/>
- 十六、中央社 <https://tw.news.yahoo.com/嘉義百年糯米橋-傳統建築寶典-025107797.html> (中央社記者黃國芳)

## 【評語】 091202

研究團隊藉由研究糯米橋灰漿成分與配比，提供合適之糯米橋古蹟修復材料，並進行完整試驗，包含綜合現場非破壞性抗壓試驗與實驗室不同配比組成試體之力學試驗與化學成分分析，研究程序完整，對鄉土歷史古蹟之維護有建設性。改進建議如下：

1. 在實驗設計上相當完整也符合研究議題所需，惟試體齡期不足對試驗結果與結論之說服力較顯不足。而所建議二組配比組成，在14天時卻有明顯強度差異，宜進一步探究其強度差異成因。
2. 糯米橋灰漿成分中，糯米、黑糖、石灰與黏土各有其功能，水分含量亦是關鍵，在最後之討論除提供最佳建議配比外，應說明各成分之功能與比例多寡對力學強度之影響。
3. 現場強度試驗錘試驗可能會受限於灰縫尺寸大小影響量測結果，宜進行室內試驗校正或說明對量測結果正確性之影響。