

紅毛土之謎--熱蘭遮城糯米牆

摘要

「紅毛土」即是台語中的三合土、水泥、混凝土的台語發音，早期並無水泥，故熱蘭遮城（又稱紅毛樓）以蚵殼灰、砂、糯米汁、糖水等疊磚而成，熱蘭遮城的城牆殘蹟，經研究發現含糯米及糖的成分，故此又稱為「糯米牆」；其實真正含「糯米」的成分並非城牆本身實為黏結磚塊與磚塊間的灰漿黏著劑（紅毛土）。

我們的研究主要探討紅毛土不同成分的特性，分別就硬化時間、硬度、溫度、抗酸性和韌性進行試驗：1.考驗蚵灰取代熟石灰的可行性；2.不同比例黑糖漿試體的差異；3.不同比例糯米試體的差異。研究結果如下：1.熟石灰在硬度、抗酸性和韌性上優於燒蚵灰。2.黑糖比例增加，試體硬度也會增加。3.黑糖比例增加，試體的抗酸性也會增加。4.黑糖比例增加，試體的韌性也會增加。5.糯米比例增加，試體硬度也會有些微的增加。6.添加糯米之試體並無抗酸的效果，反而會增加灰漿被侵蝕的情形。

壹、 研究動機

億載國小臨近熱蘭遮城（安平古堡），去參觀的時候。解說員會介紹熱蘭遮城古城牆的黏著材料是由燒蚵灰、砂、蚵殼、糯米和糖漿所製成叫做「糯米灰漿」。故此古城牆本身又被稱為「糯米牆」。我們很好奇糯米要如何做城牆？燒蚵灰真可以替代熟石灰？為什麼要加入糖漿其功能為何？糯米和糖漿作成的城牆夠堅固嗎？荷治時期沒有空氣污染問題，但如今酸雨問題日漸嚴重，「糯米牆」能抵抗酸雨侵蝕嗎？



圖 1-1 熱蘭遮城糯米牆殘蹟



圖 1-2 解說員解說

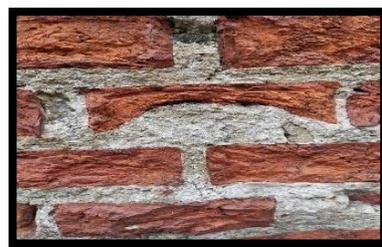


圖 1-3 糯米灰漿

貳、 研究目的

目前有關糯米灰漿所能獲得的資料並不多，大都來自文獻記載或老一輩的匠師口述，能夠知道的只是大概的施工方法及材料的配比，而且受到當時的時空和地域背景不同在材料的配比上也有所不同，是值得探究的主題。

本研究所使用文獻中所提及之材料「石灰、砂、蚵殼、糯米漿、糖漿」(李德河、張舜孔、吳建宏，2011)，另外還選定曾參與熱蘭遮城(安平古堡)糯米牆修復工作的劉匠師聰連口述材料「燒蚵灰、砂、蚵殼、糯米漿、糖漿」配比設計進行實驗探討。

- 一、探討添加熟石灰或燒蚵灰之糯米灰漿在硬化時間、硬度、溫差、抗酸性和韌性之差異。
- 二、探討不同比例之糯米粉混合熟石灰製作出的方塊灰漿試體在硬化時間、硬度、溫差、抗酸性和韌性之差異。
- 三、探討不同比例之糖漿混合熟石灰製作出的方塊灰漿試體在硬化時間、硬度、溫差、抗酸性和韌性之差異。

參、 研究流程

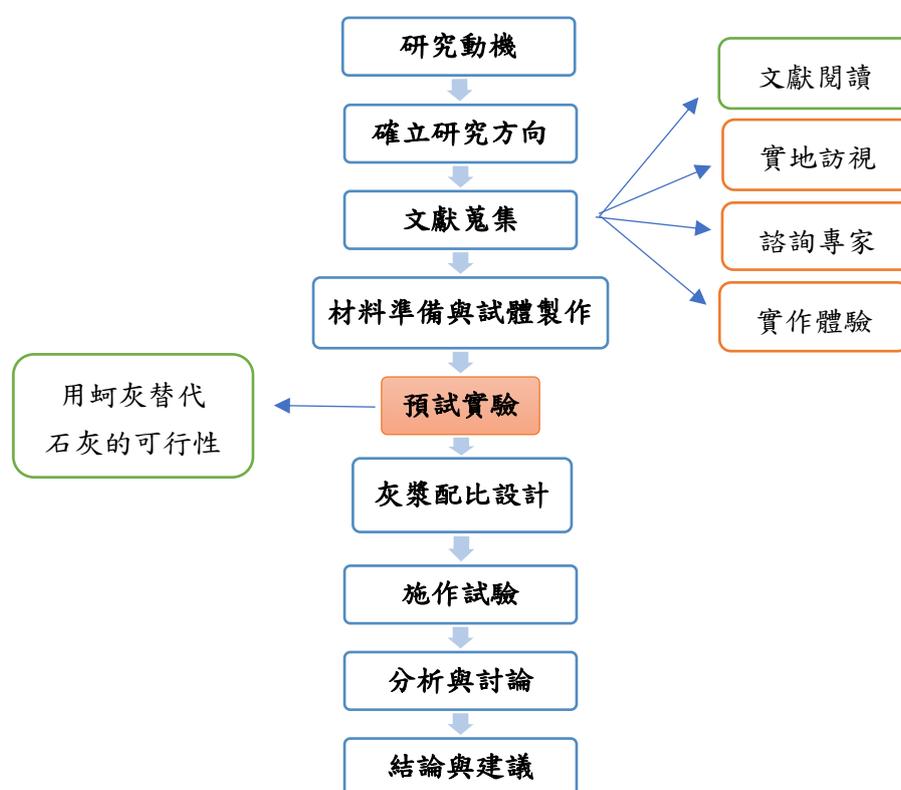


圖 3-1 研究流程圖

肆、 文獻蒐集

文獻蒐集，將以文獻資料閱讀、實地訪視、諮詢專家及實作體驗四部分加以說明如下：

一、 文獻資料閱讀：

(一) 熱蘭遮城灰漿

臺灣自荷治時期開始，引入磚砌建築，灰漿開始被大量使用作為建築黏結材，灰漿主要以石灰作為膠結材，使用時依用途不同或地緣關係或匠師調製配比的的不同，以不同比例摻合各種的填充料，因此各式各樣的灰漿因應而生。

根據 1807 年臺灣縣誌之相關記載：「台灣城，在安平鎮一鯤身，沙磧孤浮海上。……大抵比城磚砌，層疊悉以糖水糯米汁搗灰覆之，堅不可劈。」說明安平古堡磚砌乃是用「石灰、糯米漿、糖漿」混合而成；傅朝卿(2001)「台南市古蹟與歷史建築總覽」進一步說明，安平古堡由「糯米汁、糖漿、砂及蚵殼粉等材料」混合磚砌而成；李德河(2008) 研究認為熱蘭遮城灰漿存在蚵殼成分，較石灰粗且堅硬，為灰漿提供一定強度，所扮演角色均異於石灰。

綜上所述熱蘭遮城灰漿材料包含：「石灰、砂、蚵殼、糯米漿、糖漿」。

(二) 紅毛土

「紅毛土」即是台語中的三合土、水泥、混凝土的台語發音，早期並無水泥，故熱蘭遮城(紅毛樓)整座城堡以糖水和糯米汁搗合蚵殼灰、砂等疊磚而成，並稱「三合土」，又因先民稱荷蘭人為「紅毛番」，故紅毛番之三合土又稱「紅毛土」，也就是今天的熱蘭遮城。

(三) 糯米灰漿

早在 1500 年前，中國古代建築工人通過把糯米和熟石灰以及石灰岩混合，製成漿糊將其填補在磚石的空隙中，製成了超強度的有機水泥—「糯米灰漿」。分析研究表明，糯米灰漿含有特殊的有機與無機合成材料。無機成分是碳酸鈣（石灰）有機成分則是（支鏈澱粉）來自於添加的（糯米）。

科學家們認為長城千年不倒關鍵在「支鏈澱粉」，與中國長城的城牆黏合物中發現的糯米

成分有直接關係，糯米灰漿被認為是長城的主要黏合材料。有些古建築物非常堅固，甚至現代推土機都難以推倒，還能承受強度很大的地震。而糯米灰漿乾得比較慢，需要 10 多天才能逐漸凝固，而全部凝結，需要大概 1 年的時間。不過，在此之後，它們將變得堅不可摧。

(四) 石灰

石灰又可分為生石灰與熟石灰。石灰的循環，可分為三個過程：「煅燒過程、熟化過程和碳化過程」(羅揚宗，2009)。

生石灰：來自於富含碳酸鈣 (CaCO₃) 之大理岩、石灰岩、貝殼及穴洞沉積物，當窯燒至 900°C 時，及分解釋放出二氧化碳 (CO₂)，同時產生生石灰 (CaO)。

煅燒過程 $\text{CaCO}_3 + \text{HOT} \rightarrow \text{CaO} (\text{生石灰}) + \text{CO}_2$

熟石灰：生石灰與水接觸時，在水中吸收的水量 (H₂O) 可達自身重量四分之一，此舉將引起水化熱，使得溫度大幅升高。這種作用將導致石灰脹碎，最後成為粉末狀。這種粉末稱為熟石灰 Ca(OH)₂。

熟化過程 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 (\text{熟石灰}) + \text{HOT}$

熟石灰 Ca(OH)₂ 要硬化，需要吸收二氧化碳才會形成硬化的碳酸鈣 (CaCO₃)，要吸收足夠的二氧化碳需要很長的時間，(硬化的時間要很長，與厚度有關；硬化則與強度有關)。

碳化過程 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

(五) 蚶灰

蚶灰即牡蠣殼經 500 度高溫之窯火燒製後的產品，這項早期傳統窯業如今僅見於臺南市安平區之「蚶灰窯」。蚶殼在蚶灰窯經過加熱至攝氏 500 度，分解成蚶灰及二氧化碳 CaCO₃(蚶殼，碳酸鈣)加熱至攝氏 500 度分解為 CaO(蚶灰，氧化鈣)+CO₂(二氧化碳)。

蚶殼: CaCO₃(碳酸鈣) 加熱至攝氏 500 度分解為

蚶灰: CaO(氧化鈣)+CO₂(二氧化碳)

根據(臺南研究資料庫) 蚶灰窯其實是燒蚶殼的窯爐。臺南養蚶盛行，食用之後的蚶留下了大量的蚶殼，看似廢棄物，但蚶殼燒製成灰之後，有很多的用途，十七世紀荷蘭統治時期即有灰窯工匠的記載，一級古蹟安平古堡的城牆遺跡，守護王城近四百年的紅磚牆，當年就是使用蚶灰調製而成的黏著劑來蓋造，蚶灰的歷史久遠由此可見。

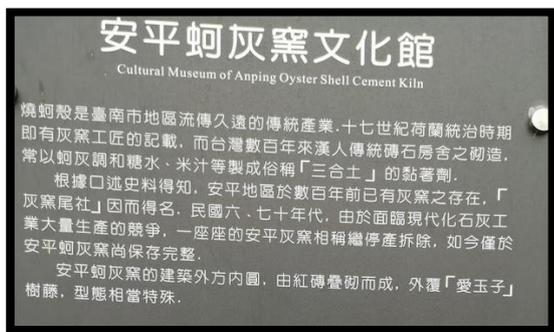


圖 4-1 安平蚵灰窯文化館說明



圖 4-2 安平蚵灰窯

(六) 蚵殼

蚵殼常見於濱海地區之傳統建築灰漿中，為就地取材將牡蠣殼敲碎後作為骨材用，屬於輕質的骨材。李德河（2011）研究發現熱蘭遮城灰漿中的蚵殼，可能為古時在煨燒蚵殼時，因溫度不足而煨燒不完全的產物，故灰漿中之蚵殼可能原為煨燒蚵灰的一部份，更進一步認為熱蘭遮城南殘牆灰漿中的蚵殼顆粒較石灰為粗且堅硬，能在灰漿中提供一定的強度，蚵殼在灰漿中所扮演的角色均異於石灰，有其存在之必要性。

(七) 糯米

中國自古即使用糯米漿、糖漿等碳水化合物液體拌合石灰作為黏結材。糯米的主要成分是澱粉，澱粉的分子連接成直線狀，稱直鏈澱粉；連接成分支狀，稱支鏈澱粉。支鏈澱粉分子鏈，其含量越高，米質越富黏性；而糯米的支鏈澱粉含量高達 99 % 直至 100 %，所以糯米漿中因富含支鏈澱粉分子，故黏結力強，且最大特性是處於潮濕狀態下其離子能不斷反應增生（自修復性），因而提高耐久性，糯米實際上扮演的是「黏合劑中的黏合劑」。添加糯米的灰漿黏合的磚石建築，結實耐久，堅固異常（大紀元報，2017）。

(八) 糖漿

傳統灰漿使用黑糖以增加灰漿強度與黏著性。在灰漿中加入適量糖漿可增加強度、延長初凝時間、提早終凝時間，且具有吸水率低、耐酸性高之特性（王龍盛，2003）。早期在石灰砂漿中添加糖漿，其功用就如同混凝土的減水劑一樣，能夠減少用水量，且能提高石灰砂漿試體的

強度（羅揚宗，2009）。

二、實地訪視

我們安排了到「安平古堡」和「安平蚵灰窯」的實地探訪，想更清楚的去看看「糯米牆」的樣子。首先糯米牆的本體並不像想像中的巨大。其次認識到我們的研究標的「糯米灰漿」是用來作為磚砌的黏著劑，而且真的可建築用。再者發現灰漿內有很多肉眼就能見的蚵殼。及後閱讀了許多熱蘭遮城的相關資料。最後也參觀「安平蚵灰窯」了解古早時期安平當地煅燒蚵殼成蚵灰，在建築和造船上已被大量使用作為黏著劑之用。



圖 4-3 灰漿上的蚵殼



圖 4-4 熱蘭遮城



圖 4-5 熱蘭遮城介紹

三、諮詢專家

我們也透過 email 的方式請教了二位對「灰漿」有深入研究的專家，分別是：成功大學土木工程系李德河教授和成功大學建築系黃恩宇教授。他們除了給我們許多具體的寶貴意見外，我們能得到專家的回信更是雀躍不已，大家對於要研究的主題更有動力。

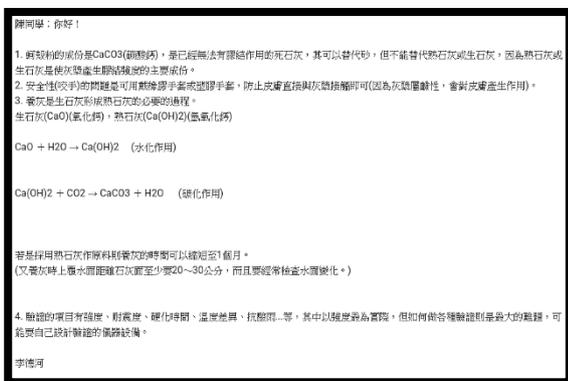


圖 4-6 李德河教授回函



圖 4-7 黃恩宇教授回函

四、實作體驗

我們也去登門拜訪劉匠師聰連（曾參與熱蘭遮城糯米牆古蹟修復工作），劉工匠經驗豐富曾參與許多台南市古蹟（赤崁樓…）和廟宇等修復工作。他很熱情的邀請我們到他位於仁德區的工作室。談話內容節錄如下：

劉師傅說：關於糖漿，糯米牆已年代久遠，糖分可能為雨水沖刷滲透而遺失，故其所佔比例存疑，也許更多。又實際施工時，認為糖漿為非必要，其所提供的黏性，糯米汁已足以替代。荷治時期加入糖漿，因為煉糖後遺留底部的糖底為濃稠苦澀難以入口，因當時糯米價高，容易被偷取，所以混合糖底，便不會有人想偷取，也能廢物利用，此為祖先之智慧。

劉師傅又說：關於石灰，荷治時期沒有水泥，大都使用石灰為建材，當時已有蚵灰（經過燒製），特別濱海地區容易取得，故燒蚵灰為荷治時期廣泛運用的建築黏結材。

劉師傅說：關於砂，比例越多強度越強，但黏度不佳，表面粗糙，需以石灰和糯米幫助，才能增加黏結度和工作便利性。

除了幫我們逐一介紹「糯米灰漿」的材料及如何購得外，在現場由劉工匠的兒子（劉富毅先生）教導我們灰漿製作的工序及其應該注意的地方。我們提出了許多的問題皆獲得解答。最後他更準備了材料讓我們實際施作。此行真是收獲滿滿。



圖 4-8 劉師傅示範



圖 4-9 實作體驗

伍、 材料製備與試驗方法

一、材料製備

(一) 灰漿材料之說明

1. 石灰

本研究所用之在地石灰，為台南關仔嶺礦採石灰岩所加工製成的石灰（又稱特白灰），一般建築材料行可購得。白灰需經加水待 3 個月養灰完成後，成為（熟石灰）備用。



圖 5-1 關子嶺特白灰

2. 海砂

本研究所使用之在地海砂，取自緊鄰學校的台南市安平區漁光島（秋茂園）之海邊。

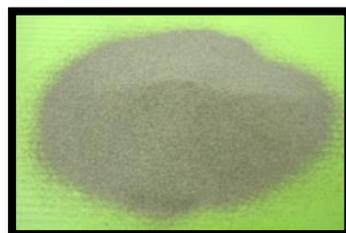


圖 5-2 漁光島海砂

3. 蚵殼粉

本研究採用劉工匠聰連所建議使用之蚵殼粉購自高雄湖內新吉勝商行，用途為建材與飼料添加物。



圖 5-3 蚵殼粉

4. 蚵殼

本研究採用劉工匠聰連所建議的蚵殼為高雄湖內新吉勝商行所售蚵殼。



圖 5-4 蚵殼

5. 糯米漿

本研究採用劉工匠聰連所建議的上統牌水磨糯米粉，100g 糯米粉約加入 500ml 的水，放入大同電鍋（外鍋 1 杯水）蒸煮後備用。



圖 5-5 糯米粉

6. 黑糖漿

研究採用劉工匠聰連所建議的台糖公司生產之黑糖漿，從一般賣場可購得。



圖 5-6 黑糖漿

(二) 糯米漿製備方法

糯米漿之製備方法（300g 的糯米漿）：本研究採用上統牌水磨糯米粉來製作糯米漿。

1. 先秤出 300g 的糯米粉與 1500g 的水。
2. 將糯米粉加入水中攪拌均勻，放入電鍋。
3. 外鍋倒一杯水，待蒸煮完成，約 30mins.。
4. 糯米漿呈現黏稠狀備用。



圖 5-8 糯米漿製備

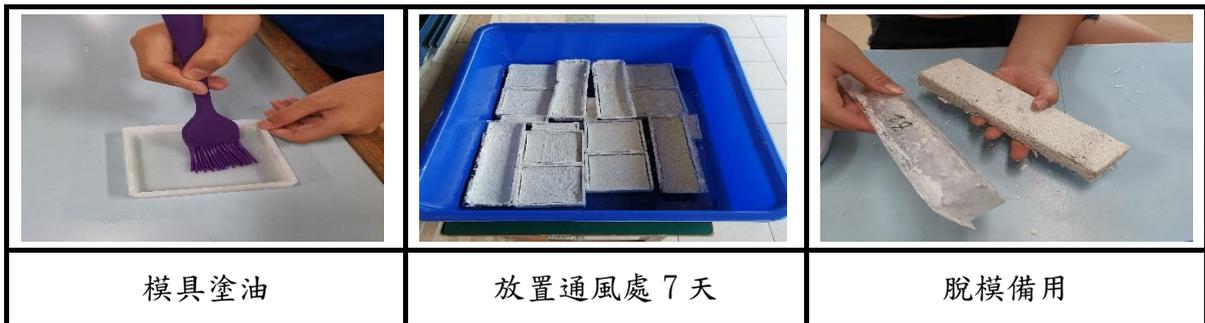
(三) 酸度 4.0 水溶液（模擬酸雨）製備方法

1. 把 1 瓶約 300c.c.醋酸（酸度 2.6）加入水桶內。
2. 加水稀釋。
3. 順、逆時針各攪拌 10 次，放入酸鹼檢測筆。
4. 重複步驟 2、3，調配水溶液直至酸度 4.0。



(四) 灰漿試體製備方法

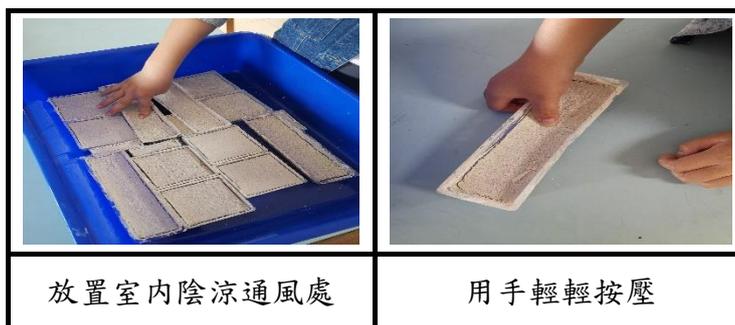
1. 將熟石灰、砂、蚵殼、糯米漿和黑糖漿，按試體重量比例依序放入容器中。
2. 將材料攪拌均勻，沒有結塊。
3. 在模具中先行塗油，以方便脫模。
4. 攪拌完成的灰漿倒入模具中。
5. 放置室內通風無陽光直接照射處等待 7 天（養護）。
6. 待試體硬化即可脫模備用。



二、 試驗方法

(一) 實驗方法一：試體硬化時間

灰漿硬化時間之長短，十分受到工匠們的重視，因為古代建築是以磚塊層層堆疊的方式蓋造，如果硬化速度太慢不但會影響工期進度，嚴重時會因磚牆受力不均，造成結構傾斜之影響。故此想要了解不同灰漿試體硬化所需時間的差異。



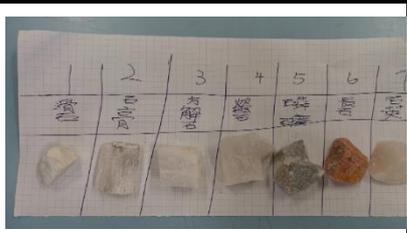
1. 試驗步驟：

- (1) 將製作完成的灰漿試體，放置室內陰涼通風處，等待試體完全硬化，此過程又稱「養護」。

- (2) 分別在第 3 天，第 5 天，第 7 天各進行一次觀察記錄，除了用眼睛觀察試體表面硬化情形，也用手輕輕按壓其表面，查看其硬化程度。

(二) 實驗方法二：莫氏硬度試驗

藉由 1822 年德國礦物學家 Frederich Mohs 提出莫氏硬度劃痕硬度測試的原理。將材料硬度從 1 到 10 進行劃分，硬度大小取決於它們在標準材料上產生劃痕的能力。試體經過七天的（養護）後，其實質硬度為何？故此透過刻劃硬度試驗，了解其在莫氏硬度表中的數值。硬度是礦物抵抗磨損的能力。兩種礦物互相磨擦，硬度較小的會被刻劃出痕跡。是透過兩種物體來試驗，如方解石（3）和石英（7）相互刻劃，方解石會被劃出畫痕（則石英硬度大於方解石），由此可知試體的硬度數值。我們使用莫氏硬度(1 滑石 2 石膏 3 方解石 4 螢石 5 磷灰石 6 長石 7 石英) 與試體刻劃，以了解試體的硬度。

硬度	1	2	3	4	5	6	7
名稱	滑石	石膏	方解石	螢石	磷灰石	正長石	石英
莫氏硬度表							
							
實際使用的礦物							
							
互相刻劃							

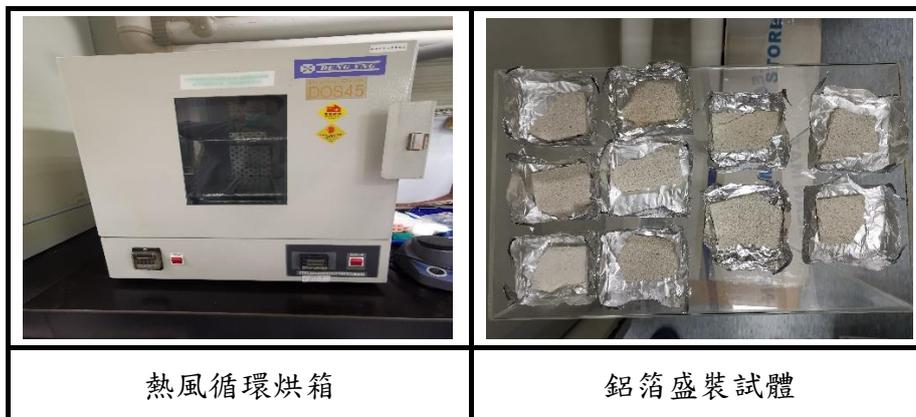
1. 試驗步驟：

- (1) 將欲檢測的試體與一個或多個已知硬度的材料相互刻劃。
- (2) 分別利用莫氏硬度(1 滑石 2 石膏 3 方解石 4 螢石 5 磷灰石 6 長石 7 石英) 的礦物，依序與試體進行刻劃。
- (3) 將結果記錄下來，並比較各個試體的硬度差異。

(三) 實驗方法三：溫度差異試驗

探討不同比例試體在常溫及 60 度高溫環境下的變化，在台南的酷熱夏天，建築物長時間在戶外受到毒辣的陽光曝曬，根據氣象局資訊 2021 年 5 月 14 日全台最高溫達 40.2 度（台南市玉井區），受到溫室效應和極端氣候的影響，極端高溫會更常出現，因此想了解灰漿在高溫環

境下的變化。將作好的試體放在常溫及 60 度的定溫下（熱風循環烘箱）放置五天，並觀察試體五天後的變化。



1. 試驗步驟：

- (1) 將欲檢測的試體將其一部分取下，並放在鋁箔盒中。
- (2) 逐一將試體放入熱風循環烘箱放置在 60 度的熱風環境中。
- (3) 五天後將試體取出，並進行比較。

（四）實驗方法四：抗酸性試驗

「酸雨」顧名思義，雨是酸的。燃料在燃燒過程中，產生一氧化碳、二氧化硫和氮氧化物，當這些物質排放至大氣中，經光化學反應變成硫酸和硝酸等酸性物質，雨水之酸鹼(pH)值便會降低，變成酸雨。酸性粒子會沈積在建築物和雕像上造成侵蝕。交通工具的廢氣、運用化石燃料的發電廠及工業生產程序之排放，都是「酸雨」的主要來源。

環保署研究報告中，已統一將「酸雨」正式定義為 pH 值達 5.0 以下的標準。2017 年環保署委託中央大學「全國酸雨監測集成分分析」調查顯示，新北板橋地區在 7 月和 12 月底，分別測得雨水 pH 值達到 3.1、3.67。故此我們試著用 pH 值 4.0 的水溶液來模擬「酸雨」對灰漿的侵蝕情形。

把白醋倒入容器中，加水稀釋，利用 pH 值測試筆直到 pH 值 4.0 來模擬酸雨。測量試體實驗前和實驗後的重量，若重量差越大，就表示試體抗酸能力低；反之重量差越少，表示試體抗酸能力高。



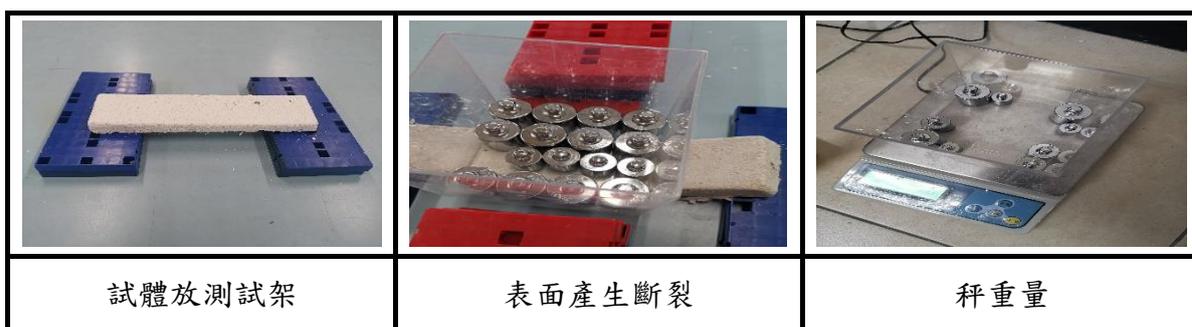
1. 試驗步驟：

- (1) 測量試體實驗前之重量。
- (2) 將試體輕輕的放入容器中。
- (3) 慢慢的倒入之前製作完成的酸度 4.0 水溶液（酸雨）。
- (4) 水溶液要完全覆蓋試體，並放置陰涼處停置 3 天。
- (5) 3 天後把試體取出並風乾。
- (6) 3 天後測量試體重量。
- (7) 記錄試體實驗前和實驗後之重量差異。

（五）實驗方法五：韌性試驗

韌性：試體可承受變形而不發生斷裂的能力。試體經過七天的（養護）會逐漸硬化。由於糯米灰漿乾的比較慢，需要 7 天才能逐漸凝固，而全部碳化則需要一兩年時間才能完全發揮其作用。不過，在此之後，它們將變得牢不可摧。時間越久，糯米灰漿黏結的城牆就越加牢固，甚至超過水泥漿韌性。希望能瞭解不同比例灰漿試體的韌性及其差異。

透過承載重量來測試灰漿試體的韌性，承載重量越重則其韌性越高，反之則韌性越低。



(一) 試驗步驟：

- (1) 將欲檢測的試體放在測試架子上。
- (2) 在試體上方放置正方形盒，加砝碼增加其重量。
- (3) 試體產生斷裂則停止加砝碼。
- (4) 將方形盒連同其內的砝碼放置電子秤秤重量，並記錄重量。

陸、 預試實驗

一、預試實驗（探討添加熟石灰或燒蚵灰之糯米灰漿之差異）：

預試實驗目的在探討添加熟石灰或燒蚵灰之糯米灰漿在硬化時間、硬度、溫差、抗酸性和強度之差異。作為後續實驗之試體使用（熟石灰或燒蚵灰）材料之可行性參考。

預試實驗 A 組試體得參考李德河（2011）在熱蘭遮城對灰漿的研究成果「熟石灰+砂+牡蠣殼+糯米+黑糖」作為（A1）試體之配比；以濱海地區常用的燒蚵灰來取代熟石灰「燒蚵灰+砂+糯米+黑糖」作為（A2）試體之配比來進行實驗。其試驗結果將作為燒蚵灰取代熟石灰是否可行的參考。預試實驗 A 組試體材料及配比分數，如表一：

表一：

試體/材料配比 g	石灰	砂	蚵殼	糯米	黑糖漿
A1	熟石灰 1	0.15	0.25	0.032	0.008
A2	蚵灰 1	0.15	0.25	0.032	0.008

註：配比为重量比；1=100g

(一) 預試實驗結果：

1. 試體硬化時間

灰漿試體/天數	第 3 天	第 5 天	第 7 天
A1	X	V	V
A2	X	X	V

說明：v 有硬化、X 沒有硬化

A1 第 5 天已經硬化，A2 要到第 7 天才硬化。故此在硬化速度上熟石灰試體比蚵灰試體快。

2. 莫氏硬度試驗

試體 / 礦石	1 滑石	2 石膏	3 方解石	4 螢石	5 磷石	6 長石	7 石英	A1 vs A2
A1	X	X	X	v	v	v	v	X
A2	v	v	v	v	v	v	v	v

註：刻出刮痕 v；沒有刮痕 X，A2（斷裂）

試驗結果在硬度上 A1 在 3-4 之間，A2 皆低於(1 滑石 2 石膏 3 方解石 4 螢石 5 磷石 6 長石 7 石英) 等礦物，而且刻劃時斷裂成碎塊；A1 和 A2 互相刻劃，在硬度上 A1 試體大於 A2 試體。

3. 溫度差異試驗

試體/溫度	常溫	高溫(60 度)
A1		
A2		

A1 和 A2 試體不論在常溫或高溫（60 度）的環境下皆沒有變化。

4. 抗酸性試驗

試體/重量	實驗前 g	實驗後 g	重量差 g
A1	96	91	5
A2	87	X	X

註：無法測量 X；A2 泡酸後完全分解在溶液中

A1 泡酸	A2 泡酸（完全分解）
	

A1 泡酸乾燥後為固體樣態；A2 泡酸後完全分解在溶液中。故此 A2 試體無抗酸效果。

5. 韌性試驗

試體/承重	重量 g
A1	1150g
A2	300g

在承重實驗，A1 (1150g) 重量超過 A2 的 (300g)，A1 試體的韌性比 A2 試體高。

綜合上述的實驗結果，A1 凝固速度較 A2 快；在硬度上 A1>A2；在常溫和高溫下沒有改變；抗酸性上 A1 優於 A2；A1 在韌性上優於 A2。另 A2 在脫模時容易裂開。在各方面的試驗 A1 熟石灰皆優於 A2 燒蚵灰之效果。

柒、 灰漿配比設計

一、 B 組試體材料及配比說明：

預試實驗 A2 試體 (燒蚵灰) 在抗酸測試中試體完全分解散落水溶液各處；另外 A2 試體脫模取出時容易斷裂成小塊，顯示燒蚵灰取代熟石灰之效果不佳。為免影響後續研究探索，經討論後，後續實驗之驗證，試體的材料決定採用熟石灰 (A1)，並配以砂、蚵殼、糯米粉和黑糖漿，如表二：

表二：

材料/試體配比	熟石灰	砂	蚵殼	糯米	黑糖漿
B1	1	0.15	0.25	0.032	0.008
B2	1	0.15	0.25	0.032	0.0
B3	1	0.15	0.25	0.032	0.05
B4	1	0.15	0.25	0.032	0.1
B5	1	0.15	0.25	0.032	0.3

註配比為重量比；1=100g

二、 C 組試體材料及配比說明：

因預試測試時 (燒蚵灰) 效果不佳，故 C 組實驗試體材料及配比皆採用 A1 配比為基準，

調整實驗標的材料及其配比，如表三：

表三：

材料/試體配比	熟石灰	砂	蚵殼	糯米	黑糖漿
C1	1	0.15	0.25	0.032	0.008
C2	1	0.15	0.25	0.0	0.008
C3	1	0.15	0.25	0.06	0.008
C4	1	0.15	0.25	0.1	0.008
C5	1	0.15	0.25	0.2	0.008

註：配比为重量比；1=100g

捌、研究結果與討論

一、B 組試體試驗結果（探討不同比例之黑糖漿混合熟石灰製作出的灰漿試體在硬化時間、硬度、溫差、抗酸性和韌性之差異）：

（一）B 組試體硬化時間

灰漿試體/天數	第 3 天	第 5 天	第 7 天
B1	X	v	v
B2	X	v	v
B3	X	v	v
B4	X	v	v
B5	X	v	v

說明：v 有硬化、X 沒有硬化

在硬化時間上，B 組試體（B1、B2、B3、B4 和 B5）在第三天的時候皆沒有硬化（摸起來仍然很軟）。到了第五天、第七天時就已經硬化（手指壓不下去）。發現有、無黑糖漿皆在第五天硬化，故此添加黑糖與否並無差異，不會減少或增加硬化的速度。另外七天早期硬化速度上不同比例的黑糖漿試體皆有不錯的效果。（一般認為硬化時間需要 7-10 天）。

(二) 莫氏硬度試驗

試體 /礦石	1 滑石	2 石膏	3 方解石	4 螢石	5 磷石	6 長石	7 石英
B1	X	X	X	v	v	v	v
B2	X	X	v	v	v	v	v
B3	X	X	X	v	v	v	v
B4	X	X	X	v	v	v	v
B5	X	X	X	X	X	v	v

註：刻出刮痕 v；沒有刮痕 X

在硬度試驗中，B1（黑糖 0.008）的硬度在 3-4 之間；B2（黑糖 0.0）的硬度在 2-3 之間；B3（黑糖 0.05）、B4（黑糖 0.1）硬度在 3-4 之間；最後 B5（黑糖 0.3）硬度在 5-6 之間。B2 無添加黑糖之試體硬度最低；B1、B3 和 B4（黑糖 0.008、0.05 和 0.1）無太大差異；B5 添加黑糖 0.3 之試體硬度最高；發現當 B5（黑糖 0.3）添加比例增加，是 B4（黑糖 0.1）的 3 倍時，硬度會有顯著的增加。黑糖比例增加，硬度也會增加。

(三) 溫度差異試驗

試體/溫度	常溫	高溫(60 度)
B1		
B2		
B3		
B4		
B5		

在溫度差異試驗，B 組試體（不同比例之黑糖漿試體）在常溫和高溫 60 度環境下並沒有變化，沒有龜裂、結塊及斷裂的情形。故此有無黑糖漿添加之試體皆能適應高溫環境。

（四） 抗酸性試驗

試體/重量	實驗前 g	實驗後 g	重量差 g
B1	96	91	-5
B2	179	164	-15
B3	143	138	-5
B4	141	135	-6
B5	111	109	-2

註: 無法測量 X，重量差為減少的重量

在抗酸實驗中，B1（黑糖 0.008）的泡酸重量差減少約為 5g；B2（黑糖 0.0）的泡酸重量差減少為 15g；B3（黑糖 0.05）重量差減少為 5g；B4（黑糖 0.1）重量差減少 6g；最後 B5（黑糖 0.3）泡酸重量差減少 2g。B2（黑糖 0.0）泡酸重量差減少 15g 最多，抗酸性能力最低；B1、B3 和 B4（黑糖 0.08、0.05 和 0.1）泡酸重量差無太大差異；但 B5（黑糖 0.3）添加黑糖比例高於其它試體 3 倍時，重量差減少最少，表示抗酸性最高；值得注意 B2 無添加黑糖漿試體，重量差減少最高且為其它試體 3 倍之多（-15），抗酸能力也越低。發現黑糖漿添加比例越增加，試體的抗酸性也會增加。

（五） 韌性試驗

試體/承重	重量 g
B1	1150
B2	1493
B3	2847
B4	2832
B5	5658

在韌性試驗中（試體可承受變形而不發生斷裂的能力），B1（黑糖 0.008）承重 1150g；B2

(黑糖 0.0) 承重 1493g ; B3 (黑糖 0.05)、B4 (黑糖 0.1) 分別承重 2847g 和 2832g ; B5 (黑糖 0.3) 承重 5658g 有顯著的增加。B1 (黑糖 0.008) 及 B2 (黑糖 0) 承重重量接近 ; B3 (黑糖 0.05) 和 B4 (黑糖 0.1) 承重重量約為 B1 及 B2 的 2 倍 ; 又 B5 (黑糖 0.3) 為 B4 的 3 倍時，B5 承重重量有顯著的增加。表示黑糖漿的比例增加，承重重量越重，試體的韌性也會越高。

二、C 組試體試驗結果 (探討不同比例之糯米混合熟石灰製作出的灰漿試體在硬化時間、硬度、溫差、抗酸性和韌性之差異) :

(一) 試體硬化時間

灰漿試體/天數	第 3 天	第 5 天	第 7 天
C1	X	v	v
C2	X	v	v
C3	X	v	v
C4	X	v	v
C5	X	v	v

說明：v 有硬化、X 沒有硬化

在硬化時間上，C 組試體 (C1、C2、C3、C4 和 C5) 在第三天的時候皆沒有硬化 (摸起來仍然很軟)。到了第五天、第七天時就已經硬化 (手指壓不下去)。發現有、無糯米皆在第五天硬化，故此添加糯米與否並無差異，不會減少或增加硬化的速度。另外七天早期硬化速度上不同比例的糯米試體皆有不錯的效果。(一般認為硬化時間需要 7-10 天)。

(二) 莫氏硬度試驗

試體 / 礦石	1 滑石	2 石膏	3 方解石	4 螢石	5 磷石	6 長石	7 石英
C1	X	X	X	v	v	v	v
C2	X	X	v	v	v	v	v

C3	X	X	X	v	v	v	v
C4	X	X	X	v	v	v	v
C5	X	X	X	v	v	v	v

註：刻出刮痕 v；沒有刮痕 X

在硬度試驗中，C1（糯米 0.032）、C3（糯米 0.06）、C4（糯米 0.1）及 C5（糯米 0.2）之試體的硬度都在 3-4 之間；C2（糯米 0.0）的硬度則在 2-3 之間；顯示有添加糯米的試體在硬度上有增加，但增加的幅度並不大。而無添加糯米的試體在硬度上為最低。所以糯米比例增加，試體硬度也會有些微的增加。

（三）溫度差異試驗

試體/溫度	常溫	高溫(60 度)
C1		
C2		
C3		
C4		
C5		

在溫度差異試驗，C 組試體（不同比例之糯米試體）不論在常溫或高溫 60 度環境下並沒有太大的變化；沒有龜裂、結塊及斷裂的情形。故此有無糯米添加之試體皆能適應高溫環境。

(四) 抗酸性試驗

試體/重量	實驗前 g	實驗後 g	重量差 g
C1	96	91	-5
C2	146	165	+19
C3	168	X	X
C4	162	148	-14
C5	169	159	-10

註: 無法測量 X, 重量差為減少或增加的重量

在抗酸實驗中, C1 (糯米 0.032) 的泡酸重量差減少約為 5g; C2 (糯米 0.0) 的泡酸重量差增加 19g (3 天後測量為 148 增加 2g); C3 (糯米 0.06) 重量差無法測量 (分崩離析); C4 (糯米 0.1) 重量差減少 14g; 最後 C5 (糯米 0.2) 泡酸重量差減少 10g。結果顯示添加少量的糯米如 C1, 其重量差減少最低, 抗酸的效果也最佳。而糯米添加比例增加如 C4 (糯米 0.1) 和 C5 (糯米 0.2) 其重量差減少數值增加, 表示添加糯米不會提高抗酸性, 反而會增加灰漿被侵蝕的情形。值得注意的是 C2 (糯米 0.0) 的重量不減反而增加很多, 表示其飽水性高, 值得進一步去探究。C3 (糯米 0.06) 的 (分崩離析), 表示完全為酸性侵蝕, 也值得進一步去探究。另外從有添加糯米之試體其耐水性較高, 而無添加糯米試體耐水性較低。綜上而言, 添加糯米之試體並無抗酸的效果。

(五) 韌性試驗

試體/承重	重量 g
C1	1150
C2	1857
C3	1660
C4	1977
C5	1868

在韌性試驗中 (試體可承受變形而不發生斷裂的能力), C1 (糯米 0.032) 承重 1150g; C2 (糯米 0.0) 承重 1857g; C3 (糯米 0.06) 承重 1660g、C4 (糯米 0.1) 及 C5 (糯米 0.2) 分別承重 1977g 和 1868g。顯示 C1 承重重量最低; C2、C3、C4 和 C5 其承重的重量差距並不大。回朔

C1 承重重量最低，可能與 C1 的厚度較薄而產生誤差有關。從 C2、C3、C4 及 C5 試體承重重量相近，可發現糯米的添加比例對於承重的重量無太大的差異，故此對試體的韌性無直接減少和增加的影響。

玖、 結論

一、關於添加熟石灰或燒蚵灰之糯米灰漿試體之差異

從實驗結果，在凝固速度、硬度、抗酸性、韌性上 A1 皆優於 A2；在硬化時間上 A1 及 A2 相同。但 A2 在脫模時容易斷裂成小塊，因此在各方面的試驗上熟石灰皆優於燒蚵灰之效果。

省思：後來我們思考 A2 容易斷裂及效果不佳的原因，為何與文獻結果不同？我們找到的答案可能是燒蚵灰仍然為（生石灰）需要經過（養灰）3-6 個月的時間，才能作為熟石灰使用，李德河教授給出答案：『蚵殼粉的成份是 CaCO_3 （碳酸鈣），是已經無法有膠結作用的死石灰，其可以替代砂，但不能替代熟石灰或生石灰，因為熟石灰或生石灰是使灰漿產生膠結強度的主要成份』。可惜在時間上已不容許我們去（養灰）了。只好全用（熟石灰）來作實驗。

二、關於不同比例黑糖漿混合熟石灰製作出的灰漿試體之差異

1. 在硬化時間上，添加黑糖與否，不會減少或增加試體的硬化的速度。
2. 黑糖比例增加，試體硬度也會增加。
3. 常溫和高溫下黑糖漿添加與否，無太大差異。
4. 黑糖添加比例增加，試體的抗酸性也會增加。
5. 黑糖的比例增加，試體的韌性也會增加。

三、關於不同比例糯米混合熟石灰製作出的灰漿試體之差異

1. 在硬化時間上，添加糯米與否，無太大差異。
2. 糯米比例增加，試體硬度也會有些微的增加。

3. 有無糯米添加之試體皆能適應高溫環境。
4. 添加糯米之試體並無抗酸的效果，反而會增加灰漿被侵蝕的情形。
5. 在韌性上，糯米的添加與否，無太大差異。

省思：糯米富含「支鏈澱粉分子」黏結力強，是「黏合劑中的黏合劑」，研究發現添加糯米的灰漿其物理性更穩定，強度更大，相容性更強（大紀元報，2017）。但試驗結果添加糯米試體在硬度和韌性上不如預期般有效能，可能是我們只試驗試體的早期強度（7天）的緣故，糯米灰漿乾得比較慢，需要10多天才能逐漸凝固，而全部凝結，需要大概1年的時間，（徐銘亨，2008）。其次未能探討糯米的（黏結力）也有點可惜。

壹拾、 參考資料

1. 大紀元報（2017）。萬里長城千年不倒 科學家：全歸功於糯米，取自 <https://www.epochtimes.com/b5/17/8/26/n9567807.htm>
2. 王龍盛（2003）。清治時期台灣砌磚用糖灰漿之做法與基本性質研究。（未出版之碩士論文）。國立臺灣科技大學建築系。
3. 李德河（2008）。傳統灰漿可逆性補強工法之研究，內政部建築研究所。
4. 李德河、張舜孔、吳建宏（2011），傳統灰漿可逆性之初步研究，文化資產保存學刊，15期，63-76。
5. 徐銘亨（2008）。傳統石灰砂漿之配比與強度性質研究。（未出版之碩士論文）。國立交通大學土木工程學系。
6. 傅朝卿（2001）。台南市古蹟與歷史建築總覽，台灣建築與文化資產出版社。
7. 臺南研究資料庫，安平蚵灰窯文化館，取自 <https://trd.culture.tw/home/zh-tw/landscapes/291470>
8. 羅揚宗（2009）。傳統磚砌建築灰縫材料改良之研究。（未出版之碩士論文）。國立成功大學土木工程研究所。 <https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/38670/1/651301.pdf>