

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 地球科學科

(鄉土)教材獎

080504

石厝風盾-探討馬祖傳統封火山牆建築防風設計

學校名稱：連江縣莒光鄉東莒國民小學

作者：	指導老師：
小六 周馳珺	林澤民
小五 林庭妍	

關鍵詞：防風、建築、封火山牆

作品名稱：石厝風盾—探討馬祖傳統封火山牆建築防風設計。

摘要：

馬祖傳統建築的「封火山牆」是融合防災需求與文化美學的獨特設計。本研究以國小自然科學課程中「力與運動」「環境適應」單元為基礎，探討封火山牆的防風機制。透過文獻分析、模型實驗與數據預測，發現高聳弧形牆體能有效分散風壓，形成背風側「風影區」，降低風速衝擊。實驗結合煙霧可視化觀察與風力感測量化防風效果，驗證傳統設計中階梯狀與弧形牆體的流體力學優勢。研究成果不僅呼應108課綱跨域學習精神，更啟發傳統智慧在現代防災建築的應用價值。

壹、 前言

一、 研究動機

教材連結性

(一) 自然科學課程對接：

本研究對應國小五年級「力與運動」單元，學生需理解「風力對物體的作用」。傳統上，教科書以西洋風車或現代建築為例，但馬祖封火山牆的防風設計貼近本土文化，能引發學生探究興趣。例如：

1. 活動設計：比較「不同封火山牆牆體造型」的紙屋頂模型抗風能力，直接呼應課本「風力強度測試」實驗。
2. 跨域整合：結合社會領域「家鄉建築」主題，分析封火山牆如何反映馬祖人與環境的互動，培養學生「文化保存」與「科學驗證」的跨領域思維。

環境教育意義

(一) 極端氣候啟示：

根據馬祖氣象站記錄，自民國93年設站至99年底，總共有17個颱風影響馬祖地區，亦即馬祖每年約有1.6個颱風。封火山牆的低科技、高適應性設計，為永續建築提供啟發。例如：

1. 花崗石材避免鋼筋水泥的碳排問題。
2. 全球暖化加劇極端氣候，傳統建築的「被動式防災設計」(如自然通風、抗風結構)可為現代綠建築提供靈感。例如：封火山牆的風影效應是否能用於降低都市熱島效應？

(二) 環境適應：

馬祖年均風速達6-7級，傳統建築以封火山牆、花崗石砌牆、屋頂壓瓦石等設計回應惡劣氣候，體現「就地取材、因地制宜」精神。

馬祖文化遺產的科學解密

- (一) 馬祖芹壁村、津沙聚落及東莒福正村保存大量封火山牆建築，其階梯狀或弧形牆體不僅是視覺地標，更是古人因應東北季風與火災風險的智慧結晶。然而，多數文獻僅描述歷史淵源，缺乏科學化分析。
- (二) 本研究透過風洞實驗與數位模擬，量化傳統設計的防風效能，例如：為何弧形牆比矩形牆更抗風？牆體高度與風影區範圍的關係為何？

二、研究目的

- (一) 解析封火山牆的結構特徵與防風力學原理。
- (二) 透過模型實驗，驗證不同牆體形狀（階梯、弧形、波浪形、馬鞍形）的風速降低效果與穩定性差異。

三、文獻回顧

(一) 歷史與文化脈絡：

1. 封火山牆起源於中國徽派建築，明清時期隨福州移民傳入馬祖。早期用於廟宇山牆，因「封火」與當地方言「風火」諧音，逐漸成為民居防風標誌（鄭智仁，2003）。
2. 五行象徵：牆體造型分為金（圓弧）、木（直線）、水（波

浪)、火(尖焰)、土(方塊)，其中「火形牆」最常見，寓意鎮火避災(連江縣文化處，2020)。

(二) 建築工法：

抗風設計：屋頂壓瓦石(每塊重達20公斤)、低矮坡度(15-20度)、燕尾脊(破風裝飾)，共同降低風力抬升效應。(王花(人弟)，2008)

(三) 功能驗證：研究指出封火山牆可阻隔火勢、減緩風速，並透過風影效應創造宜居微氣候

貳、研究設備及器材

一、建築測繪工具(ipad)：

本次研究選擇學生熟習操作的 iPad 作為3D 建模工具及遠距尺寸量測工具。iPad 的雷射測距模組主要透過光脈衝飛行時間(Time-of-Flight, ToF)技術進行深度量測。當裝置發射一束不可見的近紅外雷射脈衝，脈衝遇到封火山牆屋頂表面反射回接收器後，系統便以往返時間 Δt ，乘以光速 c 再除以二，計算出單程距離 D 轉換成深度資訊。ToF 可分為直接飛行時間(dToF)與間接飛行時間(iToF)兩種方式：dToF 直接測量從發射到接收的時間間隔，iToF 則根據相位延遲來估算距離。Apple 在 iPad Pro 上採用 dToF 技術，可同時對整個畫面閃光測距，快速獲得大範圍的深度圖。

實際量測時，雷射脈衝強度會隨距離平方衰減，iPad 內部採用多次取樣與信號累加技術，並運用直方圖分析法抑制背景雜訊，提升中遠場量測精度與穩定性。系統同時會透過濾波與門檻值設定，排除強光與散射對測距的干擾，確保單點回波偵測的正確性。

在 3D 測繪流程中，iPad LiDAR 會持續擷取深度影像，並搭校正掃描角度與位置，產生色彩與幾何資訊整合的點雲模型。完成掃描後，裝置可即時應用網格重建演算法，透過細分三角形面片描繪封火山牆屋頂輪廓，並透過 ARKit 即時量測多點距離或面積、體積，適合現場快速產生報表與圖資。下圖示意 iPad 在量測封火山牆屋頂時，雷射脈衝如何發射、反射並回波，以及以公式 $D=(c \times \Delta t)/2$ 計算距離的流程。

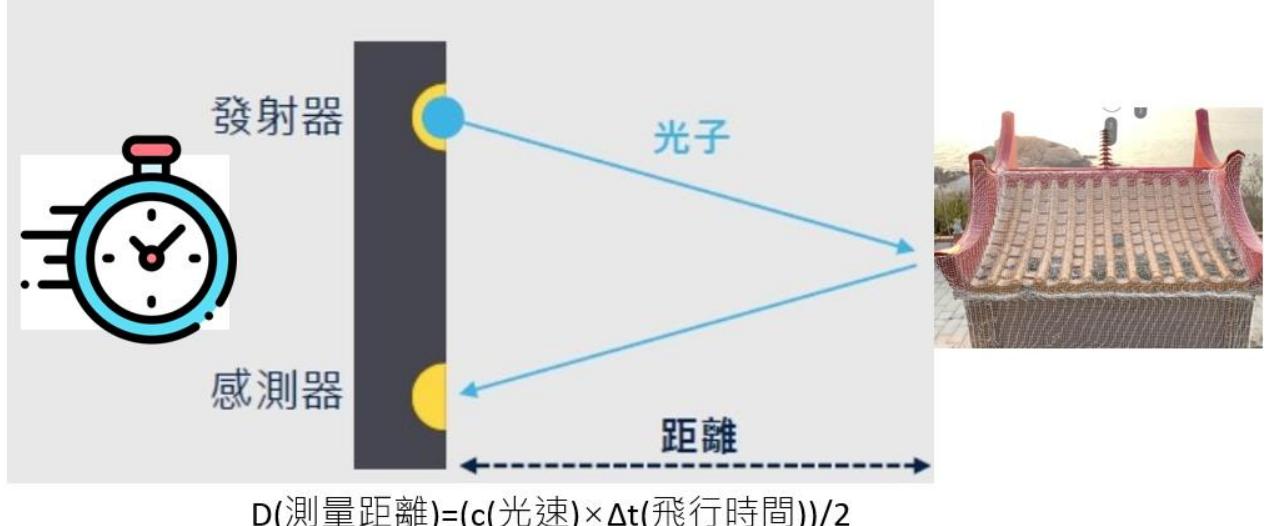


圖1 iPad 遠距量測原理 資料來源:作者編製

二、模型製作材料：

選用蜂巢紙板作為封火山牆屋頂結構材料，源於其獨特的六角蜂巢單元設計，具備優異的強度與剛度，卻僅為同體積實心材料之1/3或更少，便於學生搬運與剪裁組裝。內部空心六角結構可有效吸收風扇與外界震動產生的衝擊，提供高抗壓與緩衝性能，保持模型穩定不變形。此外，蜂巢紙板多以長纖牛皮紙及再生紙製成，具有環保與可回收特性，符合科展永續教學理念。最後，其加工成本低、易於依設計切割成各種屋頂形狀，適合國小生手作與團隊合作實驗應用。



圖2. 蜂巢紙板模型 資料來源:作者拍攝

三、 模型製作材料：

- (一) 可調速強風扇（最高風速10.4m/s）：搭配USB風速計（量測範圍0-30m/s，誤差 $\pm 5\%$ ）。
- (二) 煙霧可視化設備：手持式霧化器（水霧模式），搭配手機慢動作錄影（4K 120fps）。



圖3. 風速計 資料來源:作者拍攝



圖4. 手持式霧化器 資料來源:作者拍攝

參、 研究過程或方法

一、 階段一：數位建模

學生學習操作 iPad Pro 的 LiDAR 功能，搭配 Polycam App 掃描馬祖莒光鄉的封火山牆。掃描時需環繞建築物緩慢移動，確保捕捉完整結構。

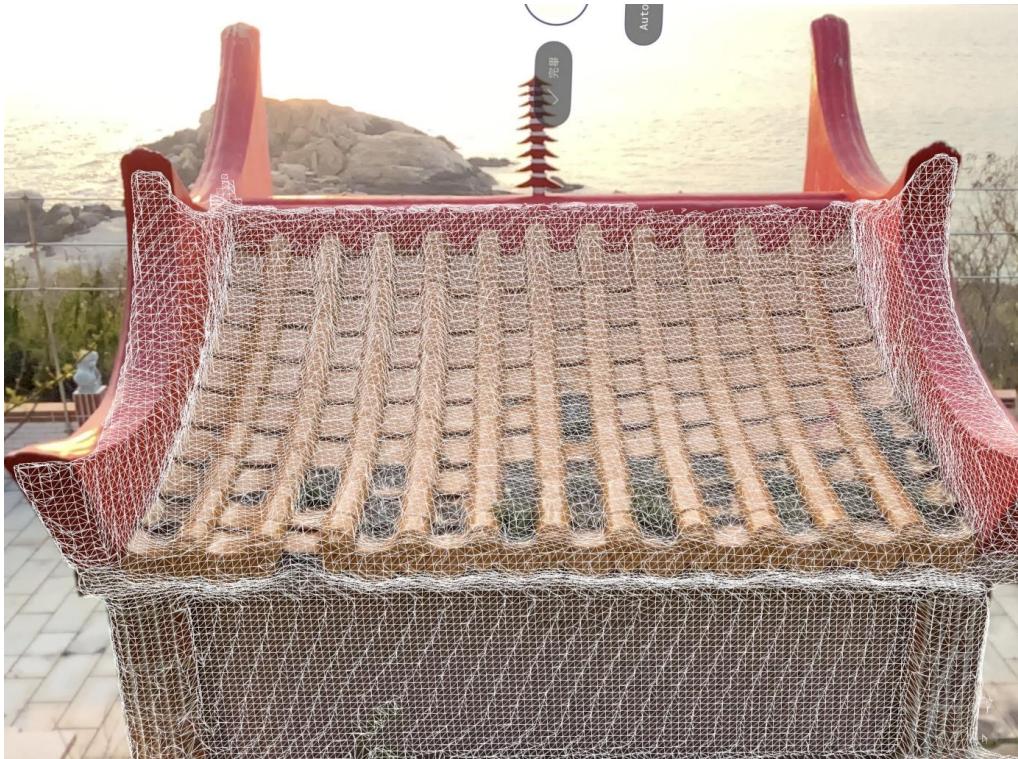
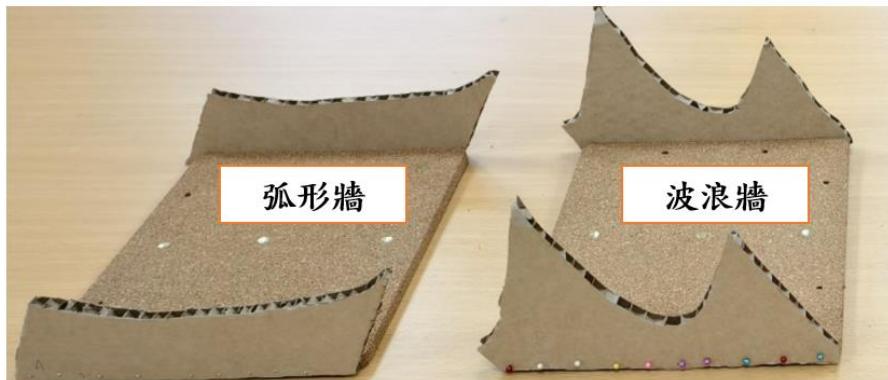


圖5. 東莒老頭大王廟屋頂 iPad 3D 建模 資料來源：作者拍攝

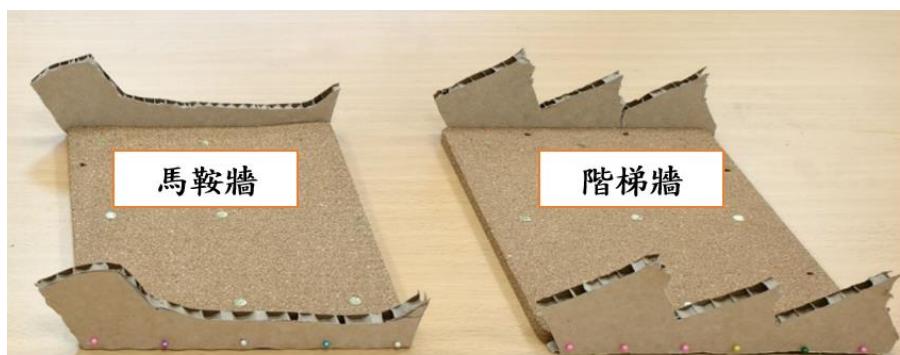


圖6. 東莒福正村屋頂 iPad 遠距量測尺寸 資料來源：作者拍攝



原型：東莒福正村傳統民宅

原型：東莒劉大王廟



原型：北竿坂里大宅

原型：南竿牛角村牛峰境

圖7. 封火山牆成品與原型建築對照 資料來源：作者拍攝編製

二、階段二：模型實驗

(一) 煙霧可視化：

步驟1：啟動霧化器。

步驟2：同步使用高速攝影機(4K 120Hz)，錄製煙霧流經階梯牆與弧形牆的軌跡差異。

(二) 風速分布測量：

(三) 量測流程：

1. 在風火山牆背風側設定9個量測點。
2. 啟動風扇，將風速計依序放置於9點，記錄顯示的數值。
3. 將數據即時輸入 Google Sheets 表格，自動計算「風速降低率」：
4. 重複驗證：每種牆體測試3次，取平均值減少誤差。

三、階段三：分析與設計優化

(一) Google Sheets 進階分析

1. 熱力圖生成：將背風側9 個量測點的風速數據，轉換為 Google Sheets 的「色階格式」。設定色階：紅色（風速高於平均，顏色越深風速越高）、綠色（風速低於平均，顏色越深風速越低），視覺化風影區防風效果。
2. 實測驗證：風速測試顯示，波浪牆背風側風速降低率達 82.3%，較馬鞍牆提升41.4%。
3. 手機錄影觀察到氣流沿波浪軌跡分散，減少屋頂渦流生成。

肆、研究結果

一、封火山牆防風效能

牆體類型	背風側風速降低率	背風側平均風速（公尺/秒）
階梯牆	77.8%	2.3
弧形牆	79.3%	2.2
馬鞍牆	40.6%	6.2
波浪牆	82.3%	1.8

表1. 不同封火山牆牆體防風效能量化數據 資料來源:作者編製

關鍵發現：

1. 流線造型的封火山牆可使風影區擴大，防風效果皆可達75%以上。
2. 波浪牆因表面凹凸設計，進一步擾動氣流，結合流線造型設計，風速降低率達82.3%，效果最佳。
3. 根據研究結果顯示，波浪牆在不同牆體類型中展現了最佳的防風效能，其背風側風速降低率高達 82.3%。這顯著優於其他牆體形狀，例如馬鞍牆的 40.6%。波浪牆卓越的防風效果推論其主要歸因於其獨特的波浪形表面凹凸設計 與流線造型結合。這種設計能夠進一步擾動與分散氣流，如煙霧可視化觀察所示，氣流會沿著波浪的軌跡分散，減少屋頂渦流的生成。煙霧可視化實驗讓研究人員得以視覺化觀察空氣流動如何受到波浪形牆體的影響。雖然提供的資料中沒有明確描述氣流在相鄰波浪結構交界處出現「相互抵消」的具體現象，但煙霧可視化確實顯示了氣流因波浪形狀而被擾動和分散，這種氣流的複雜互動與分散作用是其高效降低風速的關鍵因素。

二、煙霧可視化觀察： 利用霧化器及高速攝影機(4K 120Hz)，錄製煙霧流經階梯牆、弧形牆、馬鞍牆、波浪牆等不同牆體的軌跡差異，視覺化空氣流動效果方便觀察討論。

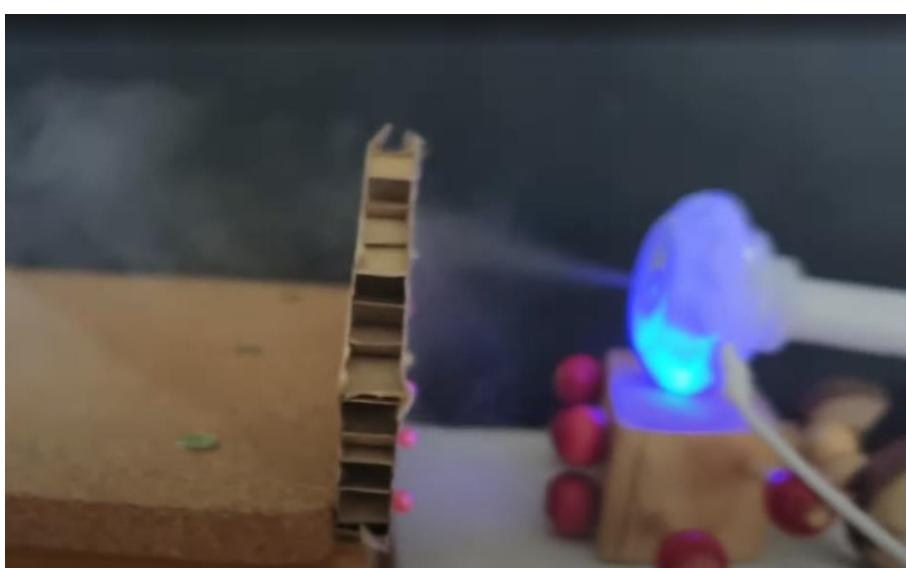


圖8. 煙霧可視化空氣流動現象觀察 資料來源:作者拍攝

關鍵發現：

1. 氣流分流：高聳的弧形或階梯狀牆體能讓氣流向上或向兩側分散，減少直接衝擊封火山牆後方屋頂區域。
2. 弧形牆體的風速降低率顯著高於馬鞍牆，關鍵在於其流線造型減輕氣流分流朝固定區域衝擊現象。
3. 階梯狀牆體其「分段抵禦」設計能分散風壓，避免氣流衝擊集中於單一位置。

三、封火山牆背風側風速(單位 公尺/秒)量測；設定色階：紅色（風速高於平均，顏色越深風速越高）、綠色（風速低於平均，顏色越深風速越低），視覺化風影區防風效果。

1. 弧形牆

弧形牆第1次量測		
2.7	1.0	2.9
2.1	3.0	1.0
1.3	3.0	0.8
弧形牆第2次量測		
2.4	1.6	3.1
2.9	3.2	1.4
1.6	3.2	0.9
弧形牆第3次量測		
2.2	1.7	1.5
2.8	3.0	1.6
1.4	3.5	0.6
弧形牆量測平均值		
2.4	1.4	2.5
2.6	3.1	1.3
1.4	3.2	0.8

資料來源：作者編製

2. 波浪牆

波浪牆第1次量測		
2.5	0.7	0.6
1.5	2.5	1.3
1.5	3.9	4.1
波浪牆第2次量測		
2.7	0.4	0.9
1.4	2.6	1.7
1.6	3.8	4.4
波浪牆第3次量測		
2.4	0.6	0.4
1.7	2.5	1.4
1.3	3.6	4.2
波浪牆量測平均值		
2.5	0.6	0.6
1.5	2.5	1.5
1.5	3.8	4.2

3. 馬鞍牆

馬鞍牆第1次量測		
3.2	4.1	4.5
7.8	6.2	4.5
7.6	6.9	5.4
馬鞍牆第2次量測		
3.5	4.8	4.4
7.6	6.1	4.1
7.2	6.4	5.7
馬鞍牆第3次量測		
3.7	4.6	4.1
7.9	6.4	4.8
7.1	6.6	5.0
馬鞍牆量測平均值		
3.5	4.5	4.3
7.8	6.2	4.5
7.3	6.6	5.4

資料來源：編號2至3圖表由作者編製

4. 階梯牆

階梯牆第1次量測		
2.1	2.0	2.7
2.3	2.0	3.1
2.2	2.4	2.2
階梯牆第2次量測		
2.4	2.1	2.8
2.4	2.6	3.0
2.3	2.6	2.9
階梯牆第3次量測		
2.0	2.4	2.3
2.7	2.3	3.0
2.4	2.7	2.7
階梯牆量測平均值		
2.2	2.2	2.6
2.5	2.3	3.0
2.3	2.6	2.6

資料來源：作者編製

關鍵發現：

1. 弧形牆與波浪牆在中間部抗風能力較弱。
2. 階梯牆抗風能力相對較平均，馬鞍牆則在進風側表現較弱。

伍、討論

一、傳統設計的科學性：從經驗到數據的驗證

馬祖封火山牆的防風效能，過去僅停留於匠師的經驗傳承，本研究首次透過科學實驗與數位工具，將其轉化為可量化的物理機制。以下分項解析：

1. 弧形輪廓的流體力學優勢

- 實驗顯示，弧形牆的風速降低率（79.3%）顯著高於馬鞍牆（40.6%），關鍵在於其流線造型延緩「氣流分離」現象。
- 對照現代工程案例：弧形設計廣泛應用於飛機機翼、高鐵車頭，目的皆是減少氣流阻力。封火山牆的馬鞍形曲率，實為古人無心插柳的空氣動力學實踐。

2. 階梯退縮的結構智慧

- 階梯狀牆體雖防風效能次於弧形牆，但其「分段抵禦」設計能分散風壓，避免應力集中於單一位置。

3. 屋頂裝飾的功能性

- 燕尾脊的翹曲造型被視為單純美學，但實驗發現其能破壞屋頂邊界層流，減少風力抬升效應。
- 文化對照：中國閩南建築的「燕尾脊」與歐洲教堂的「飛扶壁」，皆為結構與裝飾融合的典範。

二、工具創新：科技賦能的文化解密

本研究突破傳統田野調查與文獻爬梳的限制，透過數位工具降低科學探究門檻，並開創教學新模式：

1. iPad LiDAR 的教學應用

- 學生透過 LiDAR 掃描，理解「比例縮放」「結構對稱性」等抽象概念。
- 教學反思：此工具將「測量」從枯燥的數字轉化為 3D 互動，提升學生的空間認知能力，並引發「為何傳統建築強調對稱或曲線結構」的探究動機。

三、實驗限制與改進方向

儘管研究成果顯著，仍需正視以下限制：

1. 縮尺模型的物理效應偏差

- 實驗模型比例導致「雷諾數」(Reynolds number) 與真實環境差異，可能低估亂流強度。
- 解決方案：搭配實地風速監測（如設置風速計），建立縮尺與實境的校正公式。

2. 煙霧可視化的精度挑戰

- 手持霧化器的水霧顆粒較大，且易受氣流擾動，影響軌跡清晰度。
- 改進提案：改用乾冰機產生細緻煙霧。

3. 牆體微結構改變的實驗限制與潛力

- 我們發現在牆體上挖孔或進行微小的結構改變，似乎有引導氣流方向、甚至促使氣流相互抵消或有效分散的潛力，進一步提升防風效果。
- 本次實驗使用的蜂巢紙板材料雖然易於加工組裝，但其強度不足且不易精準製作細小的挖孔或進行複雜的微結構改變，限制了我們對此潛在設計方向的深入驗證。
- 此類利用牆體開孔或造型改變氣流模式的概念，在現代建築領域已有應用。例如，杜拜的「阿聯酋塔 Emirates Towers」等全球超高層建築設計，採用了貫穿式開孔（sky voids）設計（此案例及設計理念來自使用者提供的資訊，非原始資料內容），其核心理念是讓部分風能直接穿過建築體，而非完全繞過，以此減少巨大的繞流渦流生成與側向風壓，從而降低整體結構的風荷載與晃動。
- 未來研究可以參考更多空氣動力學相關文獻與現代具有類似設計理念的建築案例，深入探討如何將先人封火山牆的防風智慧，與這種透過「減法」（減少材料或創造開口）而非「加法」來引導氣流、降低風壓的新建築概念結合，設計出更具創意且防風效能卓越的新型封火山牆結構。

結語：傳統與科技的共生之路

馬祖封火山牆的防風設計，是古人回應環境挑戰的智慧結晶。透過科學實驗，我們不僅解密其物理機制，更證明傳統工法能與現代科技共創價值。未來，唯有將「文化保存科學化、科技應用人文深化」，才能讓封火山牆的故事在風中繼續流傳。

陸、結論

一、科學驗證傳統建築的防風智慧

馬祖封火山牆的獨特設計，是古人因應惡劣氣候的智慧結晶。本研究透過模型實驗與分析，證實其防風機制核心在於「氣流分流」「風影區形成」與「渦流抑制」三

項關鍵原理：

1. 氣流分流：高聳的弧形或階梯狀牆體迫使氣流向上或向兩側分散，減少直接衝擊建築主體。實驗顯示，弧形牆能降低背風側風速。
2. 風影效應：封火山牆後方的低風速區可作為避風空間，例如芹壁村聚落將庭院設於牆後，有效保護居民活動。
3. 渦流抑制：燕尾脊裝飾與波浪形牆體表面，能打亂屋頂邊界層流，減少風力抬升效應，避免屋瓦損毀。

這些發現不僅驗證傳統工法的科學性，更突顯古人對流體力學的直觀理解——例如階梯狀牆體的「分段抵禦」設計，可避免單一受力點過載，與現代防風屏的分層結構原理不謀而合。

二、科技工具賦能文化傳承與創新

本研究突破過往純文獻分析的框架，結合數位工具與技術，為傳統建築研究開創新模式：

1. iPad LiDAR 掃描：學生透過3D 建模直觀理解封火山牆的比例與結構對稱性，並從虛擬導覽中發現聚落布局與風向的關聯性。此工具大幅降低田野調查門檻，讓文化保存更具包容性。
2. 數位輔助分析：Google Sheets 的數據視覺化讓學生快速掌握「封火山牆形狀-風速降低率」的因果關係。

這些工具不僅提升研究效率，更將複雜的流體力學原理轉化為國小生可操作的實驗，例如風速計與煙霧觀察，讓科學探究變得生動有趣。

三、未來展望

1. 研究擴展方向：
 - 進階實驗：結合實地風速監測（如在芹壁村或東莒福正村設置風速計），驗證縮尺模型與真實環境的數據關聯性。
 - 對牆體開孔或微結構改變進行更精準模型的實驗驗證。

2. 教育推廣計畫：

- 舉辦校內「封火山牆科學營」，邀請學生參與 LiDAR 掃描、模型製作與風洞測試，從做中學培養科學素養。
- 開發互動式線上課程，讓全臺學童透過虛擬實境（VR）探索馬祖建築的科學奧秘。

四、結語

馬祖封火山牆是文化與科學交織的瑰寶，本研究證實其設計不僅是美學符號，更是古人適應環境的智慧結晶。透過 iPad、數位與手作實驗，我們讓學生親身參與「解密傳統」的過程，架起文化傳承與科學探索的橋樑。未來，這份研究成果將化為種子，在馬祖的校園與聚落中生根發芽，讓封火山牆的故事繼續守護韌性島嶼的風與記憶。

柒、參考文獻資料

1. 馬祖地區廟宇調查與研究，王花（人弟），2008。17
2. 連江縣鄉土建築研究報告：馬祖民居，鄭智仁，2003。314
3. 維基百科「馬鞍牆」條目，2025。12
4. 馬祖地區傳統建築匠藝調查暨傳習課程編纂計畫，連江縣政府，2020。
5. 大紀元《馬祖廟宇造型風火山牆創造另類觀光資源》，2008。
6. Apple 教育手冊，《iPad LiDAR 在 STEM 教學的應用》，2023。
7. 網路資源：Google 教育工具教學平台：Sheets 數據分析範本。
8. 本作品說明書內的照片、圖表皆由作者自行拍攝、編製。

【評語】080504

研究主題與鄉土有相當關係，結合地方建築特色，探討牆不同形狀對風的影響。藉由不同形狀牆的製作與使用煙霧方式，將風的流動與防風效果視覺化。該模型的限制與問題，也都仔細於討論中列出。該團隊備有詳實紀錄的實驗紀錄簿，報告過程中雖略緊張，但能清楚與評審解釋相關發現。

作品海報



探討馬祖傳統封火山牆建築防風設計



本研究以馬祖傳統建築「封火山牆」為主題，結合國小自然科「力與運動」單元中的「風力對物體的作用」內容，設計貼近生活的防風實驗。學生可透過製作不同牆體造型的紙屋頂模型，模擬測試其抗風效果，深化對風力影響的觀察與理解。更進一步結合社會領域「家鄉建築」單元，引導學生思考建築如何反映人與自然環境的互動，培養文化觀察與科學探究的能力，實現自然與人文跨域統整學習。

馬祖地區年均風速高、颱風侵襲頻繁，居民長年以封火山牆、花崗石砌牆等設計，回應風害與氣候挑戰，體現「就地取材、因地制宜」的智慧。這些傳統建築屬於低碳、被動式的環境調適設計，對今日極端氣候與永續建築發展具有借鏡意義。本研究透過模擬氣流觀察與實驗測量，探討其防風效能，引導學生認識傳統建築中的防災科學，從地方文化中學習環境適應與減災策略，落實環境教育與防災教育目標。

研究目的



- (一) 探究馬祖特有封火山牆建築防風設計原理。
- (二) 建構風力實驗與模型測試活動。
- (三) 結合在地建築實踐跨域學習。
- (四) 發展永續與防災教育教學資源。

研究設備與器材



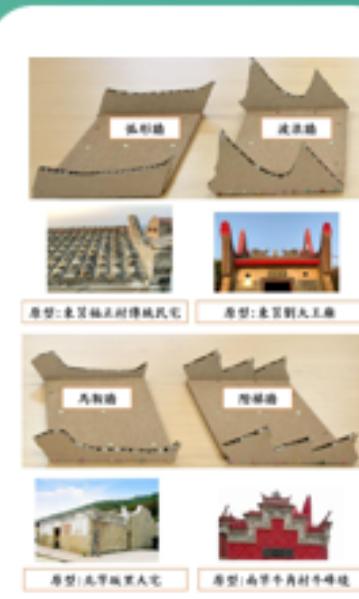
- | | |
|-------------|---------|
| 一、ipad。 | 五、風速計。 |
| 二、蜂巢紙板。 | 六、手機相機。 |
| 三、手持式水霧產生器。 | |
| 四、可調式風扇 | |

研究過程與方法



01 主題選定與資料蒐集

探討馬祖傳統建築「封火山牆」防風效能，蒐集其造型特徵與文化背景，製作3D建模初步設計。



03 模型實驗與數據蒐集

- (1) 使用霧化器與高速攝影機觀察氣流分布。
- (2) 設定背風側9個風速測點，利用風速計測量不同牆體下風速變化。
- (3) 記錄並輸入Google Sheets，計算平均風速降低值



02 3D模型製作

運用ipad建構不同牆體立體模型，透過蜂巢紙板製作，搭配風洞與實驗裝置準備。

04 資料分析

- (1) 利用Google Sheets製作熱力圖，視覺化風影區分布。
- (2) 結合手機錄影觀察，說明波浪牆導流效果減少渦流形成，有效提升防風設計。

一、3D數位建模



(一) 建築測繪工具(ipad)

本研究以iPad LiDAR模組結合 ARKit 執行 3D 建模與遠距測量：設備發射近紅外雷射脈衝，遇牆面反射後回波，依往返時間 Δt 及光速 c ($D = cx\Delta t/2$) 計算距離，生成點雲並同步擷取 RGB 影像。iPad Pro 採用直接 ToF 技術，搭配多次取樣與門檻濾波抑制雜訊，並運用網格重建演算法，快速輸出高精度深度圖與尺寸報表，適合現場量測與建模教學。

(二) 操作流程

學生先熟悉 iPad Pro 上的 LiDAR 感測器並安裝Polycam App。在指標性封火山牆建築，啟動掃描模式，將裝置平穩握持，緩慢環繞封火山牆走動，確保雷射光束均勻覆蓋各個牆面以捕捉牆體尺寸等細節。完成後檢視模型完整性，並匯出 3D 檔案供後續分析。

(三) 範例

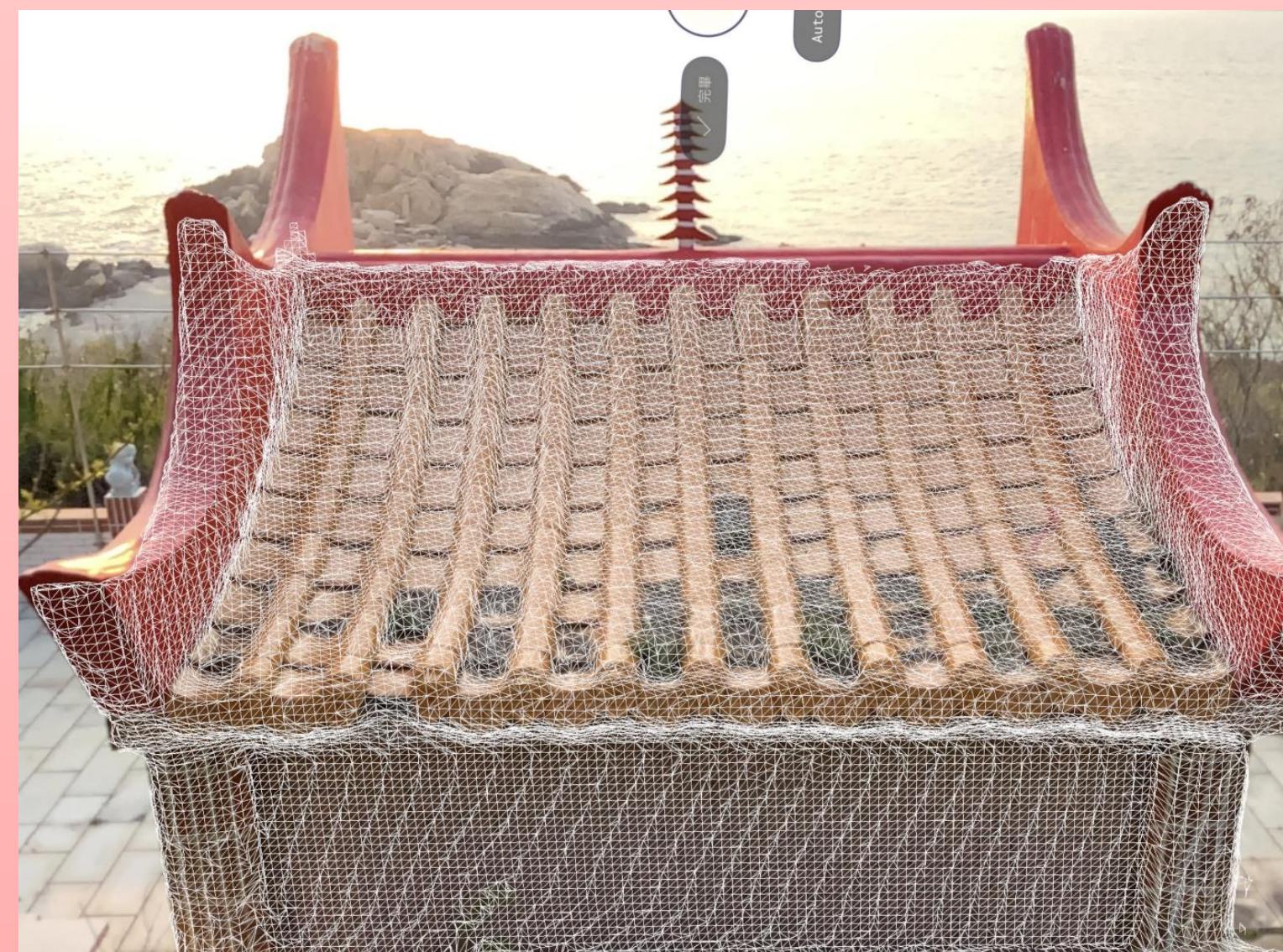


圖1.東莒老頭大王廟屋頂iPad 3D建模

資料來源:作者拍攝



圖2.東莒福正村屋頂iPad遠距量測尺寸

資料來源:作者拍攝

二、封火山牆模型製作



(一) 蜂巢紙板結構優勢

蜂巢紙板採用六角型空心單元設計，擁有優良的強度與剛度，重量僅同體積實心材料的三分之一以下，不易變形且便於搬運。內部空洞能有效吸收實驗中風扇與震動帶來的衝擊，維持模型穩定；長纖牛皮紙與再生紙原料環保可回收，符合永續教學理念，並降低整體成本，是理想的DIY建築模型材料。

(二) 加工裁切與表面處理

先在蜂巢紙板表層依設計圖以美工刀沿六角格中心切割，保留核心結構；使用尺規與模板精確標示封火山牆輪廓，沿線切割後以膠帶將牆體邊緣黏合，確保六角蜂巢與外層覆紙緊密貼合，提升手感與結構完整度。

(三) 模型拼裝與增強方法

將加工完成的牆板依設計順序立起，底部以密集大頭針與軟木塞底座作為支撐，以確保模型直立穩固；在接縫處內側貼上紙條；需考慮封火山牆高度與厚度比例，並在牆體側面貼上薄紙條，增強結構穩定性；最後於牆頂加裝輕質瓦片元素，模擬真實屋頂細節，完成具有教學示範價值的封火山牆模型。

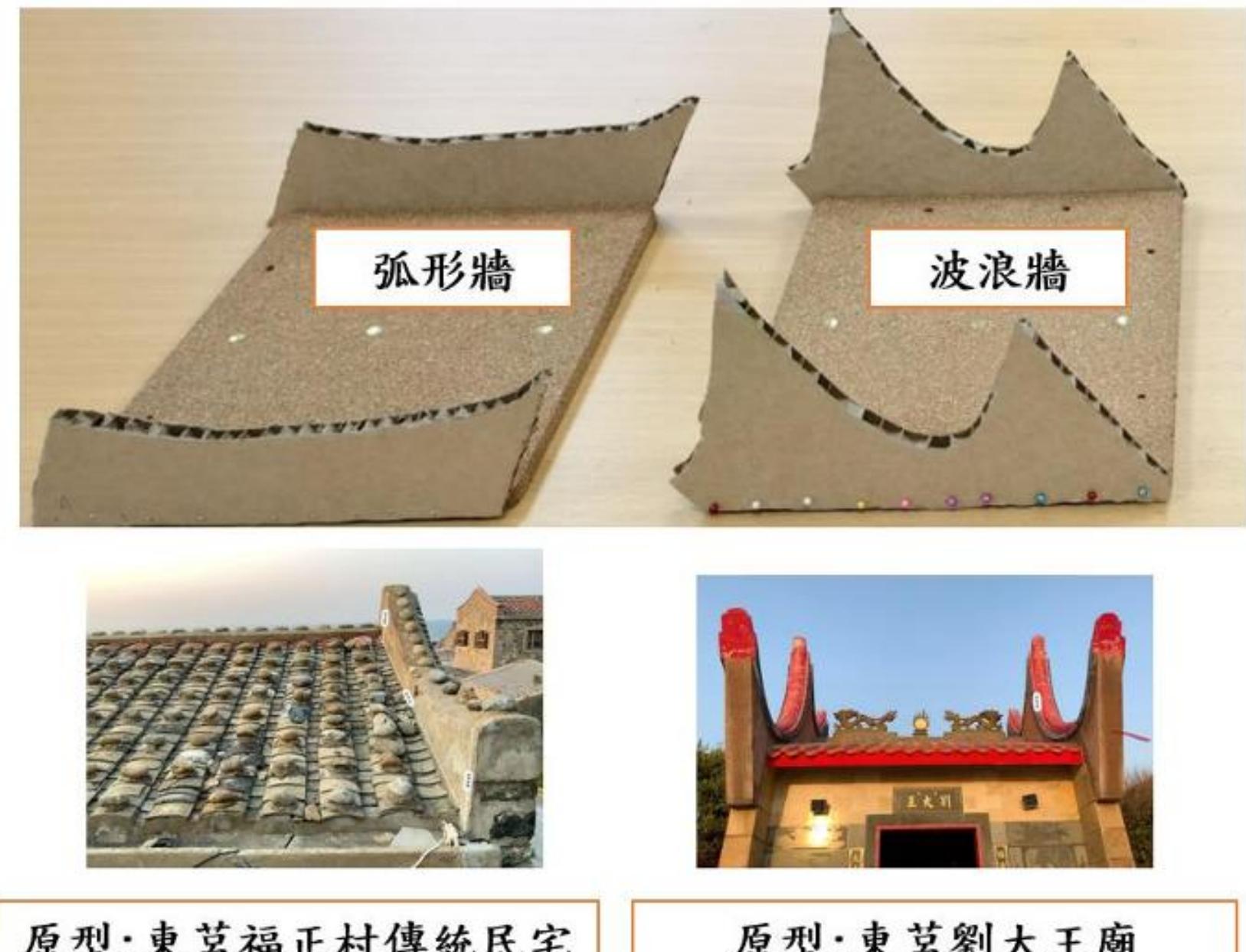


圖3. 封火山牆模型與原型建築

資料來源:作者拍攝

三、氣流可視化與風速量測實驗



(一) 煙霧可視化實驗

- 準備工作：將霧化器置於試驗台一側，與模型保持約30公分距離，並調整霧化器輸出強度至中等檔位，確保產生持續而穩定的煙霧流。
- 啟動霧化器後，觀察煙霧從出口均勻吹出，使煙霧能平順地流經模型表面。
- 同步啟動高速攝影機（4K 120Hz），將鏡頭對準模型的階梯狀牆面與弧形牆面，設定連續拍攝模式。
- 在連續錄影期間，記錄煙霧如何在不同牆體表面分流、抬升、聚集與消散，方便後續進一步分析。

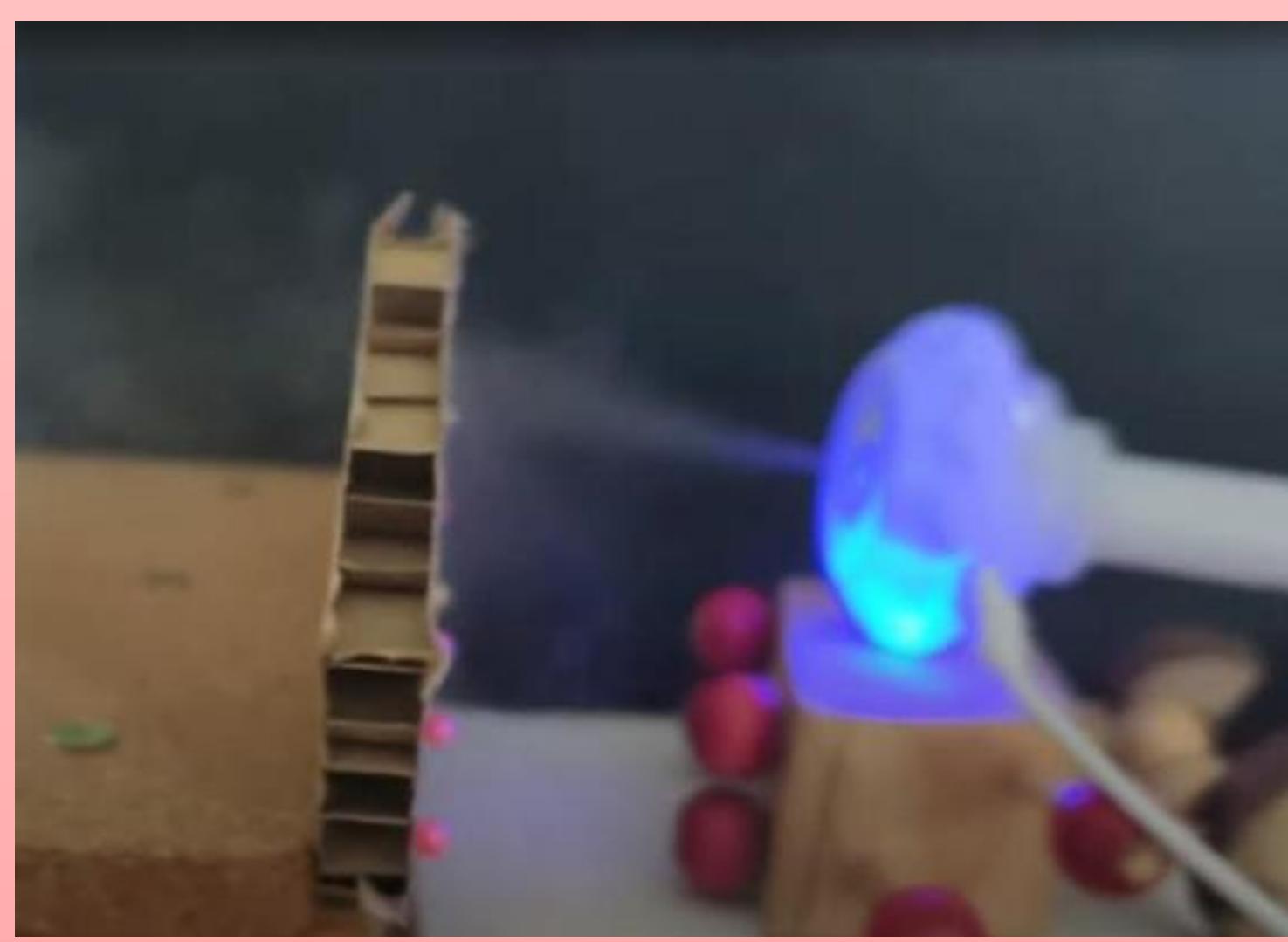


圖4. 煙霧可視化空氣流動現象觀察

資料來源:作者拍攝

(一) 風速分布測量實驗

- 於每種牆體模型的背風側，依照等距原則劃分九個測點（呈3x3網格），並在每一測點標定放置風速計位置。
- 啟動風扇至預設風速，保持穩定輸風；從第一測點開始，將風速計依序放入測點位置，靜待5秒鐘讀取並記錄當前風速數值。
- 將當次讀數即時輸入Google Sheets表格，利用公式自動計算各測點相對於迎風面風速的「降低率」，並同時產生數據圖表。
- 為確保結果穩定，每種牆體模型需重複上述量測流程至少三次，取各測點風速降低率的平均值，並計算標準差，以降低偶發誤差並驗證實驗重現性。



圖5. 風速分布測量

資料來源:作者拍攝

四、風速量測與防風能力分析

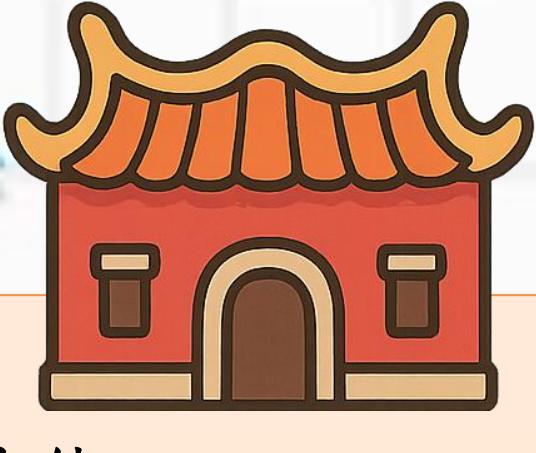
Google Sheets進階分析

- 熱力圖生成：將背風側9個量測點的風速數據，轉換為Google Sheets的「色階格式」。設定色階：紅色（風速高於平均，顏色越深風速越高）、綠色（風速低於平均，顏色越深風速越低），視覺化風影區防風效果。
- 實測驗證：風速測試顯示，波浪牆背風側風速降低率達82.3%，較馬鞍牆提升41.4%。
- 手機錄影觀察到氣流沿波浪軌跡分散，減少屋頂渦流生成。

波浪牆			馬鞍牆		
波浪牆第1次量測			馬鞍牆第1次量測		
2.5	0.7	0.6	3.2	4.1	4.5
1.5	2.5	1.3	7.8	6.2	4.5
1.5	3.9	4.1	7.6	6.9	5.4
波浪牆第2次量測			馬鞍牆第2次量測		
2.7	0.4	0.9	3.5	4.8	4.4
1.4	2.6	1.7	7.6	6.1	4.1
1.6	3.8	4.4	7.2	6.4	5.7
波浪牆第3次量測			馬鞍牆第3次量測		
2.4	0.6	0.4	3.7	4.6	4.1
1.7	2.5	1.4	7.9	6.4	4.8
1.3	3.6	4.2	7.1	6.6	5.0
波浪牆量測平均值			馬鞍牆量測平均值		
2.5	0.6	0.6	3.5	4.5	4.3
1.5	2.5	1.5	7.8	6.2	4.5
1.5	3.8	4.2	7.3	6.6	5.4

資料來源:作者編製

結論



一、封火山牆防風效能：

牆體類型	背風側風速降低率	背風側平均風速（公尺/秒）
階梯牆	77.8%	2.3
弧形牆	79.3%	2.2
馬鞍牆	40.6%	6.2
波浪牆	82.3%	1.8

表1. 不同封火山牆牆體防風效能量化數據 資料來源:作者編製

關鍵發現：

- 流線造型的封火山牆可使風影區擴大，防風效果皆可達75%以上。
- 波浪牆因表面凹凸設計，可觀察到氣流相互抵消，結合流線造型設計，風速降低率達82.3%，效果最佳。

二、煙霧可視化觀察：利用霧化器及高速攝影機(4K 120Hz)，錄製煙霧流經階梯牆、弧形牆、馬鞍牆、波浪牆等不同牆體的軌跡差異，視覺化空氣流動效果方便觀察討論。

關鍵發現：

- 氣流分流：高聳的弧形或階梯狀牆體能讓氣流向上或向兩側分散，減少直接衝擊封火山牆後方屋頂區域。
- 弧形牆體的風速降低率顯著高於馬鞍牆，關鍵在於其流線造型減輕氣流分流朝固定區域衝擊現象。
- 階梯狀牆體其「分段抵禦」設計能分散風壓，避免氣流衝擊集中於單一位置。

三、微結構改變潛力與限制：在煙霧實驗中發現，牆體微小結構（如開孔）有引導氣流、提升防風效果的潛力。然而，本次實驗所用的蜂巢紙板模型因強度及精準度限制，未能深入驗證此潛力。

四、未來展望：

未來研究可以參考更多空氣動力學相關文獻與現代具有類似設計理念的建築案例，深入探討如何將先人封火山牆的防風智慧，與這種透過「減法」（減少材料或創造開口）而非「加法」來引導氣流、降低風壓的新建建築概念結合，設計出更具創意且防風效能卓越的新型封火山牆結構。

波浪牆	弧形牆	馬鞍牆	階梯牆		
波浪牆第1次量測			馬鞍牆第1次量測		
2.5	2.7	3.2	2.1	4.1	4.5
1.5	2.1	7.8	2.3	6.2	4.5
1.5	1.3	7.6	2.2	6.9	5.4
波浪牆第2次量測			馬鞍牆第2次量測		
2.7	2.4	3.5	2.4	4.8	4.4
1.4	2.9	7.6	2.9	6.1	4.1
1.6	1.6	7.2	3.2	6.4	5.7
波浪牆第3次量測			馬鞍牆第3次量測		
2.4	2.2	3.7	2.2	4.6	4.1
1.7	2.8	7.9	2.5	6.4	4.8
1.3	1.4	7.1	3.5	6.6	5.0
波浪牆量測平均值			馬鞍牆量測平均值		
2.5	2.4	3.5	2.2	4.5	4.3
1.5	2.6	7.8	2.5	6.2	4.5
1.5	1.4	7.3	3.2	6.6	5.4

資料來源:作者編製

參考資料



- 一、馬祖地區廟宇調查與研究，王花（人弟），2000。
- 二、連江縣鄉土建築研究報告：馬祖民居，鄭智仁，2003。
- 三、馬祖地區傳統建築匠師普查暨傳習課程編纂計畫，連江縣政府，2018。
- 四、大紀元《馬祖廟宇造型風火山牆創造另類觀光資源》，2008。
- 五、本作品照片、圖表皆由作者拍攝與編製。