

【研究報告】

超音波檢測技術應用於傳統建築火成岩火害 檢測之評估探討

Applying the Ultrasonic Wave Velocity to Evaluate the Fire Damage of
Igneous Rocks Used in Traditional Buildings

陳亭妤 Chen, Ting-yuⁱ

李德河 Lee, Der-herⁱⁱ

林宏明 Lin, Hung-mingⁱⁱⁱ

張舜孔 Chang, Shun-kung^{iv}

■ 摘要

臺灣早期的建築，多使用木材、磚、石、土作為建造的原料，在寺廟中更以木材及石材作為支撐建築的主要構件，由於火災發生時木材及石材所受火害毀損的狀況有所差異，木材容易辨識其毀害程度，而石材因為耐火而不易察知其內部損傷情形，因此火災後如何判定石材之損壞程度成為古蹟修復工作之重要課題。本文將探討古蹟寺廟中常見之三種火成岩（花崗岩、觀音石、青斗石）石材，受到加溫至 200℃、400℃、600℃、800℃、1000℃、1200℃ 後冷卻至常溫時，其吸水率、比重以及超音波波速的變化，再對以上試體進行單壓強度試驗，分析溫度與強度的變化狀況，建立使用石材的超音波波速評估石材強度之關係，並作為石材受火害損壞程度評估。接著使用傳統寺廟常用的較大尺寸花崗岩、隴石及青斗石進行實際火害試驗，並探討其超音波速及強度的變化，比較石材在室內高溫試驗與實際火場試驗結果的差異性。結果顯示，實際火場試驗中的花崗岩及隴石雖外層因受熱不均導致大片剝落，但內部石材由超音波檢測以及抗壓強度試驗的結果證實為完好的石材。青斗石因尺寸稍小，受熱不均的影響顯著，造成青斗石分裂成數小塊無法以室內試驗的結果相比較。

關鍵字：超音波檢測、火成岩、抗壓強度、火害

ⁱ 國立臺南藝術大學博物館學與古物維護研究所助理

ⁱⁱ 國立成功大學土木系教授（derher@mail.ncku.edu.tw）

ⁱⁱⁱ 國立成功大學永續環境實驗所副研究員

^{iv} 文化部文化資產局文化資產保存研究中心助理研究員

收件日期：2018/08/02；接受日期：2018/11/02

■ Abstract

Granite, andesite and diabase have been widely used for stone pillars in temples in Taiwan. However, the evaluation of these rocks affected by fire disasters have been limited. This study attempts to develop criteria using ultrasonic technology to evaluate the rocks affected by fire through heated to different temperatures in the oven. The temperatures ranged from room temperature up to the maximum temperature of 1200 °C in 200 °C steps (200, 400, 600, 800, 1000, 1200), and cooling down to room temperature. Subsequent tests evaluated the variations in: absorption; specific gravity; and wave velocities with temperature. The study also analyses the relationships between compressive strength and heating temperature, and evaluates the relationship between the wave velocity and the compressive strength. In the second part of the study, large-sized granite, *long-shi* stone and diabase, used in traditional temples were tested for simulating the actual fire, to measure the variation between wave velocity and strength. Comparing the differences between the laboratory tests and the actual fire damage tests, the results show that although the outer layer of granite and *long-shi* stone in the actual fire damaged test caused large pieces of stone to flake off due to uneven heating, ultrasonic technology and compressive strength results confirmed that the internal stone was intact. Due to the small size of the diabase, the influence of uneven heating was significant, and the fracture of the diabase into several small pieces cannot be compared with the results of the laboratory tests.

Keywords: Ultrasonic detection, Igneous rock, Compressive strength, Fire damage

ⁱ Assistant, Graduate Institute of Conservation of Cultural Relics and Museology, Tainan National University of the Arts

ⁱⁱ Professor, Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University (derher@mail.ncku.edu.tw)

ⁱⁱⁱ Associate researcher, Sustainable Environment Research Laboratories, National Cheng Kung University

^{iv} Assistant researcher, Institute of Cultural Heritage Research Preservation, Bureau of Cultural Heritage, Ministry of Culture

Received Date : 2018/08/02; Accepted Date : 2018/11/02

一、前言

臺灣的傳統寺廟古蹟建築等一般多由木、石、土等材料所建構而成。對於木構件腐朽、蟻害程度已有完整的檢核方法，進而進行修復作業（王松永等，2005）。然而常作為支撐古蹟的石構件鮮少有學者提出損壞程度的相關檢測方式，火災發生顯然會對石材造成損傷，是以判定石材的受損程度對於災後的修復工程為相當重要的工作。例如嘉義縣朴子配天宮正殿於 2013 年 3 月因火災損毀，在進行修復工程時，即面臨到如何快速判斷廟中三川殿和過水廊中之花崗岩石柱的損壞程度，以作為修復的依據。

雖然石柱構件在一般的認知中是屬於不易受損的材料，但是在 $1100^{\circ}\sim 1200^{\circ}$ 的火場環境會因石柱的受熱位置與材料本身的熱膨脹係數不同，使材料產生不同程度的熱脹裂隙造成材料強度降低，且細微的熱脹裂隙不易由目視法進行判別。因此，本研究嘗試使用非破壞檢測中的超音波技術來檢測材料的強度及品質，利用超音波波速的變化評估石材的完整性及損傷情形，並建立超音波波速與石材因火害造成強度弱化的關係。

臺灣廟宇中常見的石材種類常見的為青斗石（輝綠岩）、花崗岩與觀音石（安山岩）（徐明福等人，2012：38），本研究將使用此三種材料經過試驗室模擬不同火害溫度作用後的抗壓強度與超音波波速之關係，並嘗試建立一套火害後石材受損程度的評估準則。

二、實驗規劃

研究中使用的石材為產自福建的黃

花崗岩（G682）、觀音石（G654）以及青斗石（G612），由於抗壓試驗的規定試體長徑比為 2：1，因此將試體的尺寸定為直徑 5cm、高 10cm 的圓柱試體。

以高溫爐模擬石材受不同溫度下的火害情境，加熱曲線參考 ISO834 的加熱測試曲線，加熱溫度分別為 200°C 、 400°C 、 600°C 、 800°C 、 1000°C 、 1200°C 共 6 種不同溫度。由於高溫爐在低溫階段加熱功率無法有效模擬，因此，依據高溫爐之加熱功率修正爐內加熱曲線，最終加熱曲線如圖 1 所示。將原始的溫度曲線以階梯式的升溫方式，每升溫一階持溫 10 分鐘，一方面以確保爐內溫度能夠均勻分布，另一方面提供高溫爐加熱之緩衝時間，當到達最終溫度時持溫 60 分鐘。

模擬受火害後的石材先測試其基本參數，包含吸水率、視比重及線熱膨脹係數，進而開始超音波測試及抗壓試驗。超音波檢測儀使用 OYO 公司生產的 Sonic Viewer-170，並以 200 kHz 及 63 kHz 兩種

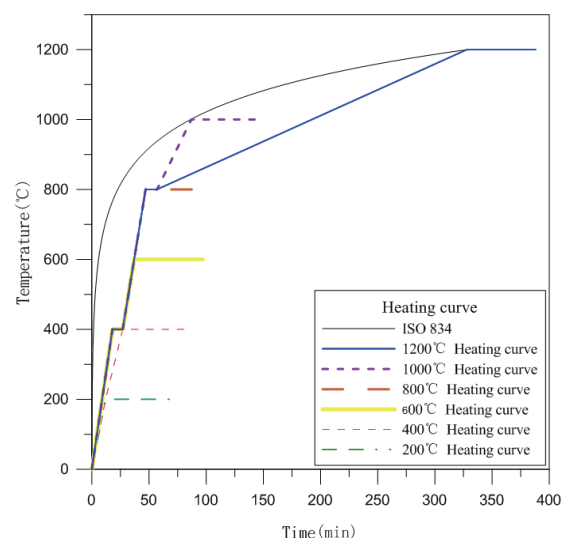


圖 1. 模擬火場溫度之加熱方式

Fig 1. Heating curve for fire simulation

圖片來源：作者提供

頻率的探頭進行測試，本研究只針對 P 波波速的試驗結果進行討論，倘若石材在火害模擬後損害程度不大，則可以 200 kHz 之探頭測其 P 波波速，但經過高溫加熱後損壞較大的試體則須使用 63kHz 的探頭使能測得其 P 波波速，故須視石材的損壞狀況更換不同頻率的探頭。抗壓試驗使用 MTS 所製造的 300 噸材料試驗機，加載速率為 0.2 mm/min。最後，利用火害溫度、波速變化及石材強度的關係，建立石材火害後的殘留強度之評估方法。

為了驗證室內試驗所建立的石材損壞評估準則是否能應用於實際石材火害狀況，本研究準備 20×20×60 cm³ 的大尺寸石材實際進行火害試驗，同樣將火害後的石材進行超音波及抗壓強度試驗，再與室內試驗的石材損壞評估準則對應，比對其差異性。

三、試驗結果

本研究將模擬火害後的石材進行吸

水率、比重、膨脹率等物理性質試驗，觀察石材的顏色變化，並探討其超音波速、抗壓強度的變化，統整上述之結果再對石材的受損程度做分級。以下分別觀察內外表、物理性質測試、超音波檢測、抗壓試驗來討論各種岩石的試驗結果。

(一) 外表觀察

三種石材試體在加熱過後，隨著溫度越高試體顏色變化越明顯，花崗岩由原始的黃色，到 800℃ 變為橘色，到 1200℃ 再轉成紫色；觀音石由灰黑色經加熱後顏色變淡，經 1200℃ 後熔融變成褐色；青斗石原始為灰綠色經加熱後顏色變淡且褐色漸多，直到 1200℃ 試體變成黑褐色，如圖 2 所示。此外，石材經高溫加熱後因礦物的熱膨脹程度不一而產生裂縫，由圖 2 中可看到三種石材在 400℃ 的加溫後開始有裂紋產生，而經 1000℃ 的花崗岩試體更能明顯的看出礦物結晶間的裂縫，但觀音石及青斗石均無此狀況，推估因花崗岩組成礦物繁多且礦物結晶體較大，使礦物接受高溫後熱膨脹程度不均勻，進

表 1. 實驗試體尺寸介紹

Tab 1. Sizes of the test samples

試驗名稱	花崗岩 (編號 G682)	觀音石 (編號 G654)	青斗石 (編號 G612)
抗壓試驗、 超音波試驗、 物理性質試驗			
直徑 5 cm，高 10 cm			

資料來源：作者提供



圖 2. 三種石材於不同溫度下之外表變化情形

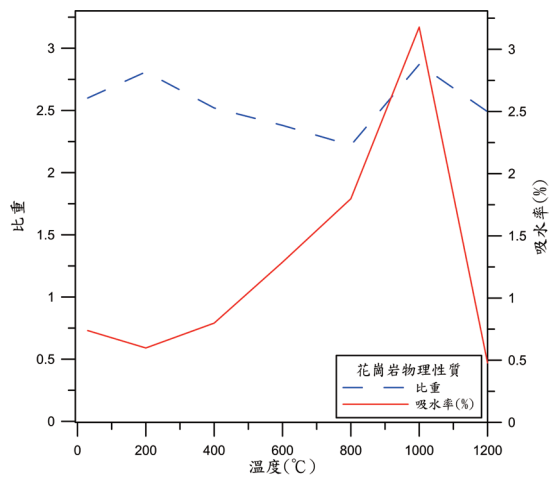
Fig 2. Outward appearance changes after different heating temperatures

圖片來源：作者提供

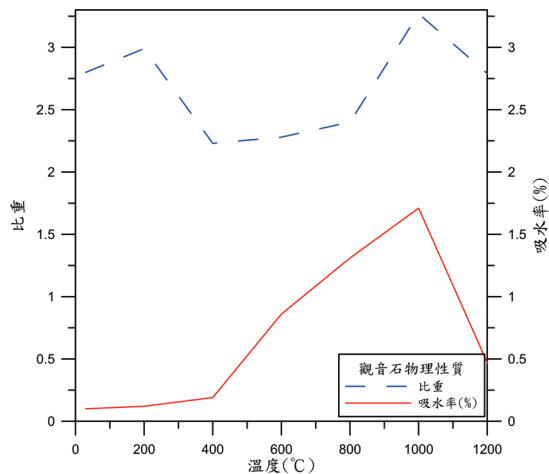
而造成裂縫破壞。當溫度到達 1200℃ 石材熔化且似磚頭的材質，輕敲會發出清脆的聲音。由於青斗石受 1200℃ 加熱後已熔化，無評估損壞程度的必要性，故之後的試驗結果不討論加溫 1200℃ 的青斗石。

(二) 物理性質測試結果

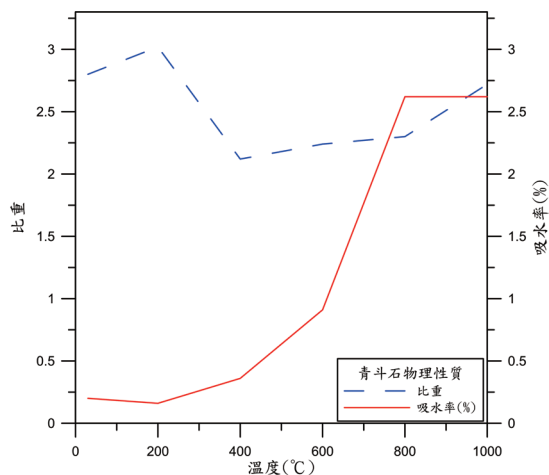
物理性質測試內容包含石材的吸水率、視比重以及線膨脹率三種性質，相關實驗結果在以下做描述：



(a) 花崗岩



(b) 觀音石



(c) 青斗石

圖 3. 石材比重、吸水率與溫度之關係

Fig 3. Relationships between specific gravity, absorption and temperature

圖片來源：作者提供

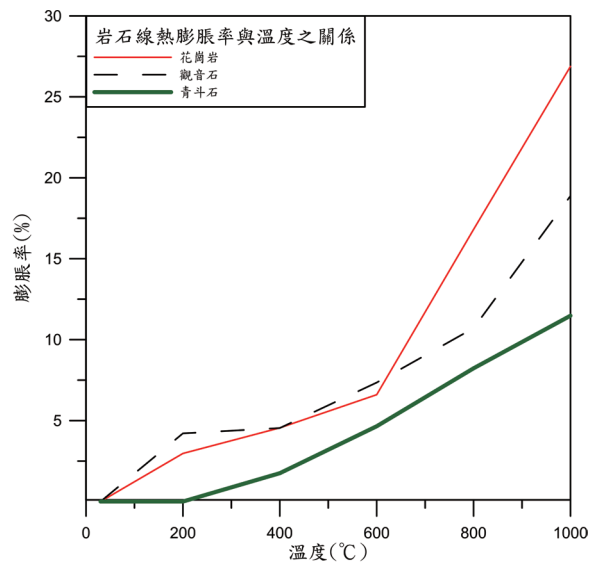


圖 4. 石材熱膨脹率與溫度之關係

Fig 4. Relationship between expansion and temperature

圖片來源：作者提供

三種石材在溫度超過 400°C 後吸水率大幅上升，且隨加熱溫度越高吸水率也越高，直到溫度達 1000°C 後花崗岩及觀音石的吸水率下降、青斗石吸水率不變，說明石材在 1000°C 後部分熔化填充因高溫生成的裂縫。此外在溫度 200~800°C 間吸水率上升說明石材的孔洞及裂隙增加，相對來說比重也隨之下降，相關試驗結果如圖 3 所示。

此外，量測岩石材料加熱前後長度變化間接求得熱線膨脹係數。結果顯示出石材在越高溫度的環境下熱線膨脹係數越大，其中花崗岩的熱線膨脹係數最大（如圖 4）。Heuze (1983) 曾以七種花崗岩作為實驗對象，發現當溫度達某一階段時，熱線膨脹係數會急遽上升，因此將此階段定義為 α - β 過渡區，亦指當溫度超過 α - β 過渡區時，岩石的熱線膨脹係數會急遽上升。實驗結果顯示此七種花崗岩 α - β 過渡區位於 500°C ~600°C 間。在本實驗結果的花崗岩 α - β 過渡區於 600°C。

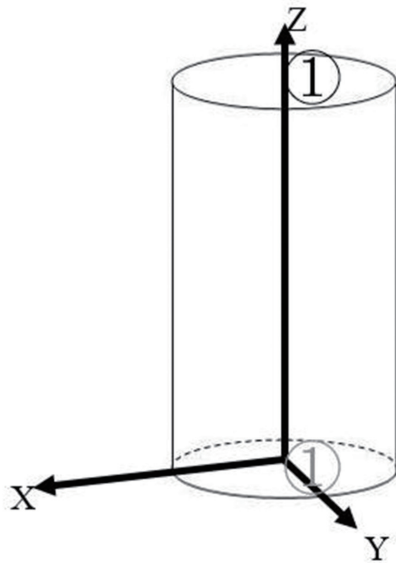


圖 5. 石材超音波試驗量測點位示意圖

Fig 5. The method of ultrasonic testing

圖片來源：作者提供

(三) 超音波檢測法

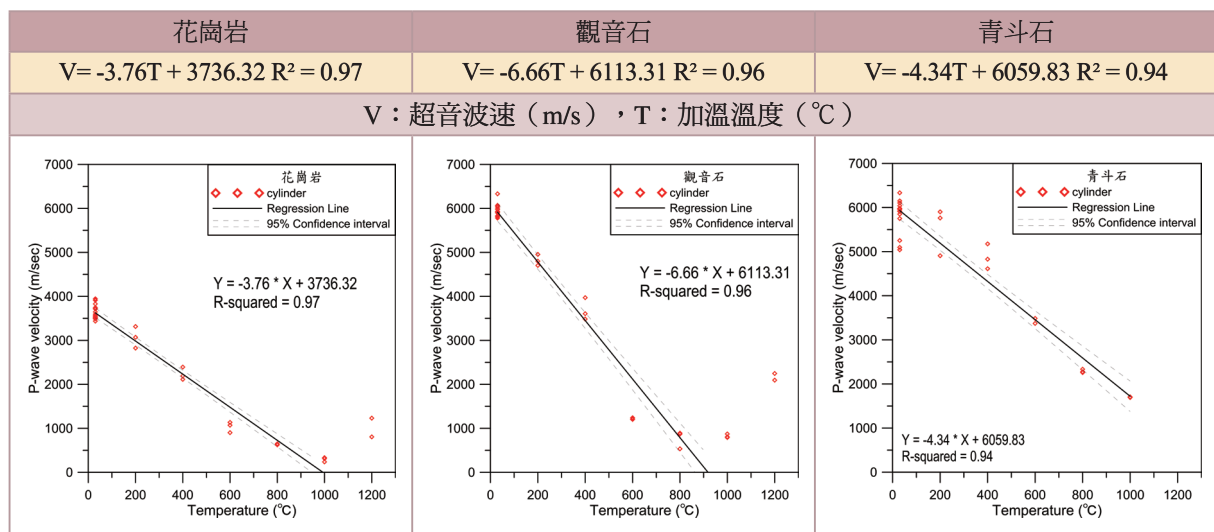
超音波檢測法為非破壞檢測方法之一。音波透過介質產生膨脹或壓縮進行傳播，人耳可聽見的頻率在 16 Hz~20kHz 的範圍，若頻率高於此範圍則稱為超音波（Ultrasonic）。一般非破壞檢測應用

上，脈衝振盪器發出的電壓加在壓電陶瓷或石英晶片製成的探頭上，探頭髮出的脈衝波進入材料並在其中傳播，當試體內部有缺陷時，波會沿缺陷邊緣傳遞因此增加波傳時間，藉由波傳時間可以推得波在該試體內的波速。本實驗所使用的超音波檢測儀器為日本 OYO 應用地質株式會社所生產，型號為 Sonicviewer 170（Model-5228）。在超音波檢測前，先將試體經過 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 烘乾 24 小時後取出再進行試驗。檢測探頭置於試體編號①（如圖 5），由上方探頭髮射激發波、下方探頭接收到達波，此方法稱為直接傳遞法，此方法的能量衰減最少，因此有較佳的靈敏度（陳永增，2004）。

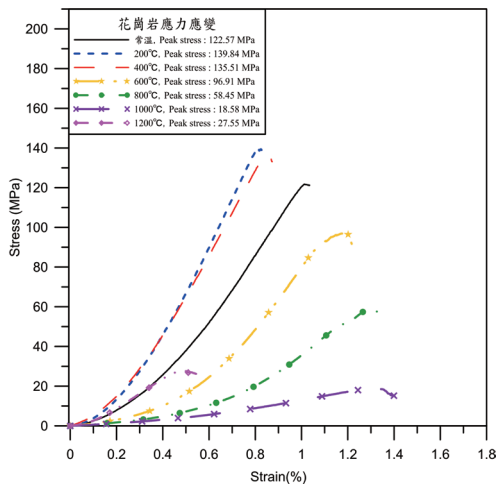
將實驗所得波速與加熱溫度整合並進行迴歸，統整結果列於表 2。因經過 1200°C 高溫處理後的試體產生變形熔化，石材結構緻密因此波速上升，但本研究僅討論外觀完整、損傷不易辨識的試體，故 1200°C 的結果不納入評估標準內，所以不納入迴歸過程，研究評估僅討論常溫至

表 2. 三種石材波速與溫度之關係

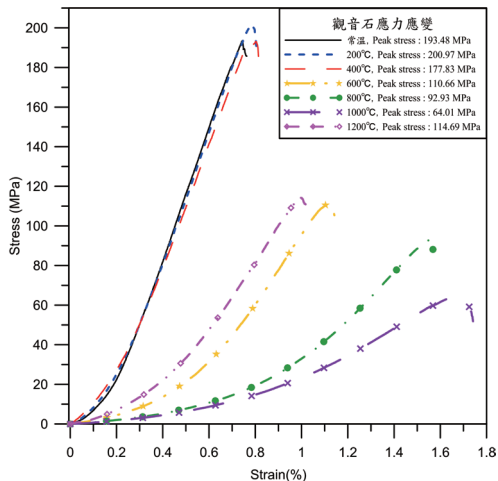
Tab 2. Relationship between velocity and temperature



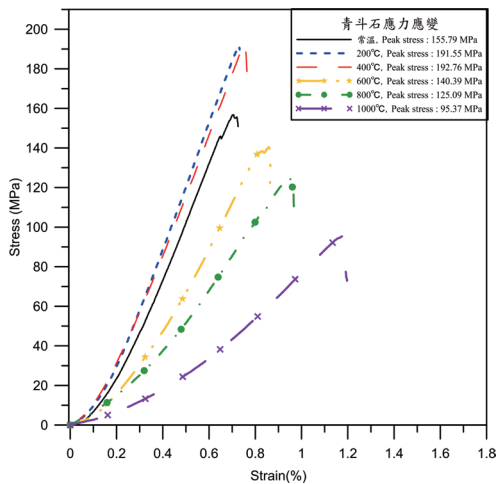
圖片來源：作者提供



(a) 花崗岩



(b) 觀音石



(c) 青斗石

圖 6. 各溫度的最大單壓強度石材的應力應變曲線
Fig 6. Compressive strength and strain curves

圖片來源：作者提供

1000°C 的波速迴歸結果。由表中可發現在溫度低於 1000°C 的範圍，P 波波速隨著火害溫度呈現線性遞減，以觀音石的遞減幅度最大。

(四) 單軸壓縮試驗法

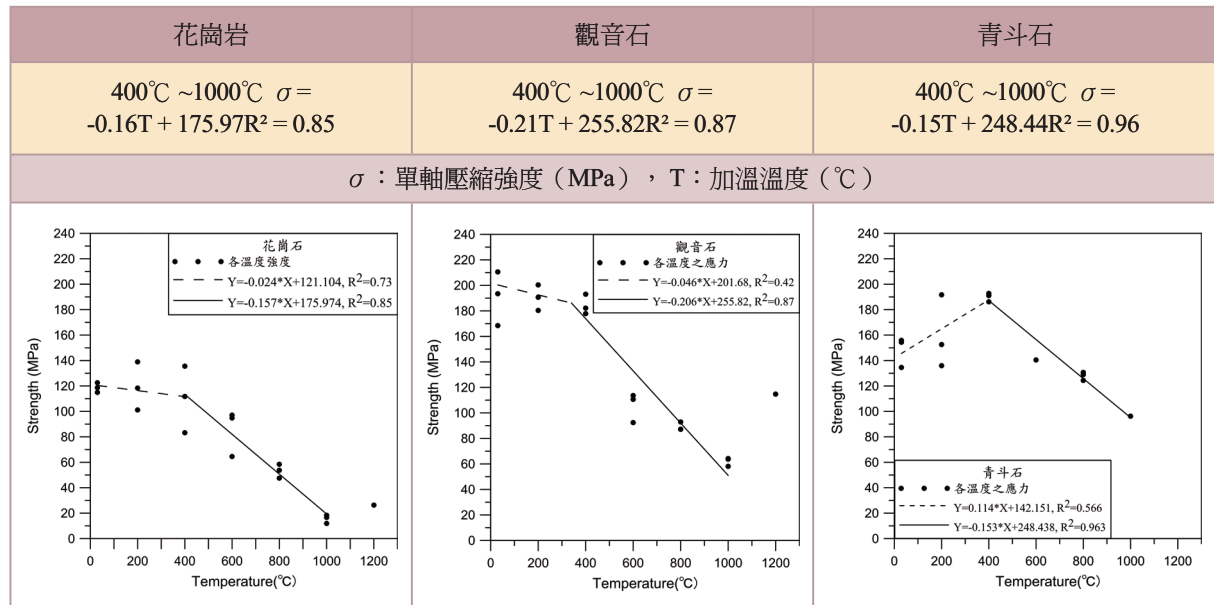
本實驗將三種石材試體受各種溫度處理後進行單軸壓縮試驗，實驗規範依據 ASTM 7012-14 所規定。青斗石因受溫 1200°C 試體熔化所以無法進行實驗，故在此不討論。

由石材的應力應變圖（圖 6）可看出岩石受任何高溫後單壓破壞模式均為脆性破壞，且單壓強度隨加熱溫度的增加而降低。此外，於 600°C ~1000°C 的最大應變隨加熱溫度升高而增加，而常溫至 400°C 之試體的尖峰強度所對應之軸向應變量變化不大。由杜守繼（2004）及陳聖文（2008）對於石材加熱後單軸壓縮強度的研究中說明，花崗岩的單壓強度會隨溫度升高而下降，在溫度達 400°C 後此現象更顯著。

單軸壓縮試驗取每一種火害溫度的條件下的三個圓柱體試體進行測試，由試驗結果顯示，在常溫下石材中以觀音石的抗壓強度最大（210.54MPa），其次為青斗石（155.79MPa），最小的是花崗岩（122.57MPa）。加溫模擬火害後，抗壓強度會隨溫度增加而下降，其中在 1000°C 火害溫度後，以青斗石的最高（95.37MPa），其次為觀音石（64.01MPa），花崗岩之強度最低（18.58MPa），火害溫度與強度的關係彙整於表 3。由前述可知，石材在經過 400°C 後尖峰強度所對應之應變有明顯變化，吸水率提升、比重下降，說明材料的性質開始明顯改變。

表 3. 三種石材最大應力與溫度之關係

Tab 3. Relationship between compressive strength and temperature



資料來源：作者提供

表 4. 土壤及岩石以單軸抗壓強度之分類 (潘國樑, 2013: 260)

Tab 4. Classification of soil and rock by compressive strength

岩土分類	單軸抗壓強度級距 (MPa)	分類用詞	分類名稱
土壤	---	---	---
岩石	<6	很弱	軟岩
	6-20	弱	
	20-60	中等	硬岩
	60-200	強	
	>200	很強	

資料來源：作者提供

對於岩土分類的方法，潘國樑 (2013) 以抗壓強度的方式將岩土分類為六種級別，如表 4，抗壓強度若達於 6 MPa 即可稱為岩石，強度在 6~20 MPa 之間則稱為軟岩，強度大於 20 MPa 稱為硬岩。將經過不同加熱溫度之三種石材進行分類，花崗岩常溫至 600 $^{\circ}\text{C}$ 強度為 120.38~81.88 MPa 屬強硬岩，800 $^{\circ}\text{C}$ 強度為 50.37 MPa 屬中等硬岩，受 1000 $^{\circ}\text{C}$ 加溫後強度為 18.97 MPa 為弱軟岩；觀音石常溫至 800 $^{\circ}\text{C}$ 時強度為 200.3~91.02 MPa 屬強硬岩，1000 $^{\circ}\text{C}$

時之強度為 49.82 MPa 屬於中等硬岩，而青斗石於常溫至 1000 $^{\circ}\text{C}$ 加溫後的強度為 145.57~95.44 MPa 均屬強硬岩，但受 1200 $^{\circ}\text{C}$ 加溫後全熔化。

(五) 石材火害溫度後之抗壓強度與超音波之關係

為尋求使用超音波檢測儀器檢測石材的損壞程度的方法，因此本研究將先前討論的超音波速與受熱溫度的關係結合單壓強度與受熱溫度的關係，討論三

種模擬火害後的石材超音波波速與單壓強度的關係。由表 2 及表 3 中所示，石材受熱低於 400℃ 以下時，平均抗壓強度沒有太大變化，僅超音波波速之改變，表示加溫 400℃ 以下對岩石之抗壓強度無太大影響。400℃ ~1000℃ 的階段超音波波速及抗壓強度均隨溫度上升而減小。加溫 1200℃ 後因岩石呈熔融狀態再凝固，縮短了礦物之間的距離，所以超音波波速與抗壓強度均上升。石材於不同溫度下抗壓強度與超音波波速間之關係如表 5 所示。

(六) 石材之損壞程度評估

綜合以上石材於不同溫度下的相關特性，接下來針對三種石材的結果分述其損壞程度的評估標準。花崗岩於波速約 2000 m/s 時抗壓強度明顯開始減小，表示在波速大於 2000 m/s 的區域石材完整，定義為

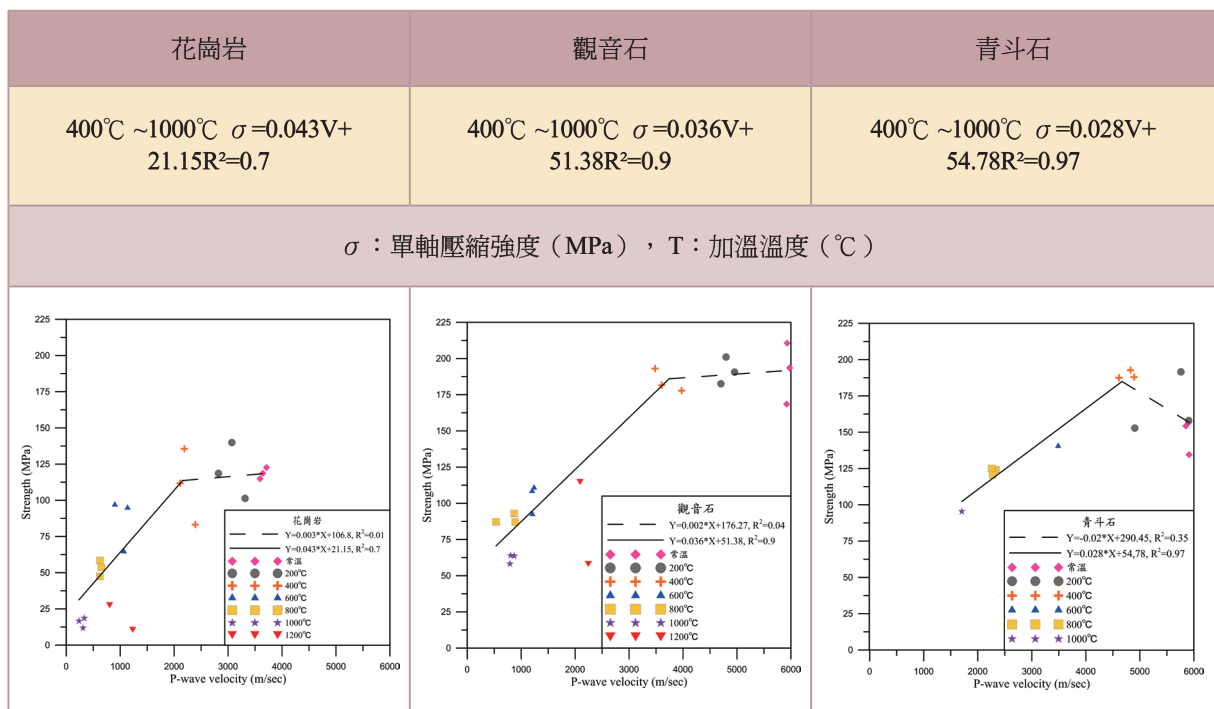
損壞程度的第一階段；當波速在 1000~2000 m/s 之間時產生許多微裂隙，此範圍定義為第二階段；當波速小於 1000 m/s 時雖屬中等硬岩，但石材已變質，定義此階段為受損程度的第三階段。

觀音石在波速大於 3500 m/s 時石材完整、抗壓強度變化不大，定義為第一階段的損壞程度；當波速介於 1000~3500 m/s 間，石材明顯產生微裂隙，抗壓強度也隨波速下降，定義為第二階段；在波速小於 1000 m/s 時石材產生大裂隙、材質變質，定義此階段為受損程度的第三階段。

青斗石即使經過高溫作用後抗壓強度還在 95 MPa 以上，屬於強硬岩。由抗壓強度與波速關係圖中可看到，於波速約 4500 m/s 抗壓強度有明顯轉折，因此將

表 5. 三種石材強度與波速之關係

Tab 5. Relationship between compressive strength and velocity



資料來源：作者提供

表 6. 火害後石材受損程度之評估準則

Tab 6. Evaluation for stone damaged under different temperatures

花崗岩					
階段	超音波速 (m/s)	平均抗壓 強度 (MPa)	溫度 T (°C)	岩石狀態	
第一階段	> 2000	> 110	< 400	1. 石材完整，屬於強硬岩。	
第二階段	1000-2000	65-110	400-600	1. 微裂隙產生。 2. 石材顆粒內應力增加，抗壓強度下降。 3. 吸水率上升、比重下降	
第三階段	< 1000	< 65	> 1000	1. 大裂隙產生。 2. 石材礦物熔化、呈磚化，石材整體已變質，屬於弱軟岩。 3. 比重及吸水率下降。	
觀音石					
階段	超音波速 (m/s)	平均抗壓 強度 (MPa)	溫度 T (°C)	岩石狀態	
第一階段	> 3500	> 200	< 400	1. 石材完整，屬強硬岩。	
第二階段	1000-3500	87-200	400-600	1. 微裂隙產生。 2. 石材顆粒內應力增加，抗壓強度下降。 3. 吸水率上升、比重下降。	
第三階段	< 1000	< 87	> 1000	1. 大裂隙產生，石材顏色漸深。 2. 屬中等硬岩。 3. 石材礦物熔化、呈磚化，石材整體已變質。 4. 比重及吸水率下降。	
青斗石					
階段	超音波速 (m/s)	平均抗壓 強度 (MPa)	溫度 T (°C)	岩石狀態	
第一階段	> 4500	> 200	< 400	1. 石材完整，屬強硬岩。	
第二階段	< 4500	< 200	> 1000	1. 裂隙產生，當波速低於2000m/s時石材產生大裂隙崩解。 2. 石材開始變色，由灰綠色至粉橘色。 3. 石材顆粒內應力增加，抗壓強度下降。 4. 石材礦物熔化、呈磚化，石材整體已變質。 5. 比重及吸水率下降。	

資料來源：作者提供

波速大於 4500 m/s 定義為石材受損程度之第一階段，波速小於 4500 m/s 為石材受損程度的第二階段。

四、石材實際火場試驗

古蹟寺廟中常見以石雕龍柱為主要構件，所以在實際火場試驗中將與龍柱柱心相似尺寸的石材作為實驗對象，檢測實際尺寸石材經火害燃燒後的狀況，再比照室內試驗的損壞程度評估。本實際火場試驗由「實尺寸鋼構屋之剪力連接複合鋼梁火害結構行為研究」之協助，為內政部建築研究所指導，執行單位為國立成功大學土木工程學系。藉由此次機會將石材置於實驗屋牆邊一同進行火災測試，模擬石柱遭火焰燃燒之情形，進一步評估火害後石材之損壞程度。實驗石材為龍慶石材股份有限公司所提供的花崗岩、隴石以及青斗石，花崗岩及隴石之尺寸為 $20 \times 20 \times 60 \text{ cm}^3$ ，青斗石尺寸為 $10 \times 12.5 \times 80 \text{ cm}^3$ ，如表 7 所示，其中隴石是廟中常用的花崗岩石材之一。實驗火場外觀如圖 7 (a) 所示，室內為 $6 \times 6 \times 4 \text{ m}^3$ 的空間，東邊一對外窗口，火場內部無其他通風裝置，火場內部堆有九疊阿拉斯加雲杉木堆，以酒精膏作為助燃物。石材放置位置選擇附近有感溫器設置處。石材分配分為 A、B 兩側，每一側均有花崗岩、青斗石以及隴石。A 側石材由南至北為花崗岩、青斗石及隴石，B 側石材由西至東為花崗岩、隴石及青斗石，石材靠牆放置、附近有感測溫度計。由於火場溫度在每一空間均不同，因此選擇離石材位置最近之兩處感溫計來量測石材所受火害的溫度過程，兩感溫計分別位於西側及南側，距離地面 750 mm

表 7. 火場實驗石材之種類及尺寸

Tab 7. Sizes of the actual fire damaged sample

花崗岩 (G682)	隴石	青斗石 (G612)
$20 \times 20 \times 60 \text{ cm}^3$	$20 \times 20 \times 60 \text{ cm}^3$	$10 \times 12.5 \times 80 \text{ cm}^3$
		

資料來源：作者提供

處，如圖 7 (b)、圖 7 (c) 所示。由點燃火苗開始計時，記錄總時 133 分鐘，最高溫度約在 40 分鐘時，西側牆面最高溫 1290°C ，南側最高溫度為 1150°C ，實際火場的溫度曲線如圖 8，明顯看出與室內試驗所規定的升溫方式不同。

火害後因石材內部受熱不均造成表面嚴重受損，花崗岩及隴石外層如洋蔥般層層剝落，除了垂直裂隙外，水平裂隙使完整的石材分為多塊。評估石材的損壞程度除了觀察其破裂深度，亦使用超音波試驗法以及抗壓強度試驗進行石材內部損壞評估。在超音波檢測當中先將外層的大片石材剝除，量測石材內部的超音波波速，結果以波速與測試位置呈現於表 8，而抗壓試驗的試體取樣以超音波波速較低的部分做為試驗對象，但由於青斗石的內部裂隙眾多，無法得到規範所規定的尺寸，所以青斗石強度的檢測方法以史密特錘檢測評估。

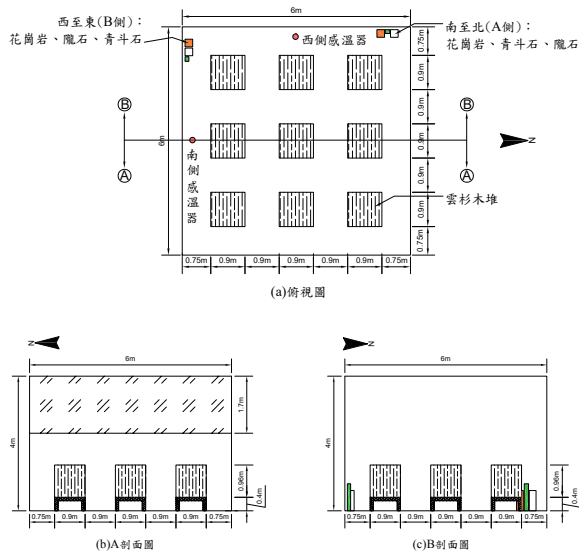
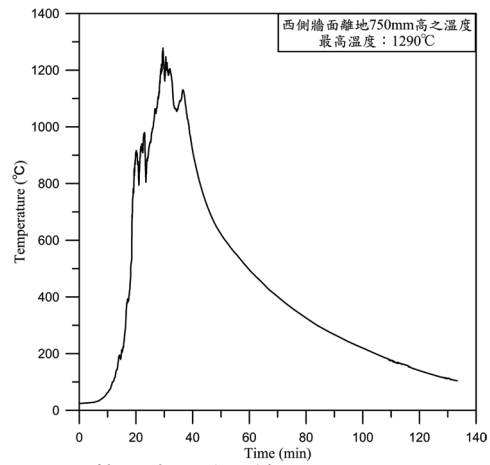
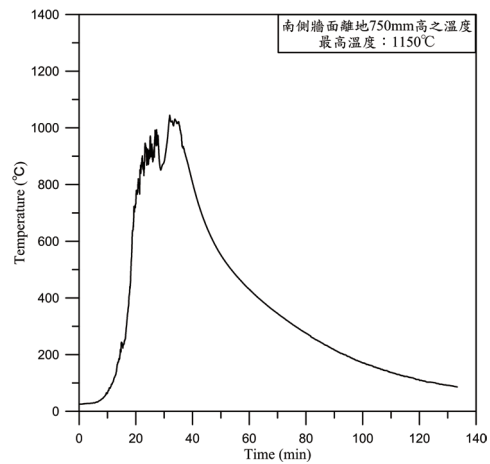


圖 7. 火場現場石材及感溫計配置圖
Fig 7. Positions of sample and thermometer
圖片來源：作者提供

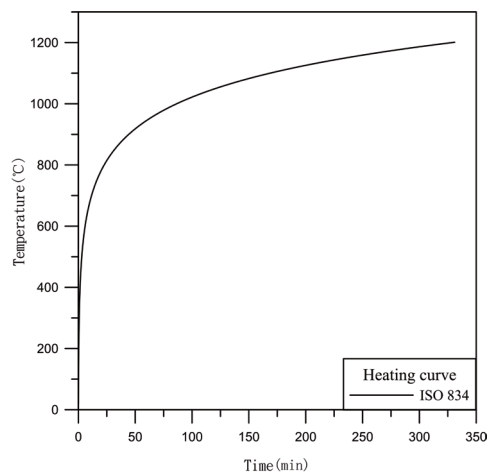
首先先討論花崗岩的超音波波速評估，雖然石材的外圍部分剝落，但內部石材完整，其超音波波速均在 2000~4500 m/s 的範圍，少部分落在 1000~2000 m/s，以上述室內試驗的花崗岩損壞評估方法判斷，此波速的岩石為第一階段的損壞程度。再



西側面牆溫度歷時曲線



南側面牆溫度歷時曲線



ISO 834 溫度歷時曲線

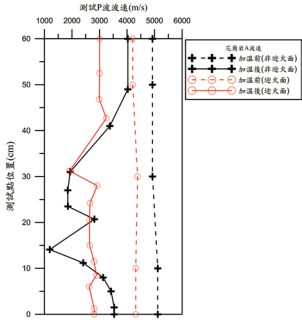
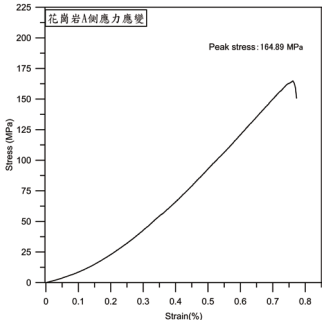
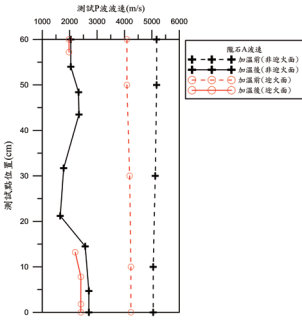
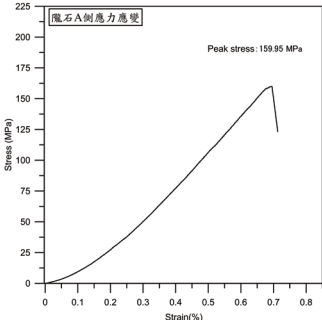
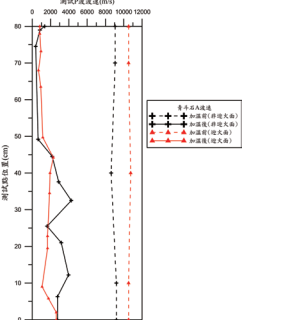
圖 8. 火場溫度歷時曲線與 ISO 834 溫度歷時曲線
Fig 8. Heating curve from fire site and ISO 834 heating curve

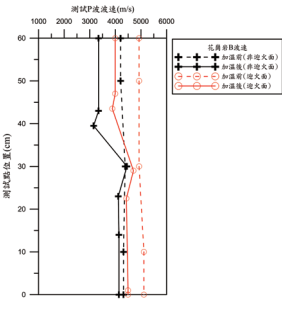
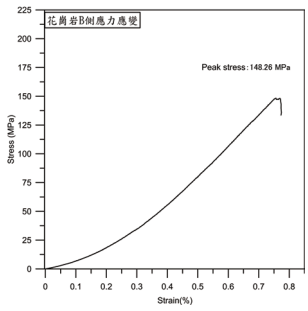
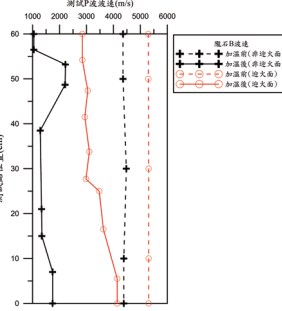
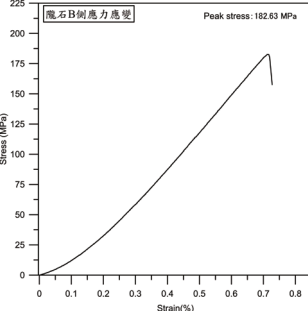
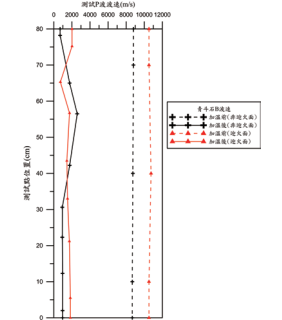
圖片來源：作者提供

來以抗壓強度評估，檢測其抗壓強度落於 148.26、164.89 MPa，在花崗岩的損壞評估方法中屬於第一階段的損壞程度（圖 9（a）、圖 9（b））。綜合以上的評估結果，火害後的花崗岩雖然外觀石材剝落嚴重，但內部的石材完好。

隴石的火害後石材剝落情形與花崗岩相似，但測其超音波波速 1000~3000 m/s，較花崗岩慢，且隴石 A 的迎火面有大部分石材測不到波速，因此使用花崗岩損壞評估法評估（隴石歸類為花崗岩），隴石為第二及第三階段的損壞程度，迎

表 8. 火場試驗後石材損壞狀況、波速與強度變化
Tab 8. Variation of velocities and compressive strength after fire damage

A 側石材			
	石材損壞狀況	超音波速	單壓強度
花崗岩			
隴石			
青斗石			由史密特錘所推估的強度為 28.64MPa

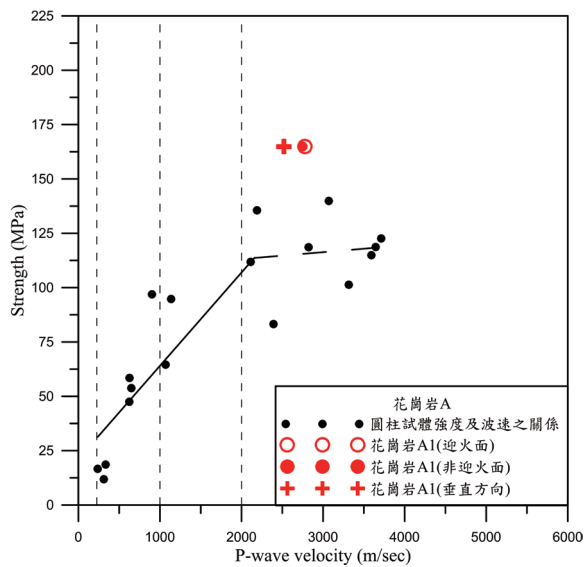
B 側石材			
	石材損壞狀況	超音波速	單壓強度
花崗岩			
隴石			
青斗石			由史密特錘所推估的強度為 15.94 MPa

圖片來源：作者提供

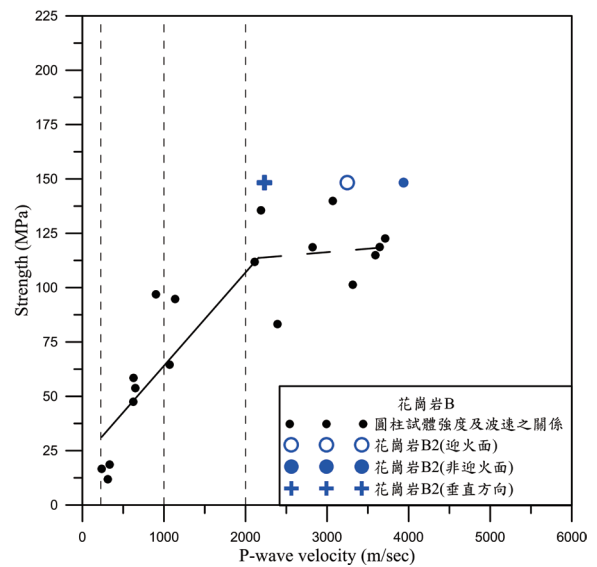
火面測不到波速的部分原因為迎火面所造成石材內部有許多微裂面，而此裂面與迎火面平行，因此不影響非迎火面波速檢測。接下來同樣以抗壓強度檢測評估，其強度為 159.95 MPa、182.63 MPa，此強度在花崗岩損壞評估方法中屬於第一階段（圖 9 (c)、圖 9 (d)），以此

更能說明隴石的裂面平行迎火面，需再評估石材的可利用性。

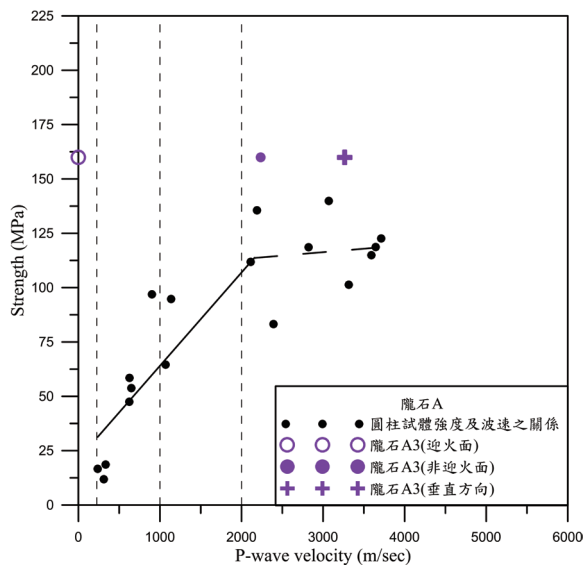
青斗石在火害前呈青綠色，經過火害後外圍 0.7 cm 呈紅褐色，判斷受 800℃ 的高溫，內部的岩石從顏色觀察來說與原始岩石相似，因此判斷青斗石受火害影



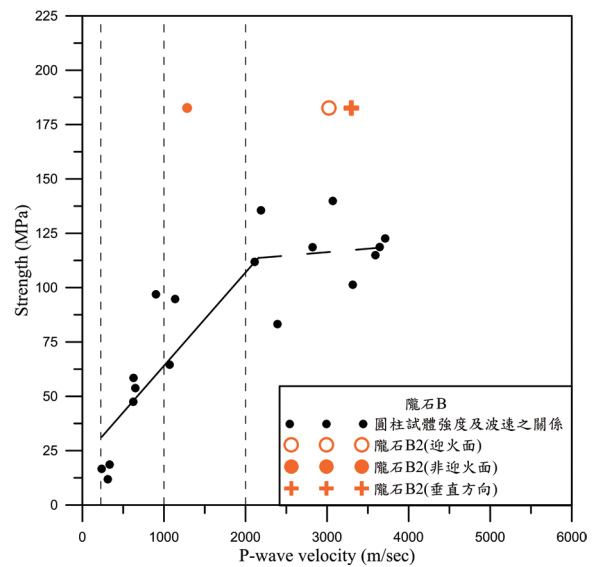
(a) 花崗岩 A



(b) 花崗岩 B



(c) 隴石 A



(d) 隴石 B

圖 9. 以花崗岩之災害受損準則判定火場花崗岩及隴石之破壞階段

Fig 9. Using granite destruction assessment criteria to evaluate the damage level of granite and long-stone

圖片來源：作者提供

響範圍為迎火面往內 0.7 cm，其餘部分因岩石尺寸小、受熱不均造成岩石不均勻膨脹而產生大裂縫。青斗石的超音波速遠小於 4500 m/s，以青斗石的損壞評估方法中屬於第二階段的破壞。而岩石強度的部分以非破壞檢測之一的史密特錘檢測方測試，以此檢測的結果其強度為 28.64、15.94 MPa，遠低於第二階段破壞的強度。

由於花崗岩與隴石和青斗石於實際火場試驗的結果與室內試驗的結果稍有落差，花崗岩與隴石超音波速雖皆落在第一階段的損壞程度，但抗壓強度皆高於室內試驗，僅說明不同來源的石材強度有些不同，但經由超音波的檢測均屬於良好石材。青斗石的抗壓強度卻低於室內試驗，原因由上段所述，因火場試驗的青斗石尺寸較小再加上火場升溫過快，使得青斗石不均勻膨脹裂成數小塊以致無法以抗壓試驗的方法測其強度，因此使用非破壞檢測中的史密特錘推估其強度。史密特錘試驗法利用撞擊試體表面後以反彈數來求得試體的表面（1~3 mm）硬度進而推測其抗壓強度，對於破碎的青斗石試體所測試的強度結果僅代表表面的強度。由青斗石的剖面看出石材內外顏色的差別，石材外圍呈褐色內部則還是原石的顏色，相信若使用較大尺寸的青斗石石材做實際火場試驗，可降低石材因不均勻熱膨脹的因素導致大裂隙產生，影響石材強度的判斷。

五、結論

1. 本研究建立了一套使用超音波檢測火害後花崗岩、青斗石、觀音石石材的損傷程度評估方法，可用於研判古蹟建

築歷經火害後石材的再利用性。

2. 由現地實尺寸火害試驗，可知花崗岩、隴石石材在經過火害約 1 小時後石材表面雖剝落，但內部石材完好，然青斗石則內部龜裂發達，強度降低甚多。

3. 實際火場的石材尺寸大，會因為受熱不均勻導致石材表面損壞但內部完整的狀態。然而室內試驗中石材的尺寸小、受熱均勻，所以能代表火場中石材各損壞部位的狀態，進而評估石材的損傷程度。

參考文獻

王松永、蔡明哲（2005）。〈古蹟與歷史建築物生物劣化之診斷與防治〉，《林業研究專訓》12（5），頁 1-4。

杜守繼、劉華、職洪濤、陳浩華（2004）。〈高溫後花崗岩力學性能的試驗研究〉，《岩石力學與工程學報》23（14），頁 2359-2364。

徐明福（2012）。《古蹟、歷史建築石材現況調查先期研究期末報告書》，臺中：文化部文化資產局（未出版）。

陳弘毅、吳曉生（2013）。《火災學》，臺中：鼎茂圖書出版股份有限公司。

陳永增、鄧惠源（2004）。《非破壞檢測》，臺北：全華科技圖書股份有限公司。

陳聖文（2008）。《岩石熱力學與力學性質之研究－以三種岩石為例》，國立成功大學資源工程系碩士論文。

潘國樑（2013）。《工程地質通論》，臺北：臺灣五南圖書股份有限公司。

Heuze, F. E. (1983). "High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-a review", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20 (1) :3-10.