

混凝土材料受壓 AE 訊號研究

葛文忠¹、俞旗文²

¹財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

²財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心副經理

Study of AE Signal of Concrete Material Under Loading

W. C. Ko¹ and C. W. YU²

¹ Research Engineer, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc.

² Deputy Manager, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc.

* 連絡作者：wcko@sinotech.org.tw

摘要

結構健康監測係應用新穎感測器、無線資料傳輸等方式，持續性地監測結構物完整性及動態特性，以進行損傷評估。近年來研究及應用範圍擴及土木結構安全檢查，可應用於橋梁動態特性監測、鋼纜腐蝕、位移、變形及混凝土破裂過程的監控。本論文嘗試以結構健康監測其中常用的 AE (Acoustic Emission) 監測方法，偵測混凝土試體受壓破壞過程所產生的高頻音訊，並採適當資料統計方法進行資料處理，處理結果與外加荷重、破壞狀況進行比對，期能了解混凝土材料受壓時，其 AE 訊號基本特性，以作為進一步研發的基礎。目前初步透過混凝土圓柱試驗結果顯示，AE 事件計數 (Event Count) 結果並無法有效反映試體受力狀況，僅在外加荷重接近試體強度的 85% 以上時，事件計數方明顯增大；而應用新穎資料處理方法 (類似地震學 b 值方法) 進行資料分析，則可反映 AE 事件計次與受力狀況有明顯關聯。

關鍵詞：結構健康監測，AE 監測，事件計數、b 值方法。

Abstract

Structural health monitoring (SHM) has been recently extending its application towards civil engineering for detecting the integrity of bridges by means of innovative sensors and data transmission technologies. In this paper, adoption of AE method, which is one of the widely used tools of SHM, to monitor the transient response of concrete under monotonic and cyclic loading is illustrated. The preliminary test results on three sets of cylindrical concrete

specimen indicate that use the AE event count along can not correlated well with the loading level prior to failure of concrete specimens. However, use of the b-value analysis as that frequently used in seismic data processing can reflect well the relationships of the AE signal versus stress level, especially when the loading level close to the 85% of ultimate concrete strength.

Keywords: SHM, AE method, Event count, b-value

一、前言

一般而言，橋梁結構隨著使用時間的增長，混凝土材料的潛變效應、鋼筋腐蝕、預力鋼腱鬆弛疲乏或原始設計施工的瑕疵及其他環境因素，皆會造成結構物老劣化或破壞，國外曾發生過多起橋梁因為老劣化而喪失功能的案例。根據美國的調查[1]，近 10 年間就有 44 座橋梁因為老化、劣化而喪失功能的案例。台灣目前雖沒有完整的老劣化統計數字，但橋梁管理為確保橋梁正常使用，每年皆必須支出龐大的檢測與維護費用，例如台北市近年來橋涵安全檢測工作費用即達數千萬元，遑論進一步的維修花費。因此，若能準確地瞭解結構物老化、劣化及破壞情形，找出情形嚴重者，則可將有限的維護資源投注於確實需要維修補強的對象，除了可延長結構之使用年限，更可能避免災難之發生，減少巨大社會成本的付出，將是本研究的重要意義之所在。

目前國內橋梁結構年度安全檢查目的就是為了瞭解橋梁損傷程度，但例行性檢測頻率過低，僅能瞭解結構破壞現況，且因檢測能力有限，仍無法瞭解內部損壞及發生機制，尤其對於數量極為龐大的預力結構，目前並無適當方法進行預力損失檢測，以致無法在結構預力損失造成微破壞時即時提供預警，以遏止結構物的劣化而損壞。結構健康監測 (Structural Health Monitoring; 簡稱 SHM) 技術原應用於航太工業，係應用新穎感測器、無線資料傳輸等方式，持續性地監測結構物完整性及動態特性，以進行損傷評估。近年來研究及應用範圍擴及土木結構安全檢查，可應用於橋梁動態特性監測、鋼纜腐蝕、位移、變形及混凝土破裂過程的監控，換句話說，SHM 可應用於橋梁整體行為監測，或是構件局部破壞程度的瞭解。惟此監測概念需在橋梁現地裝設大量感測器，而感測器及訊號線的裝設、資料傳輸及電源供應等遂變成一項龐大的工程問題，對於大部分老舊橋梁而言，暨有硬體資源及設施較缺乏，建立監測系統的硬體成本花費相當驚人。為了結構健康監測的概念更為可行，近年來諸多研發改進傳統監測硬體設備的缺點，並朝新式感測器、無線傳輸技術及新型電能的研發應用，尤其是應用無線感測器網路 (Wireless Sensor Network) 技術，若能克服電源及資料傳輸可靠度的問題，將可大幅減少硬體裝置的費用。從目前國際間研發及應用趨勢看來，橋梁的動態特性監測似乎已有初步成果，而其他應用似乎仍有待進一步研究。

預力混凝土內部破壞形成 AE 訊號的方式很多，例如混凝土壓力破壞/張力破壞、鋼筋與混凝土黏結脫離 (De-bonding)、鋼鍵斷裂等瞬時的破壞；其餘如混凝土與鋼鍵等的潛變、鋼材的鏽蝕均為長期物理化學特性變化，則不致引發 AE 訊號。本研究內容係藉由混凝土試體受壓試驗過程，瞭解其 AE 訊號特性，研究工作主要藉由壓力機提供荷重

進行壓縮破壞試驗，並試體破壞過程產生的AE訊號，再採適當方式處理AE紀錄及比對荷重紀錄，期望獲得混凝土材料受壓時，AE訊號的基本特性。

二、音射監測方法

音射（Acoustic Emission；簡稱AE）係為脆性材料內部破裂時所形成暫態彈性波的一種現象，在材料受應力作用下，造成內部局部、微小且快速的破裂，其釋放之能量以暫態彈性波方式由破裂點向外傳遞，破裂的規模大小不一，有些如金屬內部小量的錯動或大如結構體的破裂，上述現象在地質相關研究方面稱為微震（Micro-seismic）[2]，實際上地震亦為AE的一種形式。早期人們就發現材料AE的特性，另如劣級陶瓷品在冷卻過程發出破裂的聲音、古代帆船桅木因受力過大在斷裂前發出的聲響、錫金屬變形產生的尖銳高音等，累積的經驗顯示破裂的聲音與材料變形破壞有相當程度的關聯[3]。初期的AE研究主要用於了解金屬材料變形過程，後來逐漸擴及其他材料及結構的應用。

材料AE特性可用於瞭解材料或結構物內部破壞情形及破壞源定位，以評估其強度或內部破壞範圍，作為修補的參考。一般的做法是在材料或結構物的周圍裝設AE感測器（可能是加速度計、壓力計、壓電材料等），在受外力作用下，持續記錄波訊，以瞭解內部破裂發生時機、規模及範圍，圖一為AE監測示意圖。

一般而言，AE訊號能量不大，傳遞距離有限，故在未知破裂源可能位置條件下，監測工作需廣泛地裝設較多感測器，方能完整蒐錄有效資料，並根據各感測器記錄訊號的時間差，進行破裂源距離的估算，最終求得破裂源位置[4] [5]。AE監測方式最常應用於偵測金屬材料破裂位置，如油槽、壓力槽等滲漏位置偵測、航空器的金屬疲勞、運轉中馬達[6]、混凝土結構物的監測[7]、機器及電氣設備監測及複合材料強度試驗等。惟AE係監測破裂持續的發生及過程，如果材料未受外力作用，則無AE效應，故為一種被動（Passive）的試驗方法。橋梁預力結構的破壞發生及過程產生大量AE現象，故可藉由持續AE監測，提供橋梁安全的預警。

事件計數係計算單位時間內AE訊號較明顯波峰出現的次數，此參數已經證明與材料受力造成之破裂有關，故主要用於了解材料破裂程度及範圍。計算的方式係視AE訊號的波峰強度（電壓）大於門檻值（Threshold）即為一次計數（Count或Hit）。由於應用目的與材料不同，門檻值的設定無一定標準，甚至同一應用案例，不同感測器也有各自相異的門檻值，故無法定義參數與破裂程度之絕對關係。圖二為既有橋梁預力梁AE監測資料，橫軸為時間，單位為秒，縱軸為單位時間內之計數。AE感測器係裝設於預力梁中心點附近，圖中顯示兩處明顯尖峰值，其時間點恰為重型卡車通過該預力梁中心位置，故應係預力梁中心位置，混凝土表面出現微破裂形成[8]。

材料受力破壞的過程一般而言可分為三階段，初始階段形成肉眼看不見的微小裂隙（Microcrack），然後發展成為可視的裂縫（Macrocrack），最終綜合形成較嚴重的破損（Rupture）[9]。所以如果可以了解破壞過程裂縫成長的特性，並發現其規律性，則可以採用AE監測方式，在材料發生嚴重破壞前發出警訊。這個概念在地震學已被大量應用於比較不同地質區域大地震發生的可能性，並建立了經驗關係式，稱為

Gutenberg-Richter Magnitude-Frequency Relationship，參見公式一。該關係式統計某特定地區在某時間範圍內，各大小規模（ m ）地震出現的次數（ N ），兩者呈線性關係，而 b 值即為大小規模地震出現的比例， b 值愈大表示該地區出現大地震的機率愈低。

$$\text{Log } N = A - b m \dots\dots\dots \text{ (公式一)}$$

相同的概念應用於 AE 方法，可以將 AE 訊號的振幅視為公式一中的地震規模。圖三為上述關係式之說明[10]，橫軸為 AE 訊號振幅，縱軸為該大小振幅的事件計數，若 b 值較小時，表示較大的振幅發生次數較多，若 b 值較大時，表示較大的振幅較少發生，也就是暗示較嚴重的破損發生機會較低。國外學者曾係採用小尺寸預力梁進行重複載重試驗，並持續在加載過程監測 AE 訊號。其成果指出 b 值的大小與裂縫成長有關，當 b 值大於 1.7 時，大多為微小裂隙的生成，當 b 值小於 1.2 時，即出現許多明顯裂縫[11]。另實際橋墩破壞監測應用案例資料顯示不同的試驗結果，對於狀況較差的橋墩而言， b 值約為 0.05，而外觀相當完整的橋墩 b 值分別約為 0.06 至 0.1 間[10]。

三、混凝土模型試驗

本研究採用兩組德國 Vallen 公司的 VS150 型共振型感測器（共振頻率為 150kHz）作為 AE 訊號感測，並以自製夾具將感測器固定於試體表面適當位置，再以高品質訊號線連接前置放大器與記讀電腦，其中數位採樣率為 800kHz，訊號最大輸入電壓為 100mV，照片一為試驗布置狀況。荷重設備為 200ton 油壓式壓力機，壓力機荷重方式採應力控制，應力速率設定為 2kgf/cm²/sec，荷重速率相當於 450kgf/sec，預估需時 175 秒累積應力到達混凝土試體設計強度（ $f_c' = 350\text{kgf/cm}^2$ ）。本油壓式壓力機操作方式無法以人為方式調整上下機軸位置，故試驗前壓力機無法接觸試體，上機軸距離試體上方金屬墊片尚有空隙。壓力機啟動後，載台直接上升，約需十數秒時間才能完全接觸試體，而接觸瞬時應力上升，方啟動荷重記錄。故為求完整地記錄 AE 資料，試驗開始先行啟動 AE 記讀，並記錄壓力機接觸時間，作為荷重記錄之零時，以利最終應力資料之比對，最大試驗荷重約 73ton，相當於試體受壓應力為 414kgf/cm²。

本研究共完成三組混凝土試體壓縮試驗，試驗參數如表一所示，混凝土試體形式均為圓柱體，尺寸為高 30cm、直徑 15cm。前兩組試驗為單向荷重（Monotonic Loading），第三組試驗為反覆荷重（Cyclic Loading）方式，分別進行試體加壓及全程 AE 訊號監測。

四、資料分析結果

4.1 AE 紀錄

圖四為第一組試體（AE-1）壓縮破壞試驗五筆不同時段的 AE 原始紀錄，左上角數字為當時壓力機應力，當壓力機初接觸試體時，原始記錄即顯示有數量極多的高頻暫態

波形訊號，而此類訊號在其他應力階段也常見，出現的時機並無任何規律性，大致而言每秒的明顯 AE 事件數量均在數十處以上，事件延時約在 0.1 至 5ms 間。圖五為五筆資料之光譜圖，各圖中均出現類似線形與團狀圖形，團狀圖形顯示訊號低頻能量較高，故事件延時較長。試驗前期出現較多的團狀圖形，推估試驗初期記錄 AE 事件含較多低頻訊號，而此特性可能與試驗前期壓力機撞擊試體造成內部較嚴重破裂有關。

圖六為荷重試驗 AE 紀錄最大電壓歷時資料。橫軸為 AE 記讀時間，縱軸為電壓，以對數表示。試驗荷重約在 20 秒開始，此時壓力機接觸試體時調整接觸面，故荷重速率有些微變化，造成訊號電壓呈現不規則變化，數秒後荷重速率即保持定值。試驗前原始記錄最大電壓多為 0.04mV，應為背景雜訊，荷重開始後最大電壓陡升至 1mV 以上，且在短時間內多保持為高電壓，顯示此時段內含數量許多的明顯 AE 訊號。隨即最大電壓在 0.3 至 50mV 間變化，反映試體內無規則破壞產生許多大能量的 AE 訊號。接近試體破壞階段，最大電壓達 80mV，且記錄中的 AE 訊號電壓多大於 1mV 以上。試驗結束後，記錄中最大電壓快速降低，惟仍有局部較大電壓出現，表示明顯的 AE 訊號仍持續發生。大致上而言，AE 訊號的電壓並未隨應力的累積而有明顯的變化，各大小電壓 AE 訊號仍為隨機發生，故相當難以單一 AE 事件的電壓研判試體受力或破壞的狀況。惟單位時間內的 AE 訊號電壓在接近試體破壞時明顯地提升，此點或可作為材料破壞指標。

4.2 AE 訊號特性

圖七為第二組試體 (AE-2) 壓縮破壞試驗資料的分析結果，共包含三圖，上方為試驗後期局部歷時記錄，長度為 0.1 秒，中間為對應的光譜圖，橫軸為時間，縱軸為頻率，單位為 kHz，自下至上為 0 至 400kHz，最下方為兩筆 AE 訊號的傅立葉頻譜。

歷時記錄顯示有多筆明顯 AE 訊號，其中標示為 Signal-A 之電壓最大，但高電壓持續時間相當短暫，與鄰近其他 AE 訊號相似。標示為 Signal-B 之電壓次之，但高電壓持續時間較長，該訊號前後也有數筆類似訊號。光譜圖中，兩類訊號的特性區分更為明顯，Signal-A 呈現狹長線形特性，時間寬度相當小而頻率範圍較大，約自 20 至 400kHz，圖中另有 6 處以上相似特徵的圖形，惟頻率範圍較小，多集中在 150 kHz，各圖形出現的時間位置恰為歷時記錄中 AE 訊號起始時間。而 Signal-B 則為團狀圖形，圖中約出現 6 處，其圖形寬度與 AE 訊號延時相當。另光譜圖中在頻率約 150kHz 附近出現一致性水平明顯訊號，係感測器自振放大造成。

頻率分析顯示兩類訊號在 60kHz 以上之振幅分布相當類似，且在 150kHz 處均有極大值(感測器放大效應)。惟因 Signal-A 電壓較大，故振幅較大。而 Signal-B 在小於 40kHz 以下之振幅則遠大 Signal-A，亦遠大於高頻振幅。基本上，Signal-A 若修正感測器放大效應，則各頻率振幅大小相當接近，表示進入感測器前的 AE 訊號為寬頻訊號，在時域上的表現為延時相當小的單一脈衝。而 Signal-B 頻譜的階梯式變化則類似地震波訊號頻譜。在地震學研究中，地震波頻譜因地震大小而有差別，一般而言，低頻能量大於高頻能量，且在特殊頻率位置有明顯的變化，此頻率被定義為邊角頻率 (Corner Frequency)，地震學界對於上述現象出多種說法，其中之一認為大地震震源破裂範圍較大，若可視為許多小面積破裂之疊加，則產生的波源則為許多脈衝的疊加，結果造成較長的脈衝延

時，故含較多低頻率能量。另一解釋為混凝土為複合材料，粗細骨材的強度不盡相同，材料破壞時產生的音射訊號也可能有異，惟此點仍待進一步研究確認。

4.3 事件計數與應力

圖八為 AE 事件計數 (Event Count) 結果與試驗應力的典型歷時資料，其中橫軸為時間，事件計數計算方法係於每一秒內，計算電壓大於門檻值的訊號波峰次數。因壓力機與試體的瞬時碰撞造成局部損傷產生數量較多的 AE 事件，故試驗初期事件計數結果明顯較大，當撞擊效應逐漸平息後，事件計數結果漸趨穩定，採適當門檻值之計數結果大致在 2,000 至 3,000 次間，而隨著應力增加，採非零電壓作為門檻值之事件計數似乎有增大的趨勢，但增幅並不明顯，直到應力趨近 300kgf/cm^2 時 (約為試體強度的 85%)，事件計數才隨應力累積而急速增加，最終在試體完全破壞前，事件計數增至 100,000 次以上。

4.4 尖峰次數分布與應力

本研究另採類似 b 值處理方法，計算各階電壓範圍的訊號尖峰次數。圖九為第一組試驗五階不同應力時段下的尖峰次數分布，資料分布大致顯示尖峰次數隨電壓增加而一致性地、明顯地減少，兩者的對數值有明顯的線性關係。圖中各應力階段分析結果均有相似的線性分布關係，表示迴歸斜率相近 (約為 2.48 至 2.57)，而線性分布呈現平移的現象，尤其在試驗後期，當應力接近試體強度時，統計尖峰次數的平移現象更為明顯。此現象反映試驗後期有數量較多且能量較大的 AE 訊號，故各電壓區間之尖峰次數一致性地增加。

4.5 重複荷重試驗

第三組試體 (AE-3) 採反覆荷重試驗方式，探討 AE 訊號隨應力變化的特性。反覆荷重試驗共分四階段，第一階段荷重從 0 直接加載至 20ton 後完全卸載，第二階段荷重至 40ton 後完全卸載，第三階段則為 60ton，最後階段則加載至試體完全破壞為止，每階試驗對應之最大應力分別為 113kgf/cm^2 、 226kgf/cm^2 、 338kgf/cm^2 與 408kgf/cm^2 。圖十為四階段荷重的事件計數結果，橫軸為應力，縱軸為事件計數，以下說明分析結果：

1. 第一階荷重事件計數在試驗初始階段有較大值，局部時段超出 5,000 次，此係油壓機撞擊效應造成。此效應緩和後，事件計數緩慢降至 700 次，並保持穩定，最終又因油壓機突然停止造成試體回彈，故事件計數又迅速增至 2,000 次以上。本階荷重試驗最大應力為 113kgf/cm^2 。
2. 第二階荷重事件計數分布狀況大致與上述類似，惟衝擊效應較緩，初始階段之事件計數在 50 次以下，且維持一段時間，一直到應力累積超出 75kgf/cm^2 以後，事件計數才迅速增加，而在應力約 130kgf/cm^2 時，事件計數已增至 700 次，並近似保持定值，隨應力累積之增幅較不明顯。上述事件計數急劇變化區間之平均應力近似前階荷重試驗最大應力，而本階荷重試驗最大應力為 226kgf/cm^2 。
3. 第三階荷重衝擊效應又較明顯，試驗初始事件計數超出 500 次，惟此數值迅速下

降至100次左右，且維持到應力累積超出200kgf/cm²以後，事件計數才迅速增加，而在應力約270kgf/cm²時，事件計數已增至700次以上，並近似保持定值，隨應力累積之增幅較不明顯。上述事件計數急劇變化區間之平均應力近似前階荷重試驗最大應力，而本階荷重試驗最大應力為339 kgf/cm²。

4. 第四階荷重衝擊效應較緩，試驗初始事件計數約100次，惟此數值迅速下降至20次左右，到應力累積超出280kgf/cm²以後，事件計數自100次迅速增加至2,000次，此時應力約350 kgf/cm²時，而事件計數於360kgf/cm²時再迅速變大，在試體破壞時達到90,000次以上。上述第一處事件計數急劇變化區間之平均應力約為315kgf/cm²，略小於前階荷重試驗最大應力。
5. 本案例分析結果顯示事件計數與試體歷史應力有極大關係，若忽略本試驗油壓機衝擊效應，當試體所受應力在歷史應力以下時，事件計數多在100次以下，當應力接近歷史應力時，事件計數迅速增加，且明顯變大時的應力會提前出現。當應力大於歷史應力時，事件計數緩慢地隨應力增加，而在接近試體破壞時，事件計數達到70,000次以上。

圖十一為第四階試驗電壓尖峰次數分布圖，分析結果包含六筆資料，各筆資料對應之應力為100、200、300、339、400及408kgf/cm²。各階應力資料在電壓為0.02mV的尖峰次數均為200,000次左右，表示真實AE訊號數量較少，原始記錄中多為雜訊，惟最末筆資料尖峰次數明顯較小，約僅20,000次，表示試驗末期真實AE訊號數量大幅增加。除此之外，大致上各電壓尖峰次數隨應力累積而一致性地增加，其中虛線為應力339 kgf/cm²資料之線性迴歸結果，虛線斜率約為2.66（取迴歸斜率的絕對值），在電壓為0.01mV時，尖峰次數約為200次，此應力為前階試驗之最大應力，大致上在此虛線以下，各電壓尖峰次數較少，而此虛線以上，各電壓尖峰次數明顯較多，且試驗末期電壓約0.1mV附近均超出1,000次。

五、結論與建議

1. 根據本研究混凝土試體AE試驗結果，因AE訊號多為短時脈衝訊號，在時域資料上易受雜訊干擾，不易辨認，比較簡單且有效的方法是採頻率分析。一般而言，AE訊號頻譜在感測器共振頻率有振幅極大值，另於低頻處亦有局部極大值。
2. 本研究嘗試計算試驗過程AE訊號的最大電壓，並與荷重進行關聯研究，惟分析結果顯示AE訊號明顯電壓為隨機出現，與荷重並無明顯關係。惟多數案例資料顯示當荷重累積到達最大荷重的80%以上時，AE訊號的最大電壓隨荷重累積而明顯增加，最終一致性地到達飽和電壓。
3. 事件計數結果與試驗荷重與荷重速率的變化均有關。當荷重速率有明顯增加時，事件計數的增加相當快速，例如壓力機之衝擊效應；而當荷重速率保持穩定時，事件計數結果也大致維持不變。在荷重累積到達最大荷重的85%以上時，事件計數隨荷重累積而明顯增加。另混凝土材料亦具凱瑟效應，當外加應力大於歷史應力時，事件計數明顯地增加。綜合上述兩點結論，事件計數並無法作為AE事件計數量化的

絕對指標，僅能針對相同目標物進行持續性的觀察，並藉由其明顯的變化推估目標物受力或破損狀況。

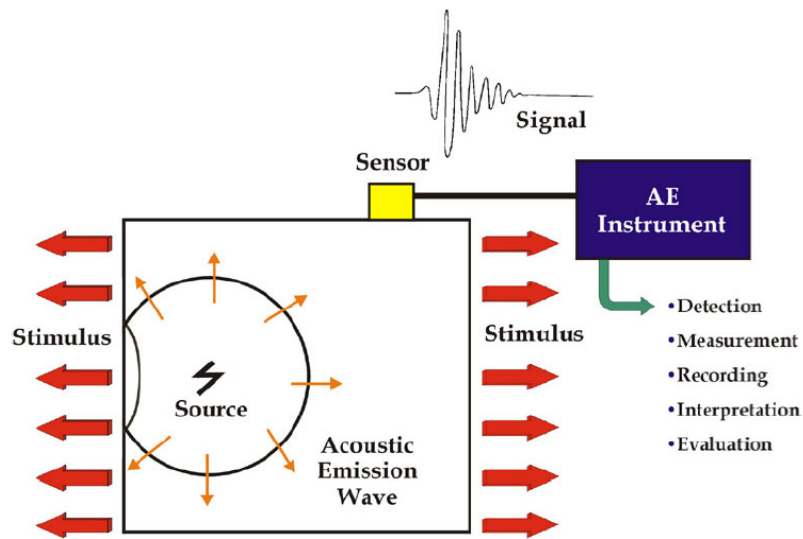
4. 本研究另採尖峰次數分布方法（類似b值方法），量化AE事件，並與試驗荷重進行關聯研究。大體而言，試體受持續累積的荷重過程，各電壓的尖峰次數均有其下限，且此下限與試驗荷重速率、荷重速率的變化均無關係，唯不同試體破壞型式具相異的尖峰次數下限。例如壓縮破壞試驗分析結果，當電壓為0.1mV時，此尖峰次數下限約為200。此尖峰次數下限意義隱含凱瑟效應，也就是說，當外加應力較大或大於歷史應力時，AE訊號的尖峰次數均高於此下限，也就是反映材料內部再次破裂，而此時AE事件較為嚴重。
5. 本階段混凝土破壞試驗係針對較小的混凝土模型，初步分析顯示AE資料統計結果與外加荷重與內部破壞研究有相當緊密的關係。未來建議製作較大尺寸物理模型進行破壞試驗，以了解尺寸效應及不同破壞方式等因素對於AE訊號的影響，如此方可使AE監測方法更為實際可用於真實尺寸的預力梁結構健康監測。

六、參考文獻

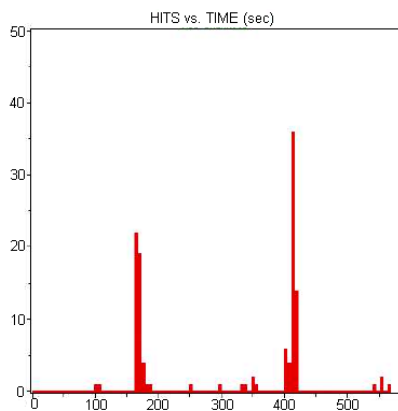
- (1)Kumalasari W., and Fabian C. H., Analysis of Recent Bridge Failures in the United States, Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE), Volume 17, Issue 3, pp. 144-150, 2003
- (2)HARDY, H. R. Jr., Acoustic Emission / Microseismic Activity, A.A.BALKEMA publishers, pp.281, 2003
- (3)Bray, D. E., and McBride, D., Nondestructive Testing Techniques, John Wiley & Sons Inc., pp.765. ,1992
- (4)Schechinger, B., and Vogel. T., Acoustic Emission for Monitoring Damage Accumulation in Reinforced Concrete Structures, EWGAE 2004, pp.107-114. ,2004
- (5)David, W. P., Localization of Noise Sources in Large Structures Using AE, EWAGE 2004, pp.219-224. ,2004
- (6)林楨中、陳彥翰，營造工程音波監測防災監控技術研究-混凝土音洩特性探討，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告，pp.127, 2004。
- (7)Koppel, S., and Grosse, C., Advanced Acoustic Emission Techniques for Failure Analysis in Concrete, 網站資料, 2005。
- (8)Golaski, L., Gebski, P., and Ono, K., Diagnostics of Reinforced Concrete Bridges by Acoustic Emission, J. Acoustic Emission, Vol. 20, pp.83-98., 2002
- (9) Barbara, S., and Thomas, V., Acoustic Emission for Monitoring Damage Accumulation in Reinforced Concrete Structures”, EWGAE 2004, Lecture 8, pp.107-114, 2004.

(10) Tomoki Shiotani, Yasuhiro Nakanishi, Xiu Luo and Hiroshi Haya, Damage Assessment in Railway Sub-Structures Deteriorated Using AE Technique, EWGAE 2004, pp.225-232, 2004.

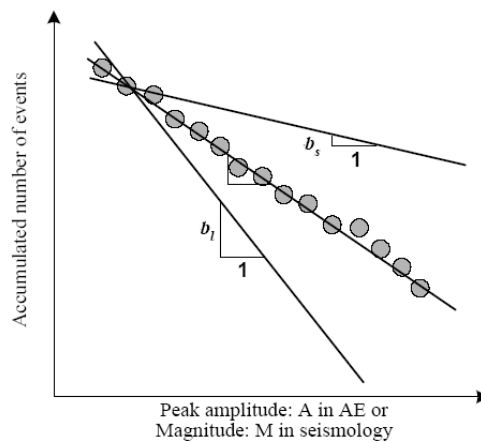
(11) Ing, S. Colombo, I. G. Main, and M. C. Forde, Assessing Damage of Reinforced Concrete Beam Using b-value Analysis of Acoustic Emission Signals, Journal of Materials in Civil Engineering, May 2003, PP. 280-286, 2003.



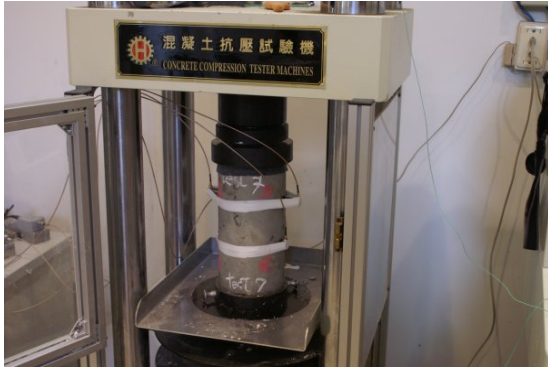
圖一 AE監測示意圖



圖二 AE事件計數範例



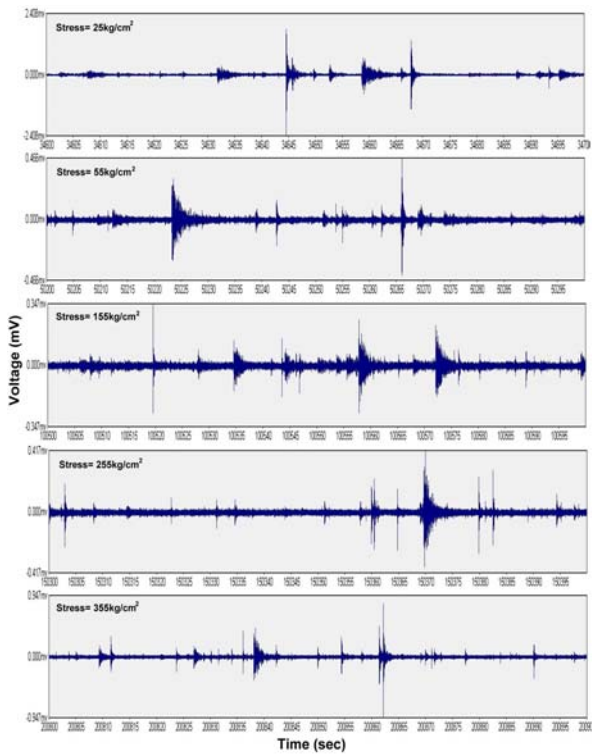
圖三 理論AE事件計數頻率圖



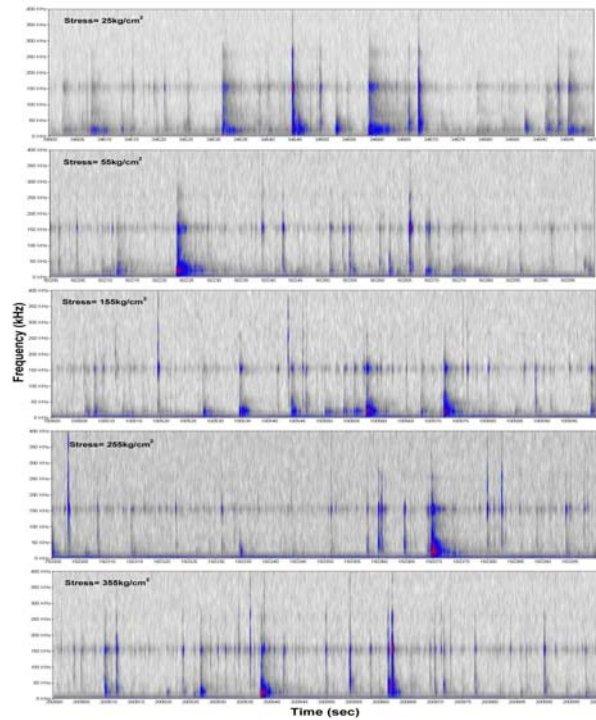
照片一 壓縮破壞試驗

表一 試驗參數總表

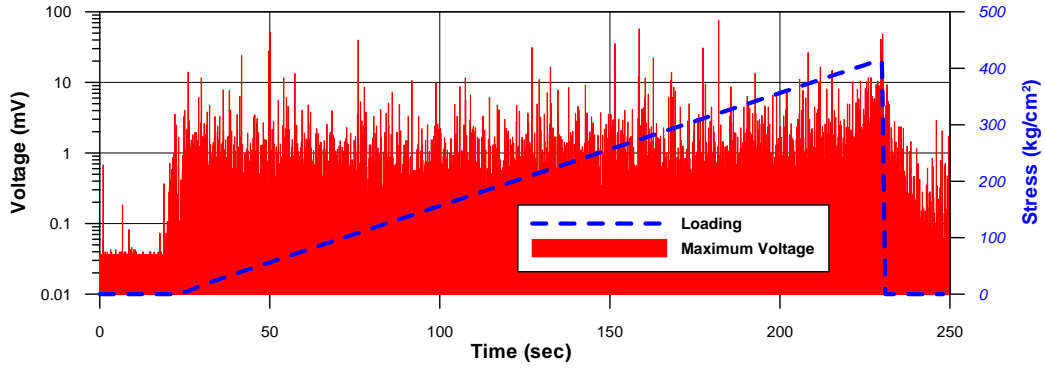
試體編號	荷重方式	試體設計強度(kgf/cm ²)	破壞強度(kgf/cm ²)
AE-1	單向荷重0~75ton	350	414
AE-2	單向荷重0~75 ton	350	407
AE-3	反覆荷重 1st Cycle: 0~20 ton 2nd Cycle:0~40 ton 3rd Cycle:0~60 ton 4th Cycle:0~75 ton	350	408



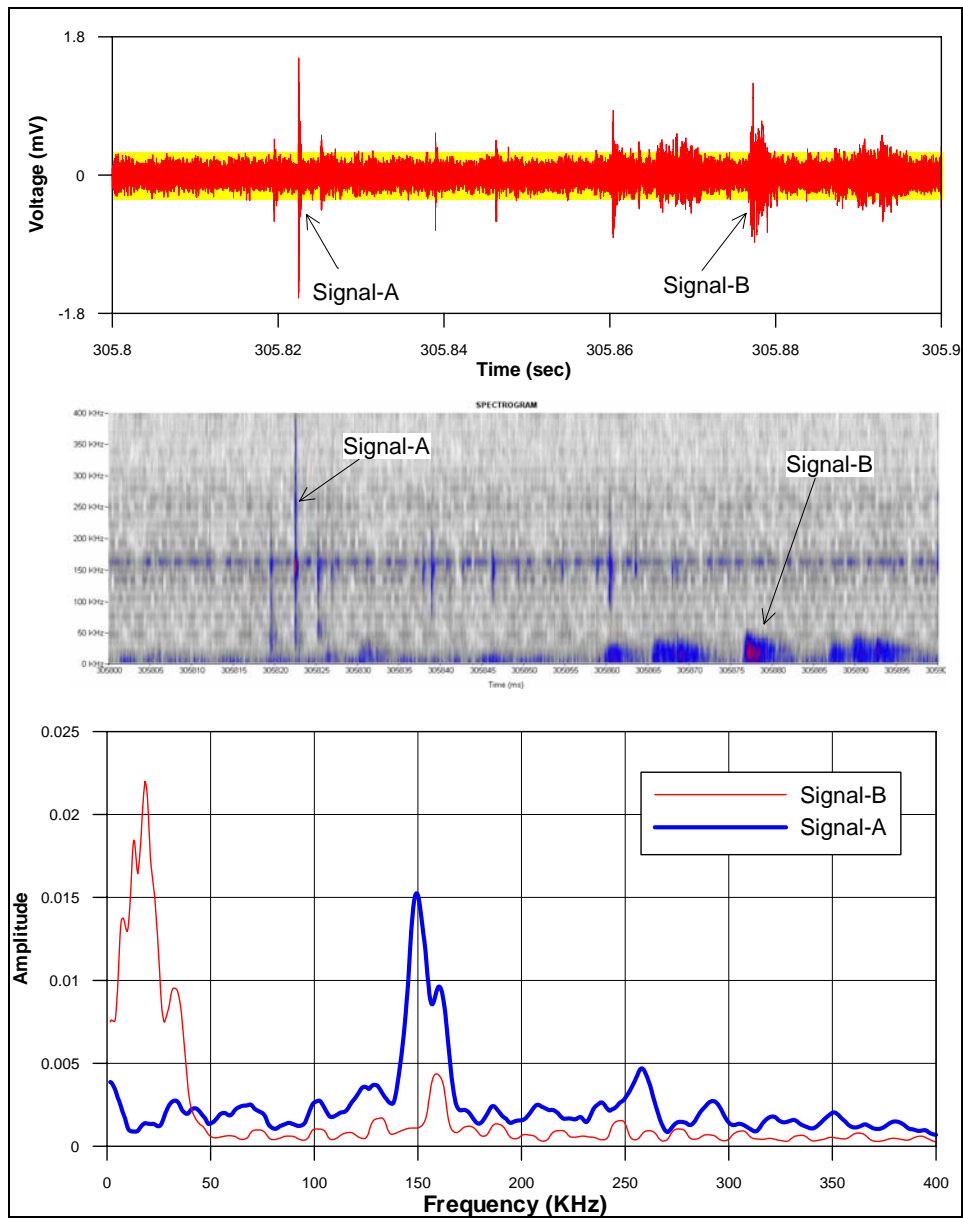
圖四 壓縮破壞試驗AE紀錄



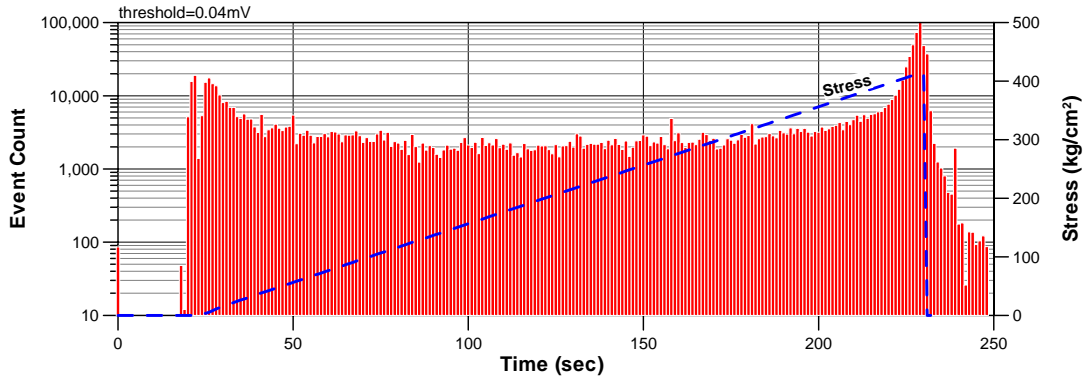
圖五 光譜圖



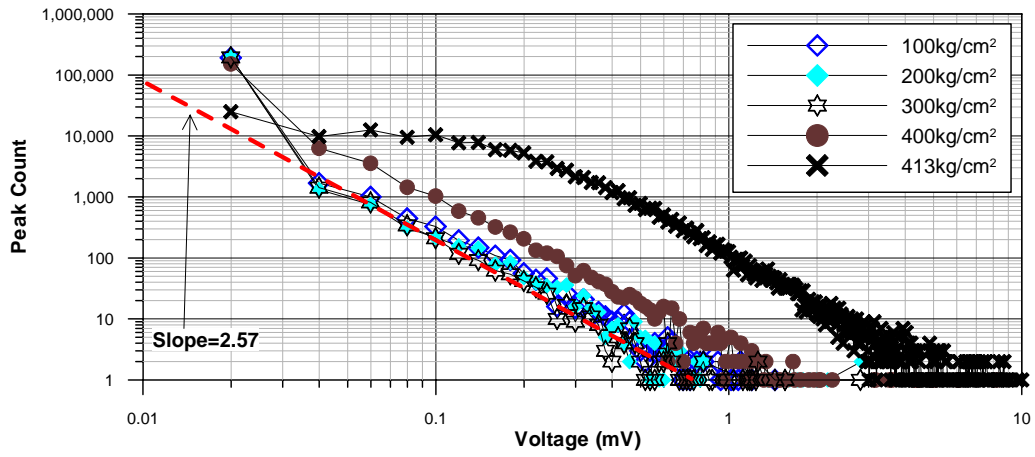
圖六 AE紀錄最大電壓與荷重歷時紀錄



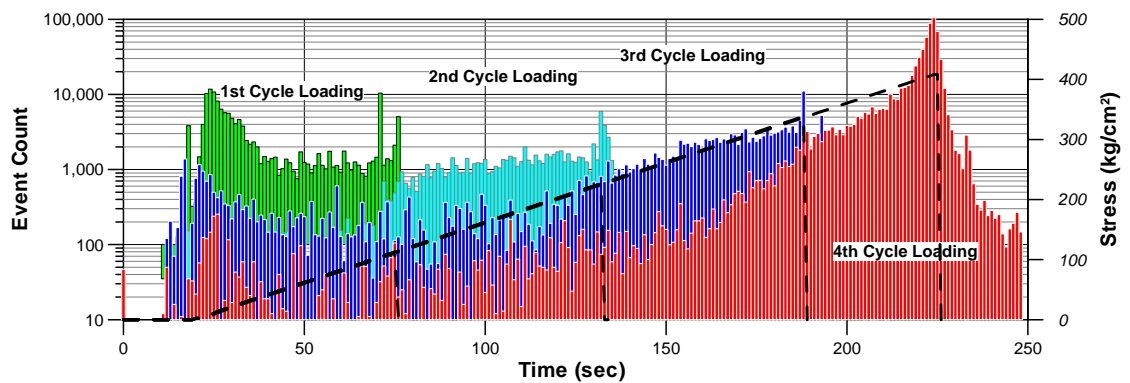
圖七 AE訊號特性



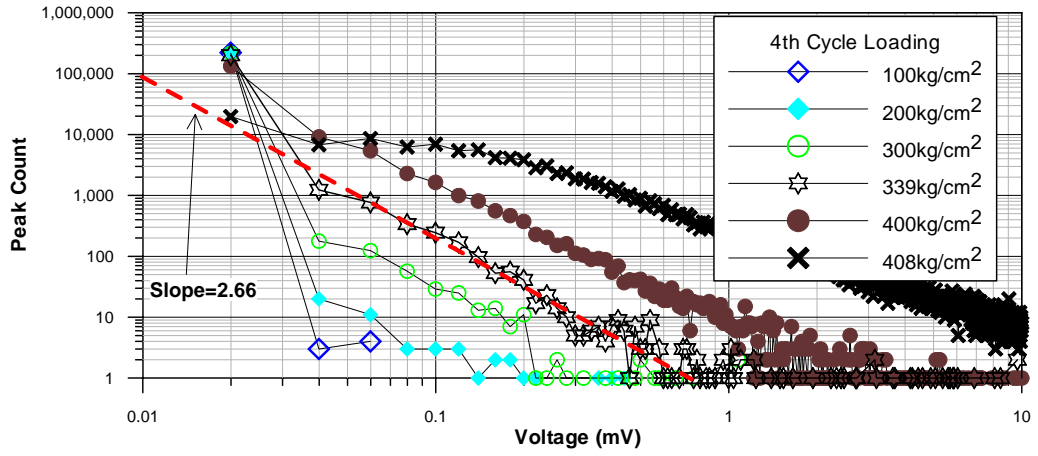
圖八 AE事件計數與應力關係圖



圖九 AE訊號電壓對應尖峰次數分布關係圖



圖十 反覆荷重試驗AE事件計數與應力關係圖



圖十一 反覆荷重試驗AE訊號電壓對應尖峰次數分布關係圖