

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

音聲辨識系統偵測外包裝容器品質
方法之建立

**The Study on the Quality Assurance System for Concrete
Container by Acoustic Emission Identification Technique**

計畫編號：992001INER016

受委託機關（構）：國立台灣科技大學

計畫主持人：黃兆龍

核研所聯絡人員：張清土、陳鈺沛

聯絡電話：(02)2737-6575

E-mail address: cmrl@seed.net.tw

報告日期：99年12月15日

中文摘要

本計畫目的係針對環境場溫度變化(30、60、90°C)下，利用音聲技術(AE, Acoustic Emission)探求承裝容器與障蔽材料微裂縫初始發生時機點與內部損傷程度，作為整體影響性評估。本計畫參考HIC配比設計，結果顯示水膠比越低時，抗壓強度、長度變化量、電阻、超音波、氣離子滲透等硬固性質與耐久性皆越佳。利用AE技術偵測混凝土受到環境溫度影響下之結果顯示，當環境溫度為60°C時，水膠比越高，發生AE訊號的時機點會越早出現，亦即品質越差塑性裂縫產生越高；漿體用量越多，AE訊號發生時間越延緩，也就是會發生自體收縮及乾縮裂縫；在相同配比下，隨著環境溫度越高，AE訊號發生也會提前，所以溫度越高裂縫越早發生。經由螢光探傷法之輔助可知，不同配比的混凝土在環境溫度作用下，裂縫發生型態會產生影響。本研究顯現AE技術可以有效偵測裂縫產生的時機點，未來可以用來做即時性的混凝土品質偵測，以提供設計者和相關工程安全性及耐久性之參考，維持混凝土長期品質和確保低放射性廢棄物的儲置安全性。

關鍵字：音聲技術、高完整性承裝容器、微裂縫、環境溫度、即時偵測。

Abstract

This project mainly investigates the structure integrity of High Integrated Container (HIC) by using Acoustic Emission (AE) technology to explore the probability of micro crack initiation under the in situ environmental temperature changes. The results show the lower the water-binder ratio (w/b), the higher the compressive strength, the lower the length change, the higher the electrical resistance, the lower the chloride penetration and the higher the quality and durability of hardened concrete specimen. AE can detect the signal of HIC under ambient temperature. At 60°C temperature, the higher the w/b the earlier the AE signal occurrence, the worse the quality and the earlier the plastic shrinkage crack happening. The higher the paste volume the later the AE signal occurrence. Under high ambient temperature, AE signal occurrence time will be delayed and it indicates the autogenous shrinkage and drying shrinkage cracks are liable to happen. With the same mixture, with the higher the ambient temperature, the earlier the AE signal occurrence, the earlier the crack occurrence. By the aid of fluorescence detection technique it indicates the various concrete quality under environmental temperature change the image of crack pattern can be viewed. From this study it shows AE technology can be used to detect the crack initiation time simultaneously of fresh concrete during hydration. In the future, AE can be used for real-time crack detection in order to provide the designer sufficient information of quality and durability of concrete structure to ensure the concrete barrier long-term safety for the storage of low and intermediate level radioactive waste.

Keywords: High-Integrated Container (HIC), Acoustic Emission (AE), Micro Cracks, Ambient Temperature, Real-Time Crack Detection

總目錄

中文摘要	A
Abstract	B
總目錄	I
圖目錄	V
表目錄	VIII
壹、 計畫緣起與目的	1
一、研究動機與目的	1
二、研究方法	3
三、研究內容	4
貳、 文獻回顧	7
一、 混凝土裂縫成因探討	7
(一) 混凝土體積穩定性	9
(二) 溫度對混凝土之影響	10
二、聲射技術	13
(一) 聲射技術之發展	13
(二) 聲射定位原理	14
(三) 聲射訊號參數	15
(四) 聲射訊號波形	16

(五) 聲射設備	16
(六) 校正試驗	16
(七) 聲射定位準則	17
三、高完整性承裝容器 (High integrate container, HIC) ...	19
參、 研究方法與過程	34
一、 試驗計畫	34
(一) 研究範圍與執行方式	34
(二) 環境場設置	36
二、 試驗材料	37
(一) 卜特蘭水泥	37
(二) 爐石粉及飛灰	37
(三) 矽灰	37
(四) 粗細粒料	37
(五) 強塑劑(SP)	38
(六) 拌和水	38
(七) 試體大小	38
三、 混凝土配比設計	38
(一) ACI 配比設計法	38
(二) 黃氏富勒緻密配比比設計法(HFDMDA)	39

四、 試驗設備	40
(一) 混凝土性質試驗	40
(二) 音聲技術設備	40
五、 試驗設備架設情形	41
肆、 試驗結果分析	55
一、 水化熱	55
二、 初終凝時間	58
三、 抗壓強度	59
四、 長度變化量	60
五、 混凝土超音波	61
六、 混凝土表面電阻	62
七、 混凝土氯離子滲透	63
八、 混凝土吸水率試驗	64
九、 硫酸鹽侵蝕	65
十、 音聲(AE)技術於混凝土新拌時之驗證	67
(一) 不同環境溫度影響下	67
(二) 不同水膠比之影響	69
(三) 不同漿體用量之影響	71
(四) 不同配比設計方法之影響	72

十一、 螢光漆探傷法	73
(一) 不同溫度場之影響	74
(二) 不同漿體用量影響	74
(三) 不同漿體用量影響	75
(四) 不同配比設計方法之影響	75
(五) 比較 HIC 配比	76
伍、 結論與建議	98
一、 結論	98
二、 建議	99
(一) 材料	99
(二) 儀器	100
陸、 參考文獻	101

圖目錄

圖 1-1 音聲技術試驗裝置示意圖	5
圖 2-1 混凝土劣化之物理基因示意圖	21
圖 2-2 混凝土劣化之化學基因示意圖	21
圖 2-3 混凝土裂縫產生要因	22
圖 2-4 混凝土溫度和大氣狀況混凝土表面水份蒸發量估計圖	22
圖 2-5 混凝土收縮與水化反應之關係	23
圖 2-6 典型塑性裂縫圖	23
圖 2-7 卜特蘭水泥漿體水份喪失與乾燥收縮階段的關係圖	23
圖 2-8 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水化程度與溫度之關係	24
圖 2-9 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水化程度與溫度之關係	24
圖 2-10 低壓蒸汽養護對早期強度發展的影響	25
圖 2-11 定溫養護 1 天和 28 天強度	25
圖 2-12 普通混凝土在不同溫度下之強度發展	26
圖 2-13 爐石混凝土在不同溫度下之強度發展	26
圖 2-14 矽灰混凝土在不同溫度下之強度發展	27
圖 2-15 $W/C=0.3$ 20%之矽灰混凝土溫度與自體變形之關係	27
圖 2-16 $W/C=0.25$ 自體收縮與溫度之關係	27
圖 2-17 化學收縮與溫度之關係	28

圖 2-18 溫度與整體裂縫面積之關係.....	28
圖 2-19 溫度與塑性收縮之關係.....	28
圖 2-20 音聲波傳定位概念圖.....	29
圖 2-22 聲射定位法則之到達時間差法之三為空間定位.....	30
圖 2-23 音射訊號參數示意圖.....	30
圖 2-24 音聲訊號依波型之分類(a)突發型 (b)連續型.....	31
圖 2-25 ASTM E976-84 筆蕊折段法校正之用.....	31
圖 2-26 音聲定位準則之到達時間差法之二維平面定位.....	31
圖 2-27 高性能鋼纖維混凝土高完整性承裝容器.....	32
圖 2-28 高完整性承裝容器混凝土品質驗證-硫酸鹽侵蝕.....	32
圖 2-29 高完整性承裝容器原型墜落測試.....	33
圖 3-1 各部分工作項目與流程圖.....	51
圖 3-2 第一部分流程.....	52
圖 3-3 第二部分流程.....	52
圖 3-4 混凝土溫差與裂縫關係.....	53
圖 3-5 養護溫度控制階段流程圖.....	53
圖 3-6 飽和鹽標準相對濕度.....	53
圖 3-7 混凝土於新拌時 AE 與水化熱儀器架設.....	54
圖 4-1 混凝土於絕熱狀態下之水化溫度.....	81

圖 4-2 混凝土於各環境溫度下之水化溫度	82
圖 4-3 混凝土於各環境溫度下之凝結時間	83
圖 4-4 混凝土各齡期之強度	84
圖 4-5 混凝土各齡期之長度變化量	85
圖 4-6 混凝土各齡期之超音波波速	86
圖 4-7 混凝土各齡期之電阻值	87
圖 4-8 混凝土 91 天之電滲值	88
圖 4-9 混凝土之硫酸鹽侵蝕重量改變情形	89
圖 4-10 混凝土受硫酸鹽侵蝕實際情形(一)	89
圖 4-11 混凝土受硫酸鹽侵蝕實際情形(二)	90
圖 4-12 ED2405 於不同環境溫度下 AE 訊號發生時間與溫度關係圖	91
圖 4-13 各組於環境溫度 60°C 下 AE 訊號發生時間與溫度關係圖 ..	92
圖 4-14 水膠比 0.32 之不同漿體厚度於環境溫度 60°C 下 AE 訊號發生 時間與溫度關係圖	93
圖 4-15 水膠比 0.40 之不同設計方式於環境溫度 60°C 下 AE 訊號發生 時間與溫度關係圖	94
圖 4-16 以螢光漆探傷法觀察各配別之微裂縫(一)	95
圖 4-17 以螢光漆探傷法觀察各配別之微裂縫(二)	96
圖 4-18 以螢光漆探傷法 ED2405 與 HIC 配比之裂縫型態	97

表目錄

表 2-1 國內外近 30 年 AE 研究情形	20
表 3-1 混凝土材料與性質試驗方法與規範	43
表 3-2 混凝土性質試驗設備(一)	44
表 3-3 混凝土性質試驗設備(二)	45
表 3-4 混凝土性質試驗設備(三)	46
表 3-5 環境溫度變數表	47
表 3-6 試驗用卜特蘭水泥、爐石、飛灰之化學成份及物理性質	48
表 3-7 卜作嵐材料粒徑分析與比重結果	49
表 3-8 粗、細粒料基本性質	49
表 3-9 粗、細粒料篩分析結果	49
表 3-10 強塑劑基本性質	49
表 3-11 混凝土配比設計結果一覽表(kg/m ³)	50
表 4-1 常溫絕熱狀態下混凝土水化溫度	78
表 4-2 混凝土各齡期之強度	78
表 4-3 混凝土乾縮值	78
表 4-4 混凝土各齡期超音波波速	79
表 4-5 混凝土各齡期之電阻值	79
表 4-6 混凝土各齡期之氯離子滲透值	79

表 4-7 混凝土各齡期之吸水率	80
表 4-8 ED2405 於不同溫度場下 AE 訊號產生時間點.....	80
表 4-9 混凝土各組於 60°C 溫度場下 AE 訊號產生時間點	80

壹、計畫緣起與目的

一、研究動機與目的

低放射性廢棄物處置一直為國內外相當重視的環保議題，目前此類廢棄物主要以鍍鋅鋼桶承裝與儲放；然而，隨著時間增長，由於受到外在環境危害因子侵入，加速桶體受侵蝕與老化的速度，致使承裝容器有破損或放射物外露之問題，因此使安全性受到質疑。在混凝土科技提升之際，有需要以更具耐久性與更抗輻射老化之高性能材料，以保障核能廢料的安全儲存[1]。國內目前已成功利用高性能混凝土製作兼具強度與耐久性之預鑄構件與結構體的成功案例與經驗[2-4]，而本研究團隊於前期計畫中，以數學精算及定性、定量方式[5]，設計高性能鋼纖維混凝土材料，並且研發高完整性承裝容器（High Integrate Container，HIC）[6]，經品質檢測結果顯示，承裝容器材料 28 天之抗壓強度接近 100 MPa；抗彎強度更超過 11 MPa；超音波波速大於 4500m/s 以上之高品質波速[7-9]；表面電阻量測值超過 20 K Ω -cm 不致發生腐蝕之高標準電阻值[10]；硫酸鹽侵蝕經過 25 個週期浸泡，重量損失仍不到 1%，且抗壓強度有再提升之現象，顯示材料並未有任何明顯受侵蝕之現象，具有極佳之抗硫酸鹽侵蝕之能力。另外，經過承裝容器原型墜落測試，並無明顯破壞情形[6]，顯示本研究混凝土符合承裝容器所需之性能。

一般要得知混凝土材料之品質，常利用破壞試驗（如抗壓強度、抗彎強度試驗等），亦或是以非破壞性試驗（如超音波速度測與表面電阻量測等試驗），作為探求和評估混凝土材料品質之方法。然而，此類試驗僅可對於已存在之缺陷作檢測，而無法對於缺陷之形成做即時性的動態監測，更無法對於內部實際破壞機理與破壞點加以得知與量化。

音聲(Acoustic Emission, AE)技術可用於各種材料內部及結構缺陷之即時性動態監測與檢測，其屬於非破壞波傳檢測法之一種，依據ASTM E610-82 對音聲定義：音聲為一材料內部局部能量快速釋放而產生暫態彈性應力波(Transient Elastic Stress Wave)的一種現象。音聲法主要針對為數眾多微小能量釋放的微震裂源(Microseismic Sources)進行探索，其微震裂源即為微小裂縫發生處；同時，在相對較少感應器配備但近於裂源處等條件下，對裂源發生時機之研判與其空間定位之推估[11]，乃至於其微觀之破壞模式。

由於，障蔽工程結構體與低放射性廢棄物承裝容器之建置與儲放時間係為長期性的，甚至為永續性考量。前期計畫所設計之高性能纖維混凝土材料雖具備高強度、高水密性及破裂韌性，然而應用於承裝容器與障蔽材料，其受環境場因素影響後，材料內部缺陷生成情況、品質變異情形，甚至材料破壞行為仍需進一步驗證，以確保其安全性

與長期穩定性。音聲技術可利用於各種材料內部及結構缺陷或裂縫起始與傳播之偵測、材料內部狀態改變之偵測，以及大型構件之缺陷偵測與定位。另外，音聲技術可作即時性之動態監測，且靈敏度高，並可作整體性之檢測。而本計畫目的係針對環境場溫度變化下，利用音聲技術探求承裝容器與障蔽材料微裂縫初始發生時機點與內部損傷程度，另配合一般破壞性試驗與非破壞性檢測之結果相互驗證與說明，並作整體影響性評估，而結果可供未來設計者和相關工程安全性人員參考，以維持混凝土長期品質和確保低放射性廢棄物儲置。

二、研究方法

混凝土結構工程是低放射性廢棄物最終處置的安全環節之一，除了本身強度品質須滿足外，對外需經得起環境溫度的考驗，以落實低放射性核廢料長期安全性貯藏之目標。本計畫針對混凝土承裝容器與障蔽材料，利用微觀非侵入式音聲技術，探求在環境溫度改變下，材料微裂縫生成與內部損傷程度，並輔以一般常見之破壞性試驗與非破壞性檢測加以印證與說明。研究工作項目說明如下：

- (一)承裝容器與障蔽材料設計：此部分依據前期「高完整性承裝容器製程與自動化研究」所設計之材料配比為基準，另設計其他符合承裝容器與障蔽材料強度標準之配比進行對照與比較。

- (二)非侵入式音聲監測技術研發與建置：建立音聲技術檢測硬體設備（如圖 1-1 所示），以及模擬環境場變化設備；另編寫軟體作為檢測結果分析之用。
- (三)材料安全性檢測：以抗壓強度試驗作為材料安全性評估與品質對照比較。
- (四)材料耐久性檢測：以超音波速量測、表面電阻量測、水分吸水試驗、電滲試驗作為材料品質穩定性評估指標，並驗證與說明音聲技術之偵測結果。
- (五)音聲技術環境溫度場變化之材料品質偵測：探求在溫度變化下，承裝容器與障蔽材料內部微裂縫生成、品質變異情形，以及性質相應間之關係。

三、研究內容

本計畫架構可分為文獻收集與參考、混凝土基本性質試驗，以及環境溫度變化之音聲辨識品質驗證三部分。其中，為瞭解混凝土材料受溫度影響而產生之收縮行為所造成之品質變異情形，故特利用音聲辨識系統分別針對材料於新拌和硬固狀態下作即時性的監測和驗證，以充份的掌握混凝土硬化前後內部為裂縫生成和品質變異情形。而本計畫整個實驗架構流程如圖 1-2 所示。

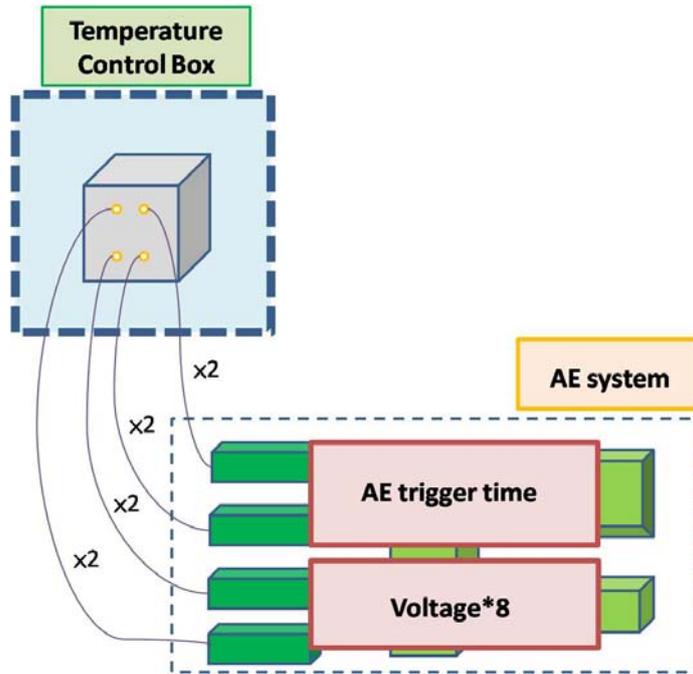


圖 1-1 音聲技術試驗裝置示意圖

貳、 文獻回顧

混凝土品質易隨著配比組成比率、大氣環境、外力作用等諸多原因，使混凝土內部容易生成微裂縫而產生劣化，長期而言對於結構品質將有不利的影響。雖然隨著混凝土礦物摻料的應用與化學摻料科技進步，以及設計方法與設計觀念的轉變，大大的提升混凝土強度品質與內部微結構緻密性，然而為了確保混凝土結構長期穩定性，將環境因素納入考量是有必要的。因此，本研究利用聲射(Acoustic Emission)技術，利用即時性的品質偵測方式，探討混凝土材料受環境溫度變化之影響性與品質變異性。

一、 混凝土裂縫成因探討

混凝土係由卜特蘭水泥、水、粒料及摻料所組成，其組成成分比率及材料相互間影響性，除受到本身內部水化反應影響外，亦可能因外在「物理」及「化學」反應等環境因素，如圖 2-1 及圖 2-2 所示，而導致混凝土結構內部產生微裂縫，乃由於應力集中的現象使得材料內部的微裂縫叢聚及延伸，最終造成品質產生劣化與破壞，因此微裂縫的產生對一個混凝土結構體的安全性與長期耐久性有相當重大的影響。本研究旨在探討混凝土受環境因素(包含大氣環境與施工方式)依環境影響關係，一般可分為下列三項：

1. 濕度

影響乾縮之外在因素最主要為濕度，造成水分反覆進出混凝土，進而產生應力；濕度較低的環境有較大的乾縮量[10]，大部分的乾縮預測模式也都會將相對濕度作為主要評估參數之一

2. 溫度

一般溫度增減除了直接導致體積的熱膨脹與收縮外，溫差會促使混凝土中水分移動而產生變形，但影響有限，有時會忽略不計[31]；然而，在新拌混凝土狀態下，亦或是混凝土長期處在較劇烈之溫度環境中，則對於則影響其體積穩定性甚大。

3. 養護方式

水中養護和較長的養護時間可以減少混凝土乾縮量，且隨著水灰比不同而有不同影響程度。一般而言，水中養護的效果較空氣中養護效果來的好，另外，經過熱養護或蒸氣養護後，混凝土乾縮量也較低[10、24、31]。

養護的措施對混凝土品質有相當程度的影響，如何適當養護當然甚為重要。基本上因養護產生裂縫的要因可歸納為：強度發展(f_c)、水化熱的產生(ΔH)、化學性收縮(ΔV)，圖 2-3[27]顯示出三者之關係，早期強度發展對蒸發所產生之表面張力有良好的抵抗力，如果抵抗力低則容易產生龜裂，此仍初期水化反應最容易發生的問題。水化熱所

滋生之表面溫度所生之差異應變裂縫，以及表面濕度之蒸散亦會造成裂縫，而化學收縮仍為卜特蘭水泥水化所產生之體積收縮值，即所謂「自體乾縮」。

(一) 混凝土體積穩定性

1. 塑性收縮(plastic shrinkage)：

由於混凝土初期強度發展甚低，所以只要外界溫濕度、風速、配合水化溫度造成水分蒸發，如圖 2-4 所示，原有水所佔的孔隙產生負的孔隙壓力，而造成混凝土的收縮變形[27]。通常這種裂縫發生在初凝前，如圖 2-5 所示，且裂縫較收縮裂縫寬且長，延伸穿透混凝土整個深度，如圖 2-6 所示

2. 自體收縮(autogenous shrinkage)：

當混凝土和外界環境無濕度交換下，混凝土內部的化學作用收縮，包括水解收縮、碳化收縮及轉化收縮等。此體積變形均由於化學反應產生，通常在混凝土水灰比小於 0.42 時，因卜特蘭水泥無充分的水可以水化，反而容易產生此類型之收縮現象[10]。自體收縮其實也可視為自乾現象所導致。

3. 乾燥收縮(drying shrinkage)：

乾燥收縮是指混凝土在乾燥環境下，逐漸喪失水分而產生收縮變形。混凝土在乾燥的初期，所排出大孔隙內的自由水，僅會造成非常

小的收縮量，而當乾燥作用持續進行時，就會使得存在於膠體間的吸附水與層間水被排出，導致膠體間的相互移動，使得混凝土產生收縮變形，因此塑性乾縮將伴隨產生乾燥收縮[27]，如圖 2-7 所示。

(二) 溫度對混凝土之影響

1. 溫度對水化反應之影響

由圖 2-8[33]中可以看出卜特蘭水泥水化初期 Ca(OH)_2 ，隨著溫度上升 CH 也隨之增加，圖 2-9[33]也可看出在不同水灰比，隨著溫度越高所測得的終凝時間也提早，意思是溫度越高凝結時間也將越短。

化學反應具溫度敏感性，溫度較高反應較快，水化作用亦然，在足夠水分下，提高溫度必加速水化反應速率，使水化產物會很快地在卜特蘭水泥顆粒周圍形成高密度的擴散屏障，可能使得水化產物的不均勻分佈。另一方面較高溫時 C_3S 會產生較粗的水化結構，但生成物之分佈可能有所差異；高溫催化之水化之產物比較會堆集於卜特蘭水泥顆粒之周圍，無足夠時間均勻分佈，尤其是高水灰比地帶，缺乏後續之水化物來填補，影響混凝土晚期強度之成長。

2. 高溫加速養護

預鑄混凝土中最常用來增加強度的方法就是採用提升溫度，溫度升高可以加速卜特蘭水泥的水化反應，以增加混凝土強度發展。圖 2-10[27]為常壓狀態下，加熱溫度在 100°C 內，可以看出在蒸養初期

時，溫度 85°C 以上的強度皆較佳，這是因為卜特蘭水泥在初期時受溫度增高而加快水化反應，但是隨著持溫的時間越長，其強度將由蒸養溫度 40~70°C 者較高，反之，高溫養護者，強度成長速率並無有效提升，這是因為初始水化速率越快反應越激烈，造成混凝土內部組織雜亂，反而使之後水化空間受到限制，進而使強度成長不佳。由此得知，雖然低溫養護所需之養護時間越長，但最終產生較佳的強度。圖

2-11 [27] 表示 1 天和 28 天的試體在不同溫度對抗壓的影響，可以看出在初期時溫度越高強度越佳，但在 28 天時，隨著溫度的上升，強度反而越不好，這和先前敘述符合，皆因水化速率影響而成。

蒸氣養護時混凝土內外會有溫度梯度產生，產生溫度應力，而內部孔隙受溫度影響而膨脹，形成孔隙壓力，皆是導致裂縫繼續蔓延成長；因此，蒸汽養護前置時間愈長，混凝土早期抗裂強度愈足，其晚期強度之損減會愈少，因此，溫度梯度的高與低，影響混凝土之晚期強度[37]。

3. 溫度對強度之影響

文獻[37]指出混凝土因搗實振動引起之浮水上升，於骨材表面產生較高之水灰比，在水化早期，水化生成物之鈣氫石（Aft）與氫氧化鈣（CH）結晶之含量較大，並形成較多孔之構造，故容易被劈裂；若骨材粒徑愈大，此層則愈厚，常於乾縮或溫度變化而形成微裂縫，

使得混凝土強度較低。

由文獻[33]的結果顯示，在試體硬固後，隨即放至 25、35 和 50°C 的環境中，分別看出溫度對強度之影響。當水膠比皆固定為 0.3，且卜特蘭水泥與爐石、矽灰間的比例皆固定為 8:2 的狀況下，強度發展情形分別如圖 2-12、13、14 所示。圖 2-12[33]顯示，在混凝土初期，環境溫度為 50°C 時，其強度發展較快，但是隨著時間的增長，強度卻不增反減，這顯示了溫度在初期確實可以增加水化速率而提升強度，但是在晚期因成長空間受限和受溫度影響所造成的裂化原因，使得強度變得更低。而圖 2-13[33]表示爐石混凝土受溫度影響的強度成長曲線，同樣的在高溫的環境越久，強度也隨之裂化，這是因為爐石和卜特蘭水泥的成份相近，所反映的情況也很類似。圖 2-14[33]則為矽灰混凝土受溫度之影響，和之前的情況不同，矽灰混凝土在一般的常溫狀況下，強度成長緩慢，但是隨著溫度的增高，其強度也隨之提升，可以由圖中看出，當環境溫度在 35°C 時，隨著時間越長，強度仍隨之提升，甚至在 180 天後超越 50°C 的組別，因此，可以知道矽灰混凝土的環境溫度在 35~50°C 之間時，對混凝土強度成長有著正面的幫助。

4. 溫度對耐久性之影響

由文獻[34]中顯示，隨著溫度的增加，變形(microstrain)也逐漸增

加，尤其對於初期收縮影響甚大，由圖 2-15[34]中可看出，環境溫度為 15°C 時，其收縮量狀態雖隨時間增加，但相較於環境溫度為 40°C 者收縮較趨緩，甚至收縮量僅 1/3。圖 2-16[32]也顯示相同之情況，但是特別的是在溫度達 50°C 時，收縮量卻低於 40°C，這是因為卜作嵐材料-矽灰所造成的，文獻中解釋因為溫度在 50°C 時，矽灰的卜作嵐反應較佳，因而產生較多的 C-S-H 膠體，故有著較好的體積穩定性，和文獻[33]所做的結果相符。圖 2-17[32]顯示溫度上升會縮短終凝時間，但會導致混凝土的化學收縮提升，進而影響體積穩定性。由圖 2-18、2-19 [35]皆可看出，當溫度越高時，整體裂縫面積與收縮應變將會上升，而文獻[32、39]則說明，混凝土內部空氣含量與含水量愈高，在高溫下膨脹量愈大，此皆不利於混凝土之耐久性。混凝土吸水率隨養護條件而改變，採用高溫高壓養護試體吸水率皆高於標準養護；以光學顯微鏡觀察，發現高溫高壓養護試體較不緻密，而加速養護對低水膠比試體表面吸水率影響較不明顯[36]。

二、聲射技術

(一)聲射技術之發展

聲射法(Acoustic Emission, AE)屬於非破壞波傳檢測法之一種，依 ASTM E610-82 對聲射定義：聲射為一材料內部局部能量快速釋放而產生暫態彈性應力波的一種現象。聲射法主要針對為數眾多微小

能量釋放的微震裂源進行探索，其微震裂源即為微小裂縫發生處，此種彈性波為一種超音波脈衝，當頻率超過 20kHz 以上者，亦無法用耳朵聽到，必須使用換能器(探頭)才能得以監測。聲射脈衝經過傳統壓電式探頭轉換後，轉變為示波器上可以看到的聲射訊號[40、41]。同時，在相對較少感應器配備但近於裂源處等條件下，對微觀裂源發生時機之研判與其空間定位之推估乃至於其微觀之破壞模式。圖 2-20 顯示聲射法之原理示意圖[11]。

1953 年 Kaiser[47] 奠定聲射研究之基礎，說明金屬受壓力激發所產生之微震訊號事件屬於不可逆行為，其為材料受力狀態下進行解壓過程，亦不產生 AE 訊號，直到再加壓並超越過去施壓之最大載重，方又復而出現其 AE 訊號，史稱為「凱撒效應」(Kaiser effect)。而 AE 於 1980 年代後逐漸被應用在土木工程研究上，有關國內外近 30 年 AE 研究情況整理於表 2-1 所示。

(二)聲射定位原理

聲射定位技術的原理類似地震源的探查，地震測站如同 AE 探頭，而震源就像材料內部損害時所發出的聲音，藉由音波傳遞到各探頭的時間來判斷破壞發出音源的區域。聲射技術是一種動態監測技術，涉及聲射源、波的傳遞、聲電轉換、訊號處理、數據顯示與紀錄、訊號

解釋與分析等基本概念，其原理如圖 2-21[42]所示。

材料能量釋放後，AE 事件以暫態彈性應力波形式傳遞，由設置於待測物件表面之數個不同位置之 AE 感應器(即壓電式轉換計)，將壓力波轉換為電壓差訊號並記錄之，再經人工或程式之判讀，找出微裂源的所在位置，如圖 2-22 所示，進行 AE 定位的相關研究 [30]，進而達到找出初始破裂處之目的。

(三)聲射訊號參數

由感應器所接收到的聲射訊號必須予以參數化，藉由這些聲射訊號的變化可以瞭解岩石的破壞過程並且能做更深入的探討，因此，首先應將聲射訊號的各個參數，如圖 2-23[45]所示，進行初步的介紹與瞭解：

1. 門檻值: 排除外界雜訊與背景噪音，對 AE 擷取系統設定一門檻值，當聲射訊號超過門檻值才是為真正的聲射訊號，並由系統自動擷取儲存，否則就視為雜訊不予記錄。
2. 尖峰振幅: 某一聲射事件中最大之振幅，單位為 dB。
3. 事件持續時間: 某一聲射事件高於低限值之持續時間，通常以 μ 秒為單位。
4. 能量: 由於 AE 訊號只能反映出聲射脈衝能量的高低，不能真正

顯示物理上 AE 探頭所接受到的總能量；因此 AE 訊號能量，是指訊號包線下的面積。

(四)聲射訊號波形

聲射訊號依破壞機制、材料種類等因素，發生之波形可分為兩種，

如圖 2-24 所示[30]：

1. 突發型(Burst Type): 是屬於瞬間的能量釋放，在波形方面產生密集的脈衝，且可以明顯地看出尖峰振幅。
2. 連續型(Continuous): 在示波器上的波形與背景噪音非常相似，且其振幅較小而易與背景噪音重合，難以一般濾波方式加以分離。

(五)聲射設備

聲射監測系統通常含有探頭、放大器、濾波器、顯示及儲存設備等；訊號的組成是由聲音傳遞產生的表面振動轉換成電壓訊號，經放大器與濾波器加強訊號後，再由電腦顯示分析並儲存。探頭基於運轉頻率、靈敏度及環境特點，可分為諧振式和寬頻帶式，大多數的音射設備，探頭典型的工作頻率範圍在 30 kHz 至 1 MHz 之間[40]。

(六)校正試驗

就聲射定位技術而言，設定初始材料之縱波波速，乃為重要課題，其對定位後之精準度佔有相當大的影響，因此需建立一套驗證波速之校正試驗。ASTM E976-84 規範中建議的筆芯折斷法(pencil lead fracture)，如圖 2-25[30]，以及超音波脈衝(ultrasonic pulse)檢測儀器兩方面驗證，以得到較接近之縱波波速，作參數之設定，使擷取之 AE 事件資料易於判讀。

(七)聲射定位準則

本研究以到達時間差定位法(arrival time difference method)，定位分析材料於開裂時，產生之突發型聲射事件。依此方法之原理，為先量測數個已知位置感應器之到達時間差，應用一維之距離等於波傳速度乘以時間差的公式(式 2.1)，計算未知的聲源點位，同時當感應器數量足夠時，亦可將波傳速度以公式求得，與實驗所得或文獻所列之波速相互印證，再進行感應器之校正，使確切能更趨準確。

$$D = \Delta t \times V \dots\dots\dots(式 2.1)$$

D = 兩感應器距離

V = 材料縱波波傳速度

Δt = 兩感應器接收波傳之時間差

將 AE 定位用於二維平面時，用三組感應器置於三角形平面的三個頂

點處，並假設於此平面上各方向波傳速度 V 為常數，則每二組感應器獲得一時間差，可得一雙曲線，如圖 2-26(a)所示，三組感應器可得兩時間差，代回(式 2.2)則獲兩相交雙曲線，其交點處即為 AE 聲源位置，如圖 2-26(b)所示，若波速 V 未知，則增設一組感應器即可獲得。

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t^2 V^2}{\Delta t V + D \cos \theta} \quad \text{-----}(式 2.2)$$

其中， D 、 Δt 為已知，雙曲線之 R 、 θ 未知

於三維空間之聲射定位，將 n 個 AE 感應器固定於已知座標上，每組 AE 感應器接收 AE 事件時間，與第一組接收時間差 $\Delta t_i (i=2 \sim n)$ 為已知，則依三維空間距離計算，距離等於波傳速度乘以時間差，可列出(式 2.3)和(式 2.4)：

$$R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad \text{-----}(式 2.3)$$

$$R_i - R_1 = V \times \Delta t_i + \varepsilon_i \quad (i = 2 \sim n) \quad \text{-----}(式 2.4)$$

其中， R_i = AE 事件至第 i 個感應器的距離

V = 材料中之 AE 波傳速度

ε_i = 統計之殘差值

觀察公式可知，AE 聲源點位 (x,y,z) 未知，若波速 V 亦未知，則需四個時間差值，即最少需設置五組 AE 感應器，以解得四個未知數，完成 AE 定位之統計分析。未來後續欲進步求其裂源特徵

(source characterization)，則需設置至少七組 AE 感應器方可求得。

三、高完整性承裝容器 (High integrate container, HIC)

本研究團隊於前期『高完整性承裝容器製程自動化研究』[6、22、25]的研究中，利用數學精算及定性、定量的方式，以少水、少卜特蘭水泥、多粒料之理念設計高性能鋼纖維混凝土，並成功開發了高完整性承裝容器 (High integrate container, 簡稱 HIC)，見圖 2-27 所示。HIC 之混凝土材料性質中，齡期 28 天之抗壓強度超過 15,000 psi、超音波速大於 4,600 m/s、表面電阻值高於 20 K Ω -cm、電滲量低於 2,000 庫倫，且當經過 20 週期硫酸鹽侵蝕後，混凝土重量損失率僅不到 1% (見圖 2-28)，而受侵蝕後之抗壓強度值亦還較浸泡前高，顯示材料並未有任何明顯受侵蝕之現象，具有極佳之抗硫酸鹽侵蝕之能力。

另外，在 HIC 實體墜落測試中，在 1.5 m 之高度下，經過 45、90、180 度之垂直墜落測試 (見圖 2-29)，僅 7 cm 桶壁厚度之 HIC 仍完整性良好，且未出現明顯破壞情況。

表2-1 國內外近30年AE研究情形

來源	AE應用簡述	文獻作者	年代
國外 文獻	運用AE三維定位，於鋼筋混凝土構件施予四點彎矩載重試驗，試圖找尋初裂位置	Ohtsu	1982
	應用AE技術微觀探查岩石破裂發展區域	Labuz	1985
	運用聲射檢測技術探討卜特蘭水泥砂漿之疲勞破壞行為	Alliche and Francois	1986
	利用五個探頭在混凝土的雙懸臂樑上進行破壞力學試驗，利用聲射檢測技術來決定混凝土受力時，微裂縫在混凝土內成長的情況與裂縫成長的位置。	Rossi, Robert, Gervais, and Bruhat	1990
	應用AE技術探討粒料尺寸對混凝土破壞之影響	Mihashi, Nomura and Niiseki	1991
	以鋼筋混凝土樑進行AE試驗，以統計方式進行定位分析	Maji	1994
	對受應力之岩石進行AE之檢測，對其聲射事件發生與叢聚現象(localization)進行探討	Shah	1995
	探討卜特蘭水泥砂漿、混凝土以及加入鋼纖維的混凝土之聲射訊號特性	Wu, Chen and Wu	2000
	利用AE技術監視纖維水泥砂漿早期裂縫行為	Byounggeon Kim and W. Jason Weiss	2003
利用AE技術及X光斷層攝影方法作砂漿受壓力荷載下之破壞發展分析	Elaqra, Godin, Peix, R'Mili and Fantozzi	2007	
國內 文獻	應用AE訊號特性探討飛灰卜特蘭水泥砂漿	楊斯然	1991
	利用聲射檢測技術探討水淬爐石及砂灰卜特蘭水泥砂漿在受壓過程中之聲射訊號特性	曾祥璣	1992
	研究岩石材料中音射發生源之位置探測	廖志信	1993
	將聲射檢測技術運用於混凝土材料，探討混凝土荷載歷史之凱撒效應	張仲佐	1995
	針對卜特蘭水泥砂漿試體在單軸抗壓試驗下的聲射訊號進行探討	譚明德	1996
	將AE定位分析應用在巴西試驗	陳家豪	2004
	應用AE於岩石貫切破壞試驗	蔡昇哲	2005

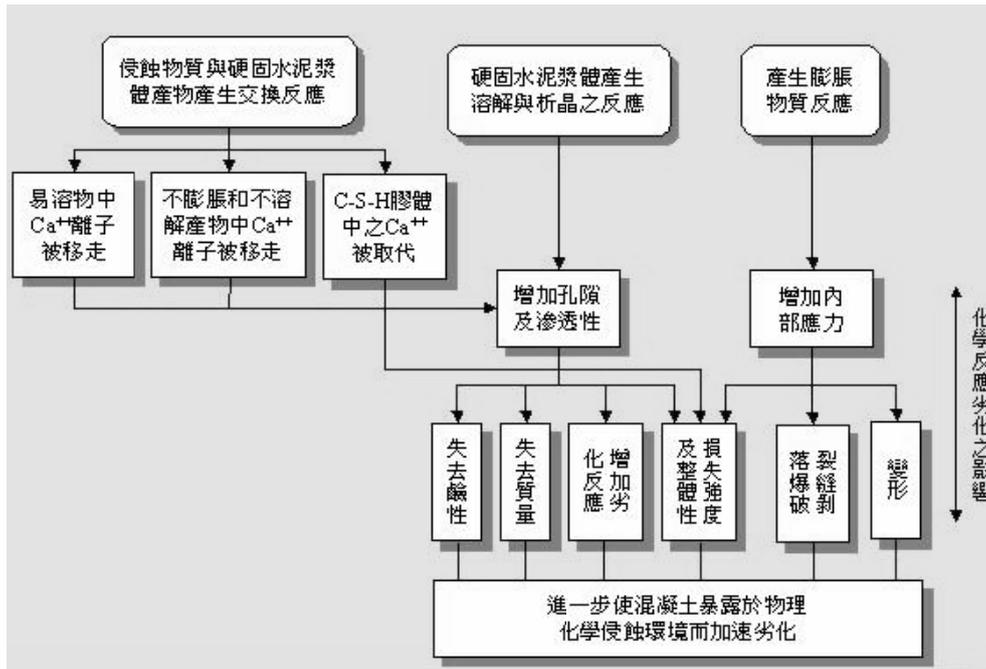


圖 2-1 混凝土劣化之物理基因示意圖[27]

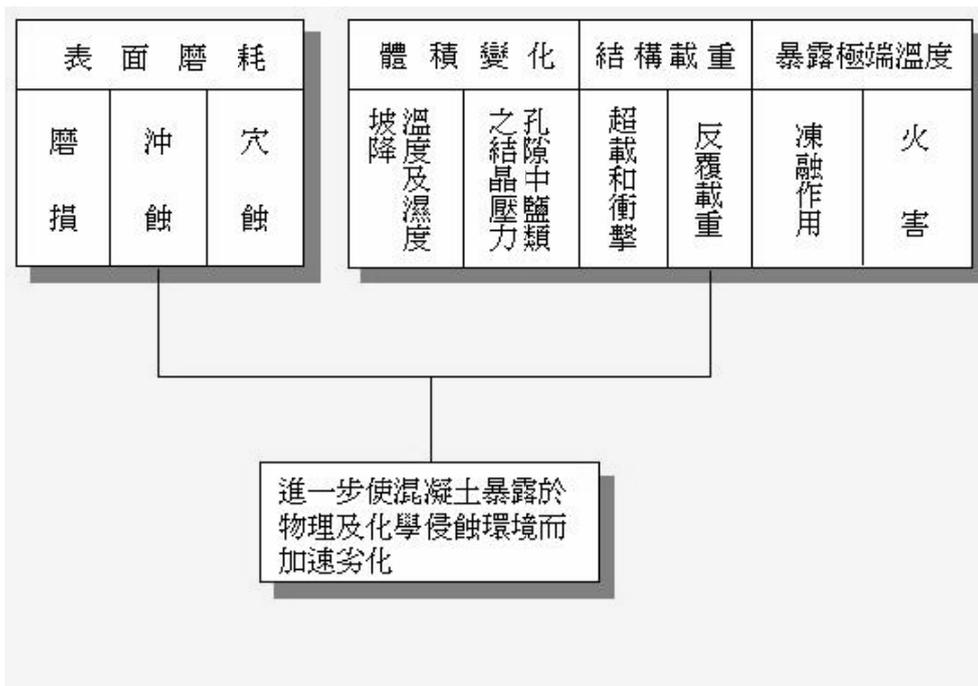


圖 2-2 混凝土劣化之化學基因示意圖[27]

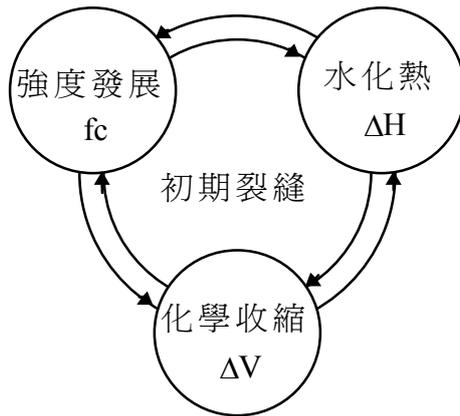


圖 2-3 混凝土裂縫產生要因[27]

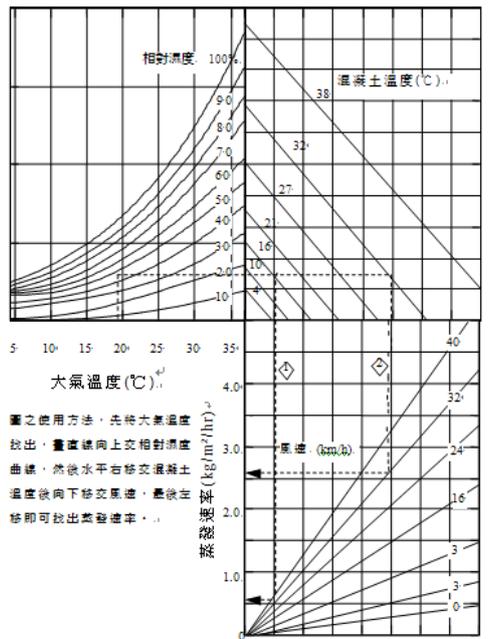


圖 2-4 混凝土溫度和大氣狀況混凝土表面水份蒸發量估計圖[27]

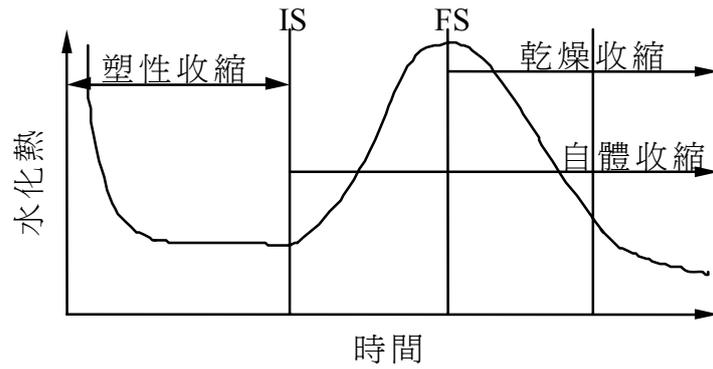


圖 2-5 混凝土收縮與水化反應之關係[27]



圖 2-6 典型塑性裂縫圖

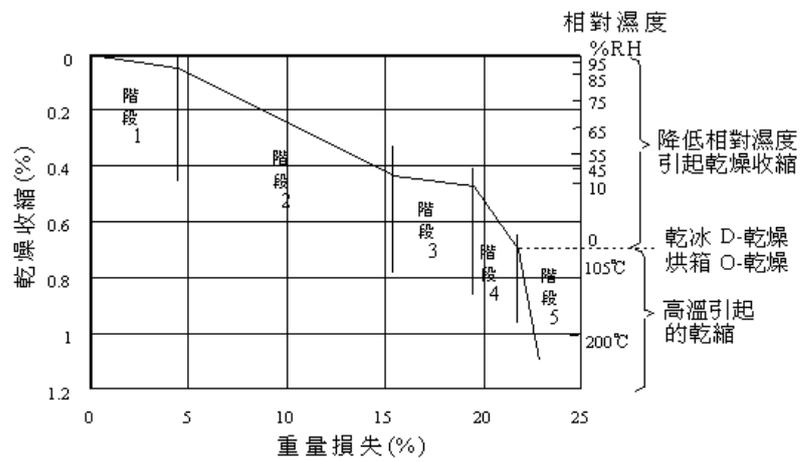


圖 2-7 卜特蘭水泥漿體水份喪失與乾燥收縮階段的關係圖[27]

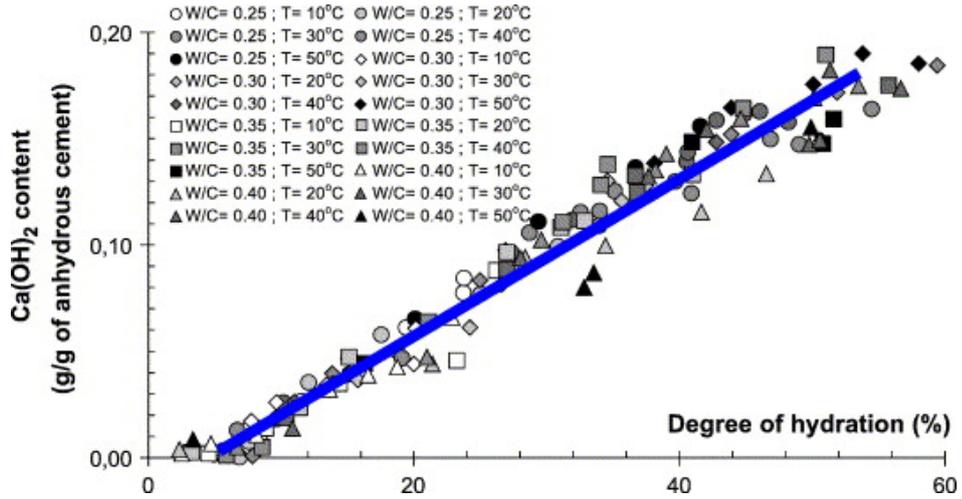


圖 2-8 Ca(OH)_2 水化程度與溫度之關係[33]

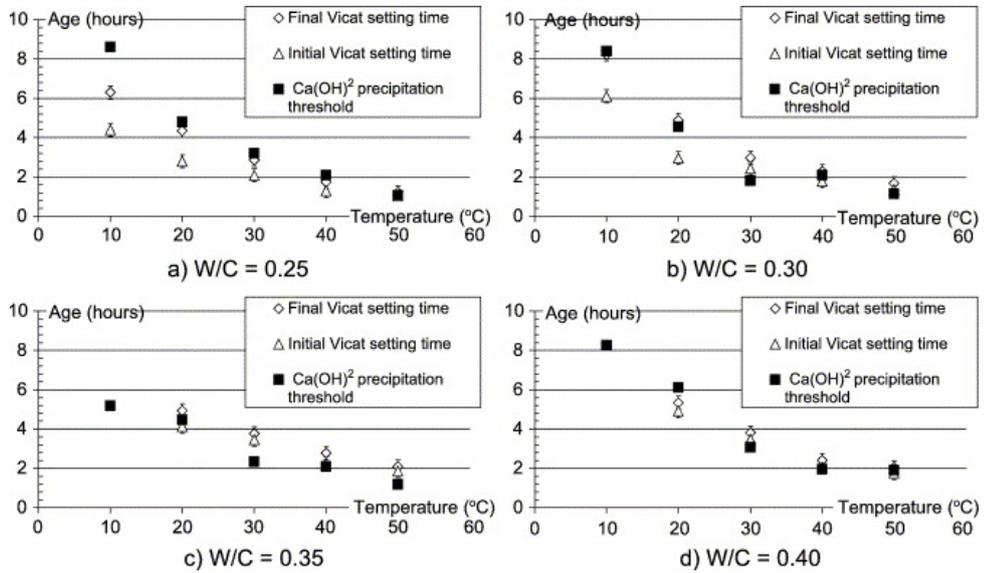


圖 2-9 Ca(OH)_2 水化程度與溫度之關係[33]

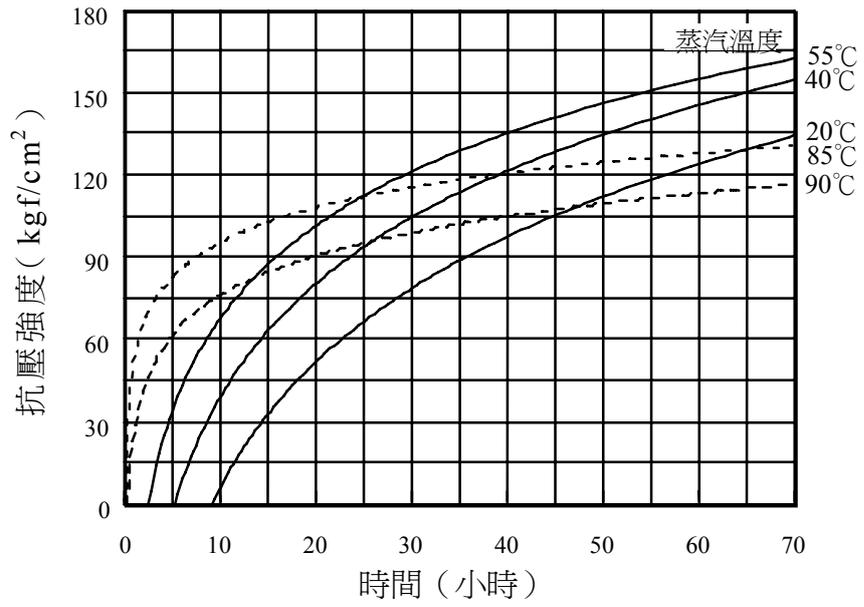


圖 2-10 低壓蒸汽養護對早期強度發展的影響[27]

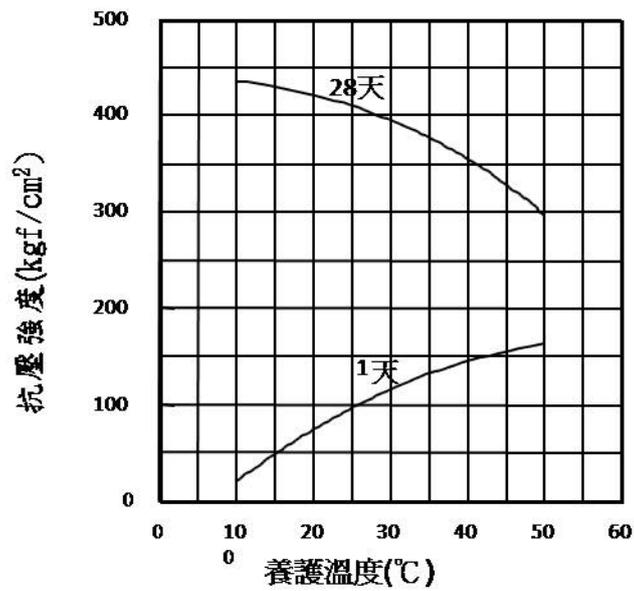


圖 2-11 定溫養護 1 天和 28 天強度[27]

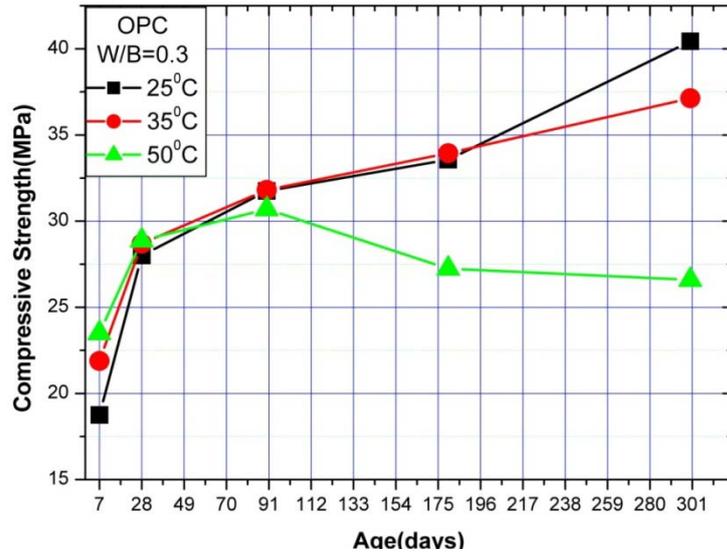


圖 2-12 普通混凝土在不同溫度下之強度發展[33]

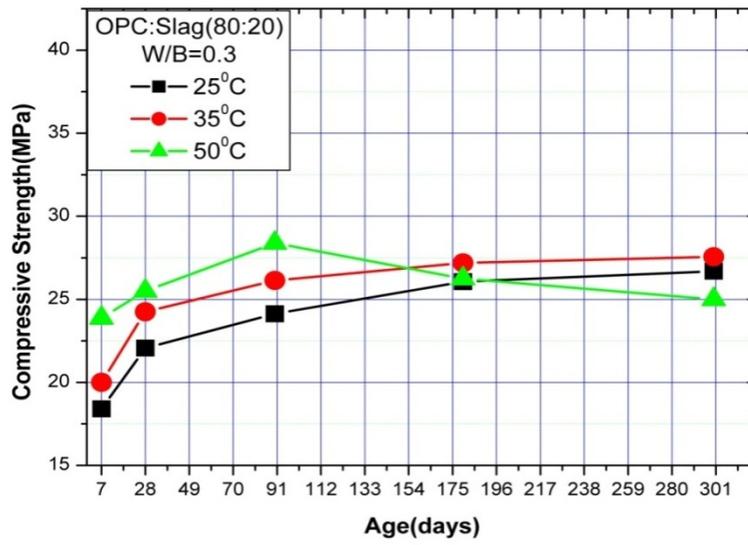


圖 2-13 爐石混凝土在不同溫度下之強度發展[33]

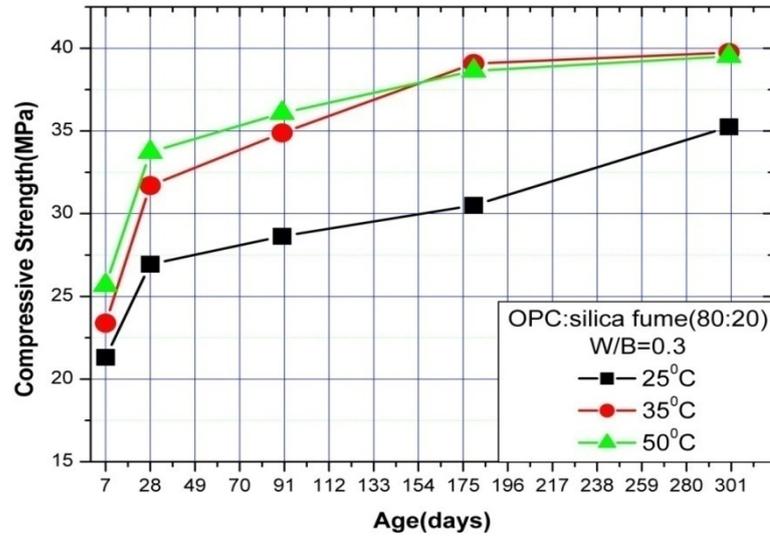


圖 2-14 矽灰混凝土在不同溫度下之強度發展[33]

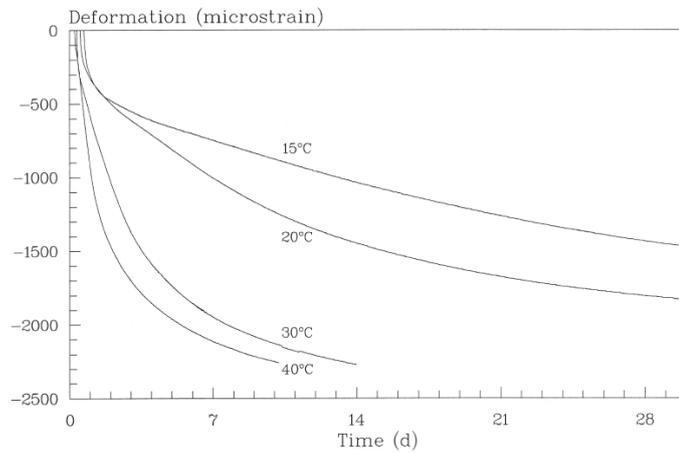


圖 2-15 W/C=0.3 20%之矽灰混凝土溫度與自體變形之關係[34]

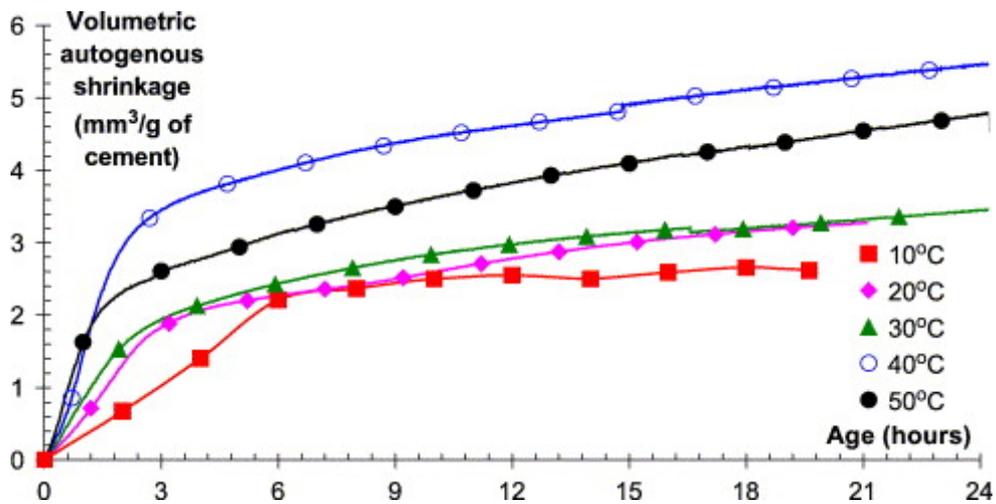


圖 2-16 W/C=0.25 自體收縮與溫度之關係[32]

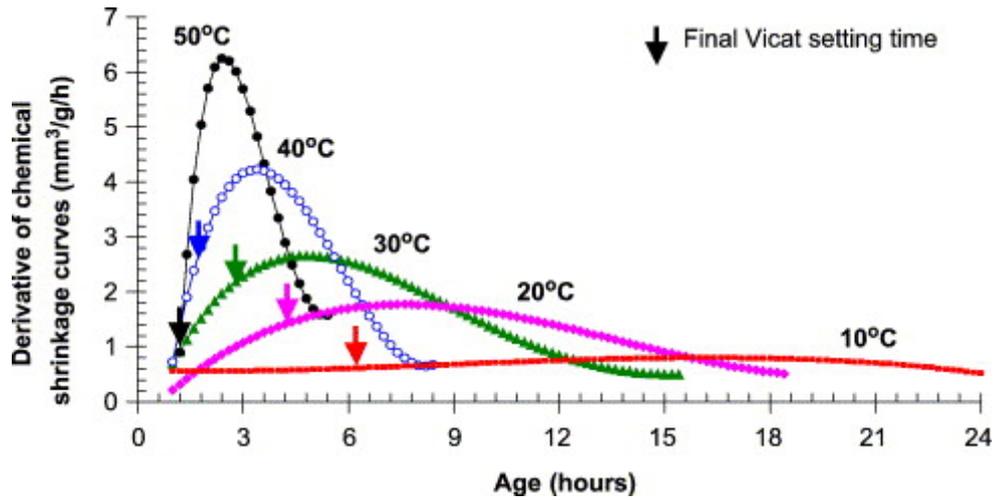


圖 2-17 化學收縮與溫度之關係[32]

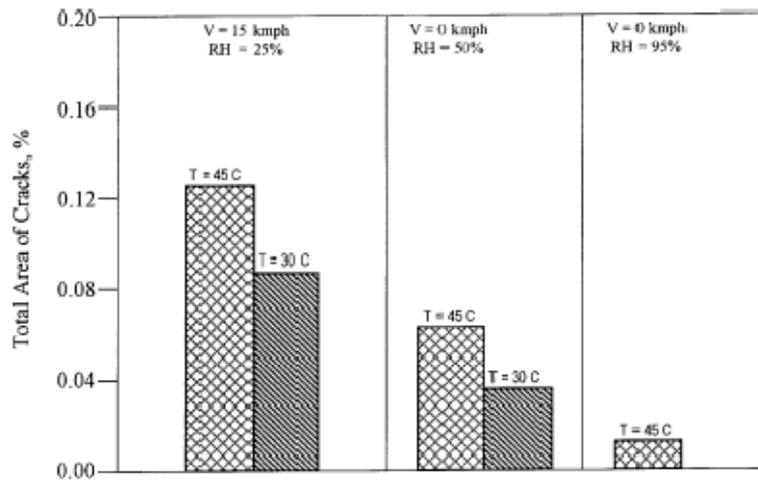


圖 2-18 溫度與整體裂縫面積之關係[35]

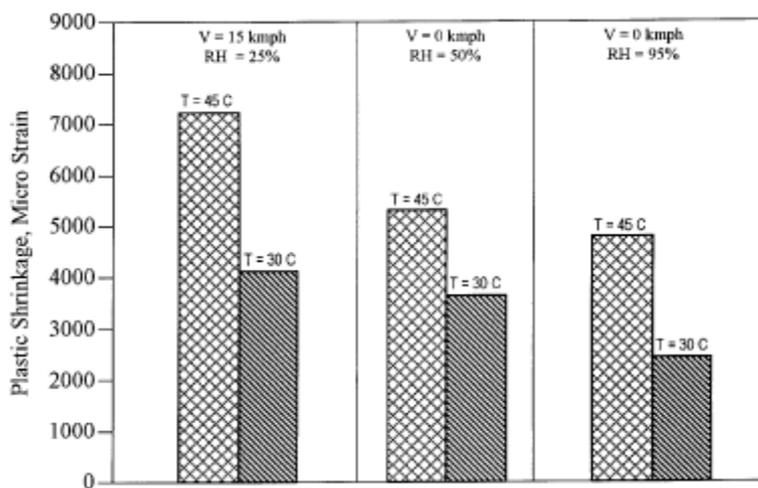


圖 2-19 溫度與塑性收縮之關係[35]

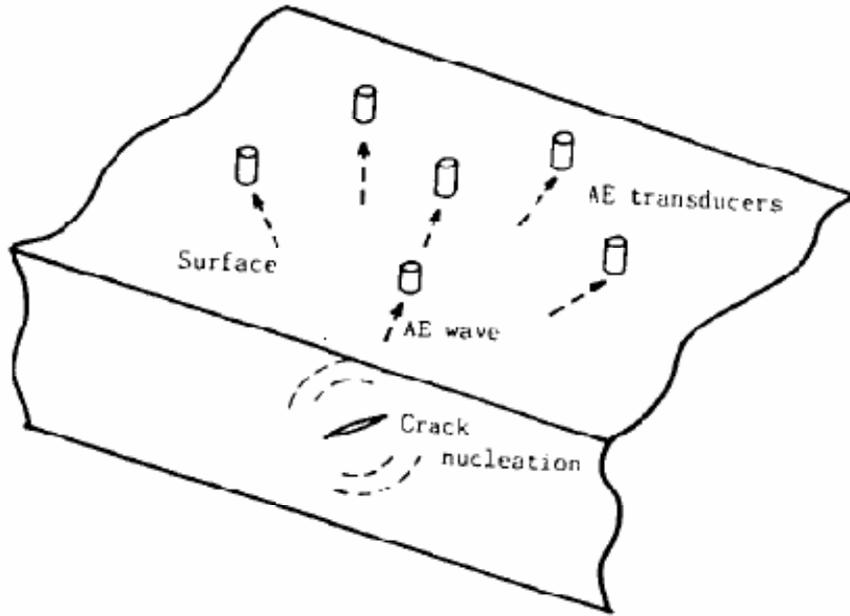


圖 2-20 音聲波傳定位概念圖[11]

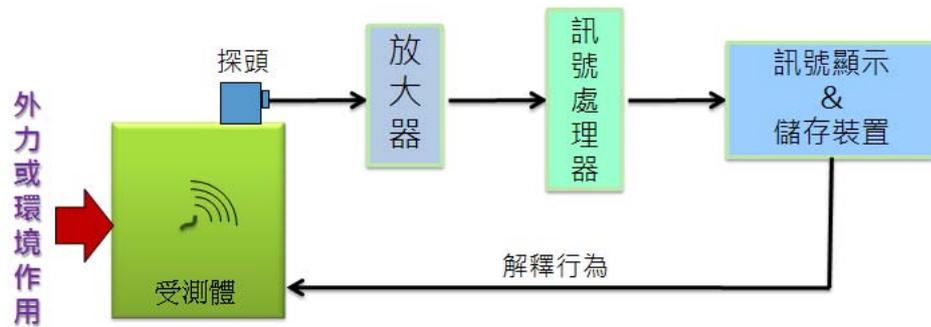


圖 2-21 音聲波傳定位概念圖[42]

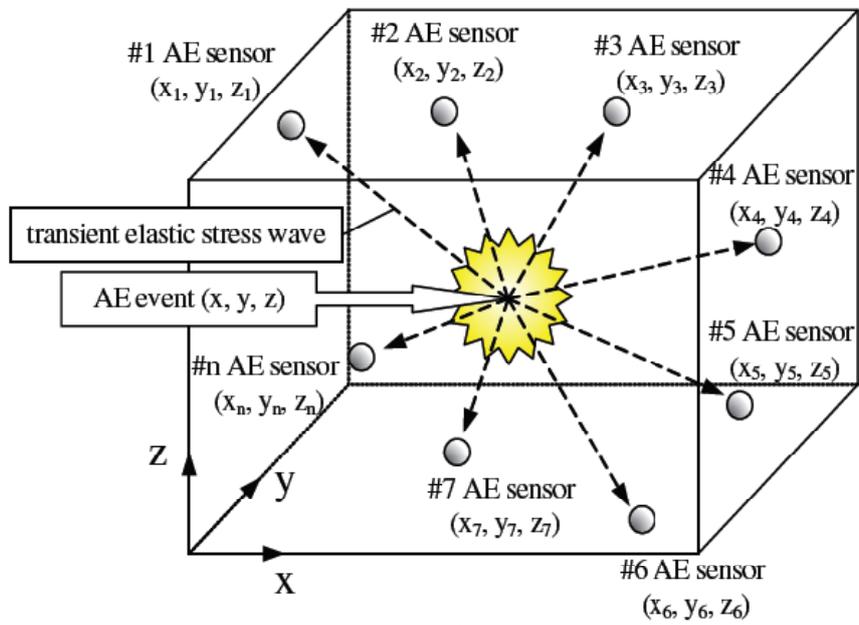


圖 2-22 聲射定位法則之到達時間差法之三為空間定位

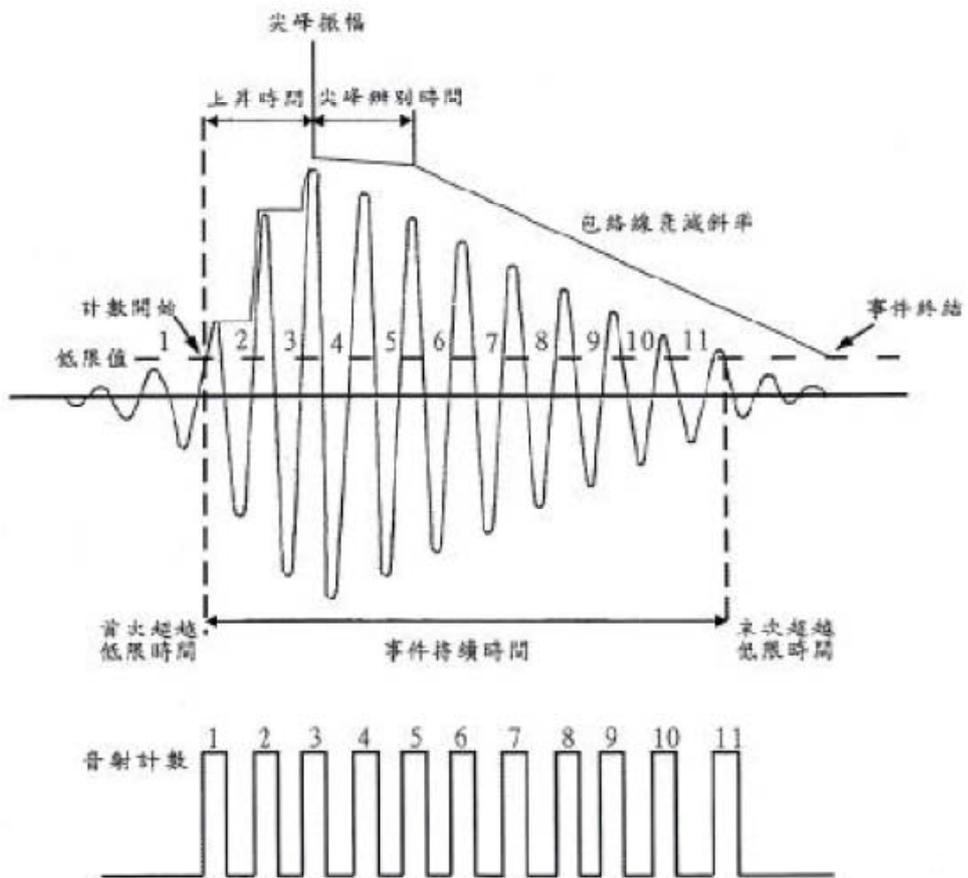


圖 2-23 音射訊號參數示意圖[45]

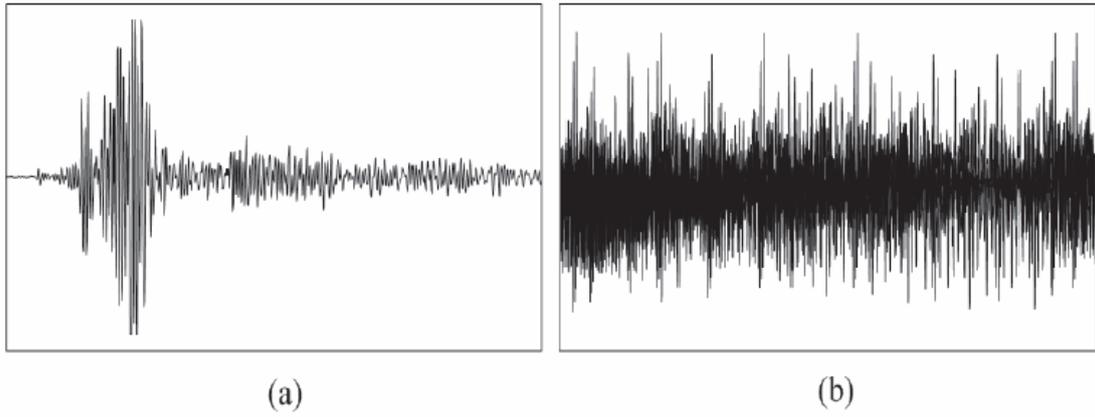


圖 2-24 音聲訊號依波型之分類(a)突發型 (b)連續型

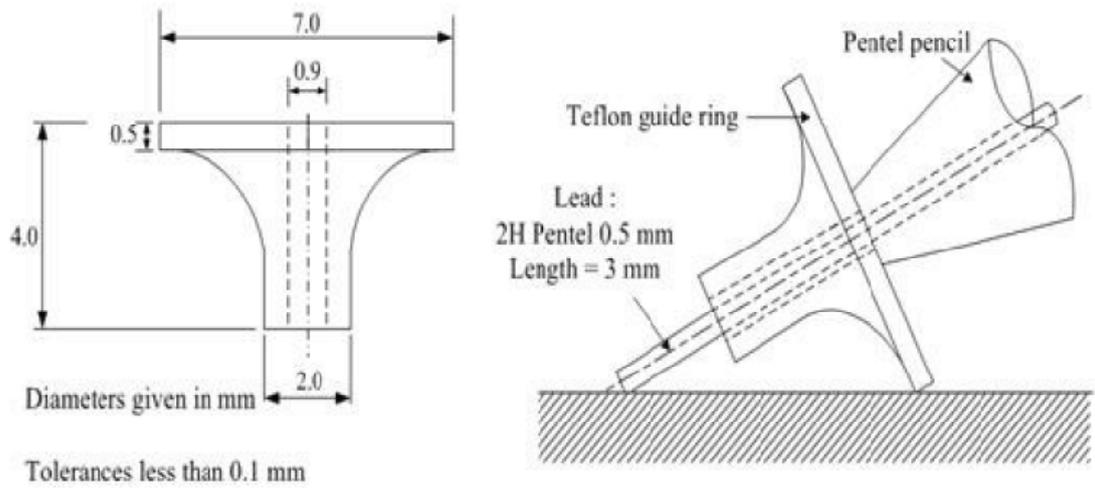


圖 2-25 ASTM E976-84 筆蕊折段法製造人工音聲源以提供校正之用[30]

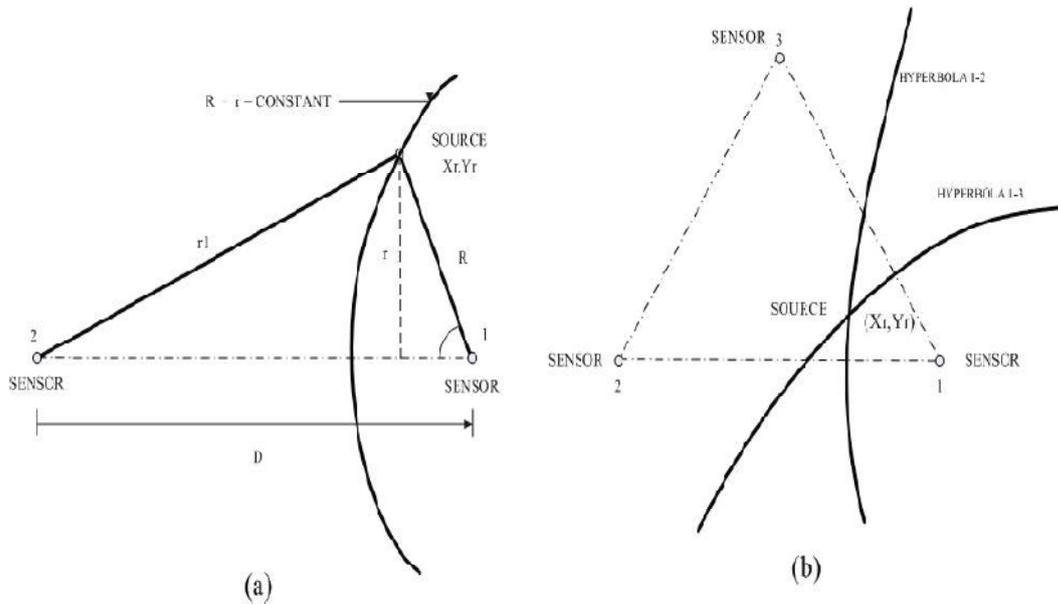


圖 2-26 音聲定位準則之到達時間差法之二維平面定位[30]



圖 2-27 高性能鋼纖維混凝土高完整性承裝容器

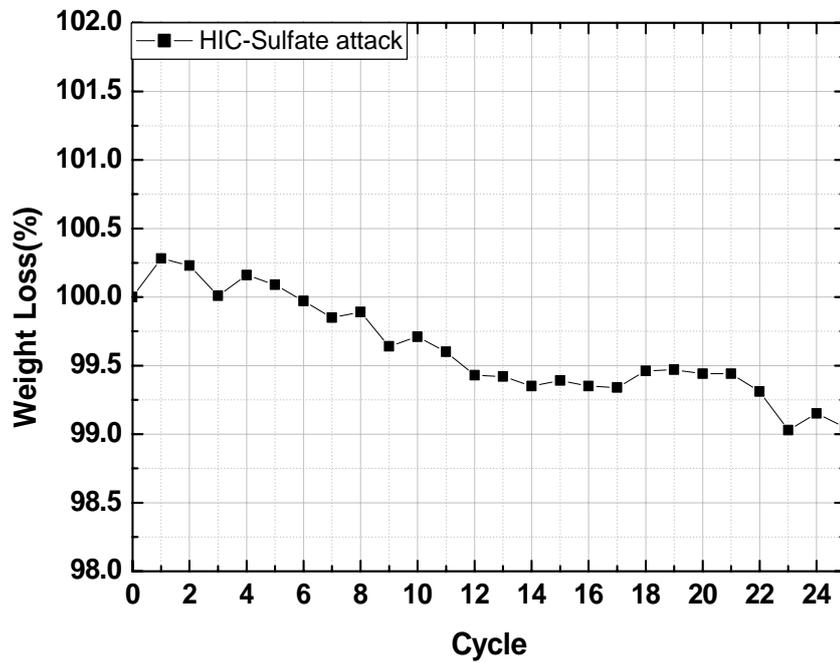


圖 2-28 高完整性承裝容器混凝土品質驗證-硫酸鹽侵蝕



圖 2-29 高完整性承裝容器原型墜落測試

參、研究方法與過程

一、試驗計畫

本研究計畫內容共分為兩大部分，首先針對不同設計變數（強度品質、漿體量、設計法），探討混凝土硬固及耐久性質之變化；另外以音聲辨識系統檢測混凝土材料在新拌混凝土狀態時，當受制於不同溫度場下，探討混凝土品質變異情形；此法將藉由即時偵測到之劣源發生時間點，搭配以螢光漆和紫外燈管將微裂縫顯影出現，分析溫度環境所造成的影響；各部分工作項目與流程如圖 3-1 所示，其相應試驗之標準如表 3-1~3-4 所示，研究範圍與執行方式說明如下：

(一) 研究範圍與執行方式

第一部分：混凝土基本性質檢測

混凝土性質試驗之檢測項目分為下列幾項性質試驗，流程如圖 3-2 所示：

- 1、 新拌性： 水化熱量測主要偵測混凝土在水化過程時受外在環境溫度所產生的溫度影響，透過資料擷取，瞭解混凝土由塑性態至固態之各種行為表徵，更可以合理的機理來詮釋水化溫度與外在環境溫度之相互關係。初、終凝時間可了解混凝土於不同溫度場下之凝結時間。
- 2、 硬固性： 針對混凝土各齡期進行抗壓強度試驗做為材料安全

性評估與長度變化量與超音波了解混凝土乾縮與試體內部膠體成長情況。

- 3、 耐久性： 量測混凝土各齡期的表面電阻值、吸水率與氯離子電滲量，以瞭解混凝土受外界劣化因子穿透表層進入內層之難易程度，進而能推測材料內部缺陷情況、路徑、大小與數量等。

第二部分：音聲辨識系統檢測混凝土在新拌狀態下之劣化情形

音聲為非破壞檢測之定量檢測技術，可據此評析材料之弱化與破壞，以及判定材料品質穩定性，將 AE 技術用於檢測溫度環境變化下，材料內部之缺陷發展與破壞特徵，利用相關軟體協助進行結果判別分析。

本測試首先在混凝土拌合後立即移置溫度場環境下 1 天，並以音聲辨識系統黏貼於混凝土表面上，以偵測混凝土表面因外在環境溫度所產生的影響，並將混凝土劣化處以本系統收集而得，藉此了解混凝土表面裂縫的發生時機，流程如圖 3-3 所示。根據文獻[27]指出，當混凝土內外溫度差達 20°C 以上時，易使混凝土出現表面裂縫，如圖 3-4 所示；而一般混凝土蒸氣養護溫度約在 60°C 左右[23]，如圖 3-5 所示，在初期對混凝土表面會造成影響。因此，本研究溫度設定為三組（30°C、60°C 與 90°C），變數設定如表 3-5 所示，藉此模擬與瞭解在高、中、常溫環境下，混凝土材料之變異情形。

另外，在混凝土硬固拆模後，利用螢光漆塗佈探傷法，利用螢光漆塗抹置混凝土表面，待其乾燥後，以甲醇將螢光漆擦拭乾淨，接著將試體放置於紫外燈管下照射，藉由殘留於微裂縫中的螢光漆，顯示微裂縫型態、粗細、距離及多寡等，以了解混凝土在新拌時受到環境溫度影響而造成劣化的情形。

(二) 環境場設置

本研究所設定的環境場主要以溫度改變為基準，分為 30°C(常溫)、60°C(中溫)及 90°C(高溫)三種，主要是想了解當混凝土在拌合結束後在受到不同的溫度環境場下會產生的劣化情形，而一般混凝土在普通養護與蒸氣養護之溫度亦介於此範圍之間[25]。

在環境濕度方面，考量新拌時混凝土內部濕度皆為潮濕狀態[27]，且為避免混凝土因濕度散失而產生的乾縮現象[27]，因此，本計畫皆以濕度 95%作為濕度設定，且以飽和硫酸鉀溶液[28、29]做為濕度控制；飽和鹽標準相對濕度如圖 3-6 所示。

由於音聲系統的量測方式為感測器所擷取聲波轉化成電壓[30]，在一般的恆溫恆濕機可能會產生些許低頻聲響，故採用無干擾烘箱來實驗，以減少對音聲系統的干擾。

二、 試驗材料

本計畫試驗所使用之材料包括卜特蘭水泥、卜作嵐材料、粗細粒料、水及強塑劑等，其性質分別敘述如下：

(一) 卜特蘭水泥

本研究所使用之卜特蘭水泥為台灣卜特蘭水泥公司所產生之第一型波特蘭卜特蘭水泥，其性質符合 ASTM C150 第一型卜特嵐卜特蘭水泥的規格，其性質如表 3-6 所示。

(二) 爐石粉及飛灰

爐石係由中國鋼鐵公司所生產的水淬爐石粉，經中聯爐石資源化處理公司研磨成細粉狀。飛灰為 F 級，取自台電興達火力發電廠，如表 3-6 所示。

(三) 矽灰

本研究係採用 Elkem Materials 公司所提供之矽灰，符合 ASTM C1240-03 規格之矽灰，物理、化學性質、粒徑範圍與基本性質，如表 3-6 及表 3-7 所示。

(四) 粗細粒料

本研究所採用苗栗正和砂石處理場所生產之機製粗細粒料，係由大安溪河床原石經破碎處理後之粒料，粗、細粒料基本性質、篩分析等基本試驗結果，如表 3-8 及表 3-9 所示。

(五) 強塑劑(SP)

本研究所使用之強塑劑為台灣巴斯夫公司，所生產的 51HE 型成份為羧酸系高性能減水劑性質介於，ASTM C494，F 和 G 型高性能減水劑之間。其相關性質，如表 3-10 所示。

(六) 拌和水

本研究之拌和水，均採用自來水，符合 CNS 3090 混凝土用水相關規定。

(七) 試體大小

由於一般混凝土基本試驗的試體大小皆為直徑 10 cm，高度 20 cm 的圓柱模；考量混凝土在初凝前波速不易傳遞，音聲探頭所能感測的距離，因此，在音聲系統檢測之試驗，其試體大小皆為長 7.5 cm，寬 7.5 cm，高 4.5 cm 的矩形試體；螢光探傷法之試體則製作大小為長 16 cm，寬 12 cm，高 4 cm 的矩形試塊。

三、 混凝土配比設計

本研究為探討耐久混凝土在環境溫度場環境下所影響的情形，因此其設計配比分為二部分：(1)以傳統 ACI 配比做為混凝土配比設計方法；(2)以黃氏富勒緻密配比(HFDMDA)作為配比設計方法，並以定性與定量的方法來觀察混凝土受溫度場所造成的劣化情形。

(一) ACI 配比設計法

傳統的配比設計方法以美國混凝土協會(American Concrete Institute；簡稱 ACI)所頒布普通卜作嵐混凝土配比設計 [26] 的 ACI 211.1 方法最受產業界採用。以 ACI 配比設計法，主要以工程上常用的水膠比 0.4 作為設計依據，並添加常用的卜作嵐材料飛灰與爐石來增加混凝土的耐久性質，其添加比例各占總粉料量的 25%。配比設計結果如表 3-11 所示。

(二)黃氏富勒緻密配比比設計法(HFDMDA) [5、22]

有別於 ACI 直接以卜作嵐材料取代部分卜特蘭水泥的方法，HFDMDA 係以充填孔隙為基準，原則上黃氏富勒緻密配比(以下簡稱緻密設計法)是透過富勒曲線(Fuller's cuver)的粒料堆積架構求得最趨近之理論解，降低經驗之依賴與試誤的誤差，並以包裹漿厚度求得混凝土漿量，取代傳統查圖而得的經驗方式，可將混凝土潤漿厚度直接反應到工作性與硬固性質上，故以此精確定性、定量之理論求解方式，做為混凝土配比設計模式。

根據 黃兆龍研究團隊於前期研究案「高完整性承裝容器製程自動化研究」 [6、22、25] 配比結果設計，並以黃氏富勒緻密配比設計法，探討在不同漿值、漿量厚度受溫度影響的混凝土性質變化情形；設計四組水膠比為 0.24、0.32、0.4 與 0.56 且漿體厚度皆為 5 μ m 的配比，藉以看出混凝土在不同的漿質情況下受環境場的影響；在水膠比

0.32 中設計三種漿量厚度 $t=5、25、50\mu\text{m}$ ，來比較混凝土漿量多寡的影響，共計 6 組配比，配比設計結果整理於表 3-11。

四、試驗設備

(一)混凝土性質試驗

試驗之標準與設備如表 3-1~3-4 所示；考量音聲技術設備是接收因聲音所轉換的微電壓，為排除因外在聲響干擾的因素，設計了無干擾烘箱來進行試驗。

(二)音聲技術設備

由於材料受到外在環境的影響，將其轉換成能量儲存於材料內部，當其材料無法抵抗時，材料局部則產生微裂縫，且將其微震能量以暫態彈性應力波之形式釋出。為求得微震裂源發生，採用由 Physical Acoustics Corporation 生產的八個型號 S9225 之壓電式轉換計 (piezoelectric transducer)，如表 3-4，作為 AE 感應器，貼附於試體表面上接收 AE 事件訊號，經由型號 1220C 之前置放大器 (preamplifier)，如表 3-4，合理設定下進行監測，篩選並放大高於門檻值 (threshold) 且頻率範圍介於 100kHz ~ 1200kHz 之訊號，將微小電壓變化記錄於二進位元 (binary) 之資料檔案中，以進行未來深入研究微裂縫之開裂時機。

本計畫之音聲訊號擷取系統為兩組，每組四頻道的設備，如表

3-4，其接收訊號頻率最高可達一千萬次/秒，為於系統穩定範圍內作業，擷取頻率為八百萬次/秒，即每次之時間間隔為 12.5 μ 秒，音聲事件的記錄與否，端看設於八頻道中的觸發頻道(trigger channel)是否接收到大於 100 μ mV 的電壓門檻值，如達該電壓差值，則視為有效之微震裂源事件，反之則為雜訊忽略之，而一旦觸發後，同時八個頻道接收且記錄該事件。每次微裂縫事件，考量接收後之資料檔案大小，設定適當的事件擷取訊號數。

本計畫利用 LabVIEW 系統提供數位與類比的轉換功能，經由 PCINI-6115 資料擷取介面卡同步接收微震事件而觸發的類比訊號，並即時轉換為一般電腦所能接受的數位訊號，以作為資料傳遞之用，並達到監控與量測效果[44]。其各項詳細規格與設定分述如下：

- (1) NI-6115 規格 (4 analog inputs)_ resolution : 12 bit_ maximum sampling rate : 10 MS/s_ minimum sampling rate : 10 kS/s
- (2) 同步化數據擷取：係利用 RISI bus cables 將所有資料擷取介面卡並聯，以達到時脈(timing)和訊號(signals)同步(synchronization)的量測。

五、試驗設備架設情形

本計畫於混凝土新拌時儀器架構情形如圖 3-7 所示，混凝土拌合結束後澆鑄於兩個試體模中，且放置於無干擾烘箱所設定之環境場。

將 AE 感測器搭配薄銅片黏貼於混凝土表面，以防止感測器沉陷，接著連結 AE 感測器與訊號放大器，經由訊號擷取器傳輸訊號至電腦上，以擷取 AE 訊號所產生之數值檔，而顯示器中則可以即時顯示訊號的能量與數量；量測水化溫度受環境影響試驗時，將 K-Type 線插入試體中央 2 cm 處，並透過無干擾烘箱後方預留之開孔連結水化熱資料擷取器，由電腦記錄受環境溫度影響的試體內部水化溫度。

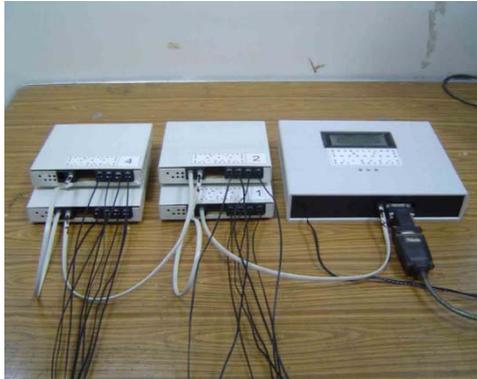
表3-1 混凝土材料與性質試驗方法與規範

材料性質	試驗名稱	試驗規範	備註
卜特蘭水泥	比重試驗	ASTMC188	
粒料	比重	ASTM C127 或 CNS 488	
	吸水率試驗	ASTM 128 或 CNS 487	
	乾搗單位重試驗	ASTM C29 或 CNS 1163 及 CNS 1166	
混凝土新拌性質	坍度試驗	ASTM C143	
	初終凝試驗	CNS 14220	
	水化熱試驗	自製	
混凝土硬固性質	抗壓強度試驗	ASTM C39	
	長度變化量試驗(乾縮)	CNS 14603	
	吸水率試驗(AC)	自製	參照粗、細粒料吸水率試驗法(CNS487、CNS488)
混凝土耐久性質	表面電阻試驗	AASHTO T259	
	超音波試驗	ASTM C597	
	氯離子滲透試驗	CNS 14795 ASTM C1202	

表3-2混凝土性質試驗設備(一)

實驗儀器設備

水化熱試驗



水化熱量測單元與受測試樣
(含感測單元、溫度-數據轉換單元及數據收集、控制單元)

抗壓強度



200 噸抗壓試驗機

長度變化量試驗(乾縮)

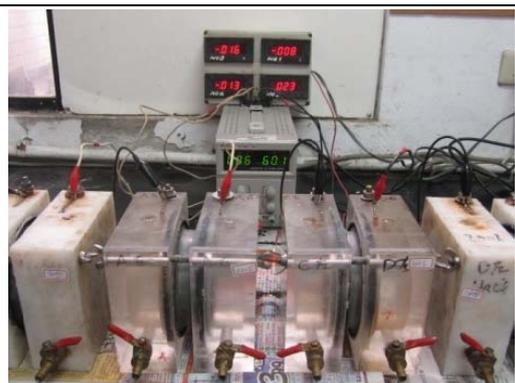


MTS 100 噸伺服系統壓縮機

氯離子滲透試驗



長度比較測微器



混凝土電滲試驗裝置

表3-3混凝土性質試驗設備(二)

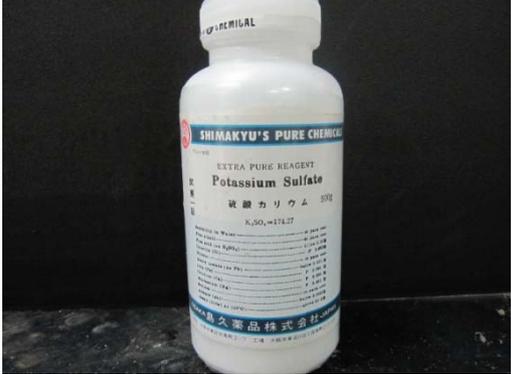
<p>電阻試驗</p>	<p>螢光劑、紫外線燈</p>
 <p>表面電阻量測儀</p>	
<p>超音波試驗</p>	<p>初終凝試驗</p>
 <p>超音波波速量測儀</p>	 <p>混凝土初終凝貫入儀</p>
<p>環境場設置</p>	
<p>溫度控制箱</p>	<p>飽和鹽溶液(硫酸鉀)</p>
 <p>無干擾烘箱</p>	

表3-4混凝土性質試驗設備(三)

<p>養護環境</p>	
<p>可程式恆溫恆濕機</p>	<p>養護池</p>
	
<p>音聲系統設備</p>	
<p>AE 感應器</p>	<p>前置放大器</p>
 <p data-bbox="427 1305 592 1346">型號 S9225</p>	 <p data-bbox="1023 1305 1187 1346">型號 1220C</p>
<p>訊號擷取系統</p>	
 <p data-bbox="427 1814 592 1854">型號 NI-6115</p>	

表3-5 環境溫度變數表

溫度 水膠比	30°C	60°C	90°C
0.24	★	★	★
0.32		★	
0.40		★	
0.56		★	
環境濕度皆以飽和硫酸鉀溶液控制濕度為 95%			

表3-6 試驗用卜特蘭水泥、爐石、飛灰之化學成份及物理性質

試驗項目	卜特蘭水泥 (第一型)		爐石		飛灰			
	CNS 61	台泥	CNS 12549	中鋼	ASTM C678 (Type F)	ASTM C6118 (Type C)	台電興達廠	
化學成分 (%)	SiO ₂ (S)	-	20.08	-	33.31	-	-	50.25
	Al ₂ O ₃ (A)	-	4.32	-	16.77	-	-	27.16
	Fe ₂ O ₃ (F)	-	3.02	-	0.31	-	-	6.93
	S+A+F	-	27.42	-	50.39	70	50	84.34
	CaO	-	63.73	-	38.06	-	-	4.71
	MgO	Max : 6.0	3.15	-	9.08	Max : 5.0	Max : 5.0	1.55
	SO ₃	Max : 3.0	2.85	Max : 4.0	2.03	Max : 5.0	Max : 5.0	0.66
	f-CaO	-	-	-	-	-	-	-
	TiO ₂	-	0.26	-	0.47	-	-	0.98
	Na ₂ O	-	0.32	-	-	Max : 5.0	Max : 1.5	0.42
	K ₂ O	-	0.60	-	0.31	-	-	0.85
	V ₂ O ₅	-	0.05	-	-	-	-	-
	燒失量	Max : 3.0	0.51	-	0.31	Max : 12	Max : 6	-
	不溶殘渣	Max : 0.75	0.08	-	-	-	-	-
	C ₃ S	-	49	-	-	-	-	-
	C ₂ S	-	21	-	-	-	-	-
	C ₃ A	-	7.9	-	-	-	-	-
C ₄ AF	-	9.4	-	-	-	-	-	
物理性質	細度 (cm ² /g)	Min : 2800	3310	Min : 2800	6000	-	-	-
	比重	-	3.15	-	2.853	-	-	2.168
	初凝 (Vicat) 時間 (分:秒)	45	4 : 37 (W/C : 0.47)	-	-	-	-	-
	終凝 (Vicat) 時間 (分:秒)	6 : 15	8 : 22	-	-	-	-	-
	#325 篩餘 (%)	-	-	Max : 20	-	-	-	-

表3-7 卜作嵐材料粒徑分析與比重結果

材料	粒徑範圍(μm)	平均粒徑(μm)	比重
飛灰	0.32~162	22.73	2.168
爐石(6000)	0.32~45	7.02	2.853
矽灰	0.32~26	1.51	2.2

表3-8 粗、細粒料基本性質

物理性質	粗骨材 (大安溪)	細骨材 (大安溪)
比重(SSD)	2.68	2.67
比重(OD)	2.67	2.66
吸水率(%)	1.19	1.37
最大粒徑(mm)	12.5	4.75
細度模數(FM)	6.3	2.92
小於#200 篩之粒料含量(%)	0.92	3.16

表3-9 粗、細粒料篩分析結果

粗骨材			細骨材		
篩號	CNS 1240 要求過篩百分比 (%)	過篩百分比 (%)	篩號	CNS 1240 要求過篩百分比 (%)	過篩百分比 (%)
3/4"	100	100	#4	95~100	99.08
1/2"	90~100	99.69	#8	80~100	68.79
3/8"	40~70	65.82	#16	50~85	46.81
#4	0~15	6.99	#30	25~60	32.76
#8	0~5	--	#50	10~30	20.13
#16	---	--	#100	2~10	10.55

表3-10 強塑劑基本性質

比重	1.071
固溶物含量 (%)	34.5%
pH 值	6.95
顏色	淡黃色
氯離子含量 (ppm)	88 ppm

表3-11 混凝土配比設計結果一覽表(kg/m³)

試體名稱	W/B	W/C	粗粒料	細粒料	卜特蘭水泥	爐石粉	飛灰	矽灰	水	SP
ED2405	0.24	0.42	765.4	958.8	321.3	80.3	136.2	26.6	135.5	3.27
ED3205	0.32	0.6	765.4	958.8	265.2	66.3	136.2	26.6	158.2	1.98
ED3225		0.54	711.0	890.8	333.2	83.3	126.6	24.7	181.7	1.36
ED3250		0.51	653.1	818.1	405.8	101.4	116.3	22.7	206.8	1.10
ED4005	0.40	0.79	765.4	958.8	221.5	55.4	136.2	26.6	175.9	1.54
EA4050		0.8	682.0	907.0	250.0	125.0	125.0	0.0	200.0	0.68
ED5605	0.56	1.3	765.4	958.8	157.8	39.4	136.2	26.6	201.7	0.68

註:

ED:以黃氏富勒緻密配比法(HFDMDA)[5]設計；

EA:以 ACI 配比法設計；

單位: kg/m³

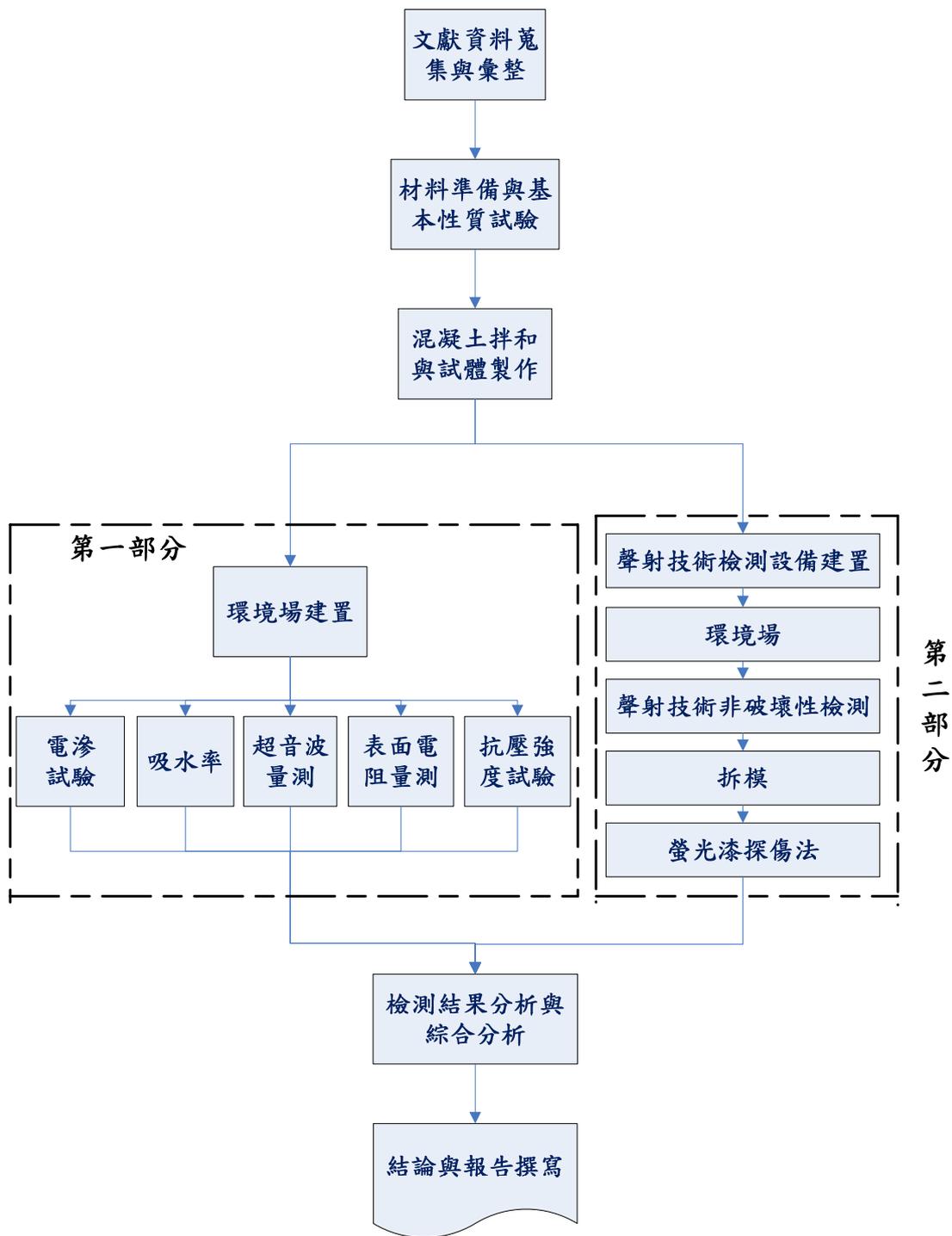


圖 3-1 各部分工作項目與流程圖

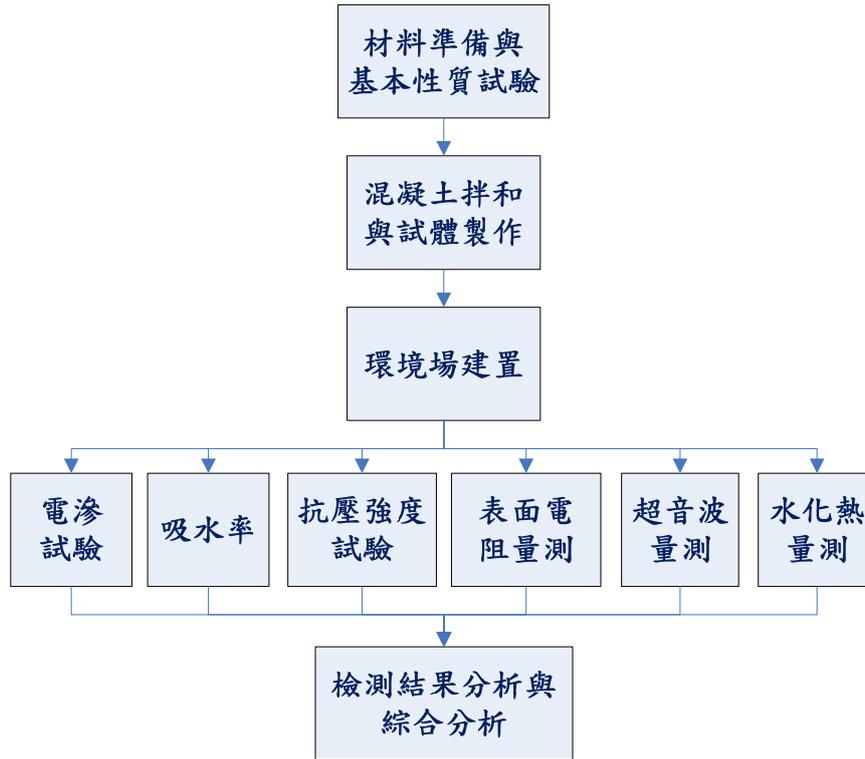


圖 3-2 第一部分流程

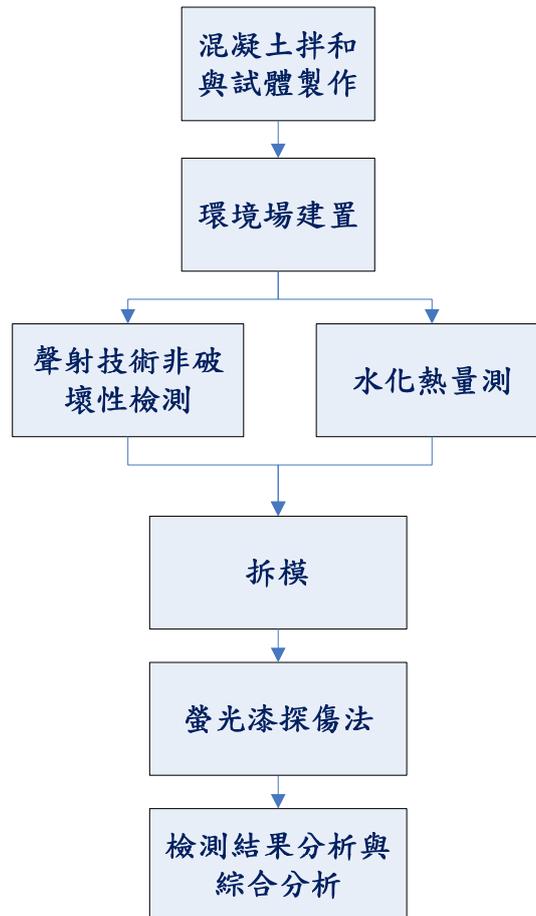


圖 3-3 第二部分流程

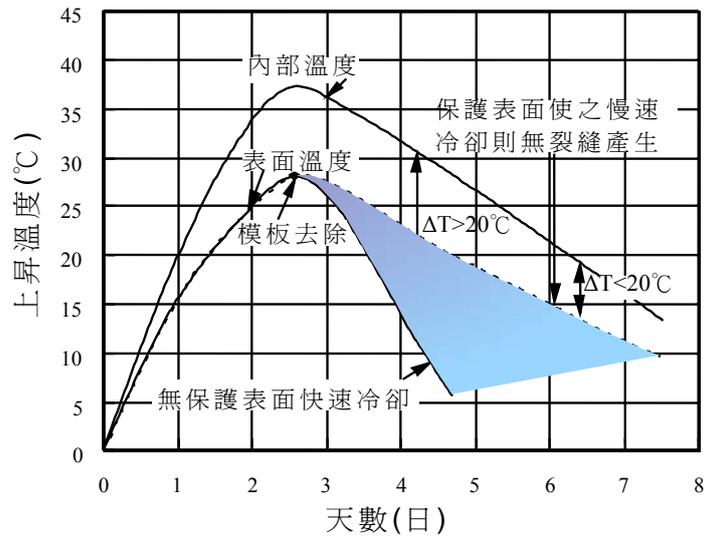


圖 3-4 混凝土溫差與裂縫關係

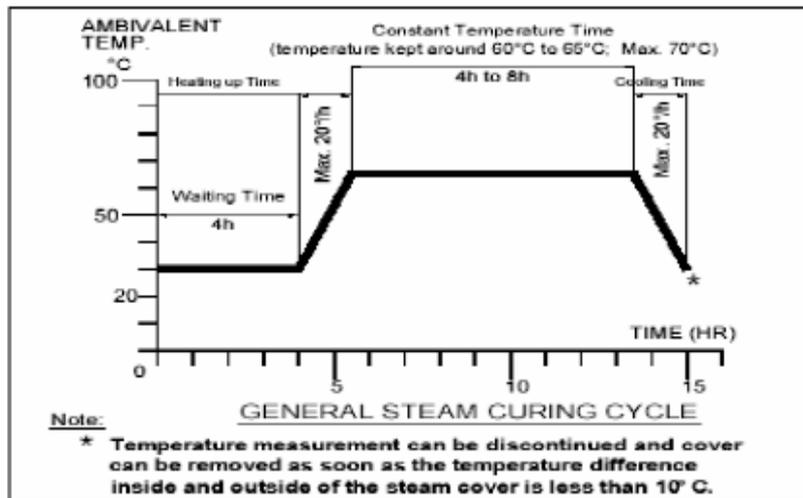


圖 3-5 養護溫度控制階段流程圖 [23]

相對濕度 溫度 鹽類	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
氯化鋰 LiCl	14.7	14.0	13.3	12.8	12.4	12.0	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4
氯化鎂 MgCl ₂	35.0	34.6	34.2	33.9	33.6	33.2	32.8	32.5	32.1	31.8	31.4
硝酸鎂 Mg(NO ₃) ₂	60.6	59.2	57.8	56.3	54.9	53.4	52.0	50.6	49.2	47.7	46.3
氯化鈉 NaCl	74.9	75.1	75.2	75.3	75.5	75.8	75.6	75.5	75.4	75.1	74.7
硝酸鉀 KNO ₃	97.6	96.6	95.5	94.4	93.2	92.0	90.7	89.3	87.9	86.5	85.0
硫酸鉀 K ₂ SO ₄	99.1	98.4	97.9	97.5	97.2	96.9	96.6	96.4	96.2	96.0	95.8

溫度單位：°C 濕度單位：%

圖 3-6 飽和鹽標準相對濕度

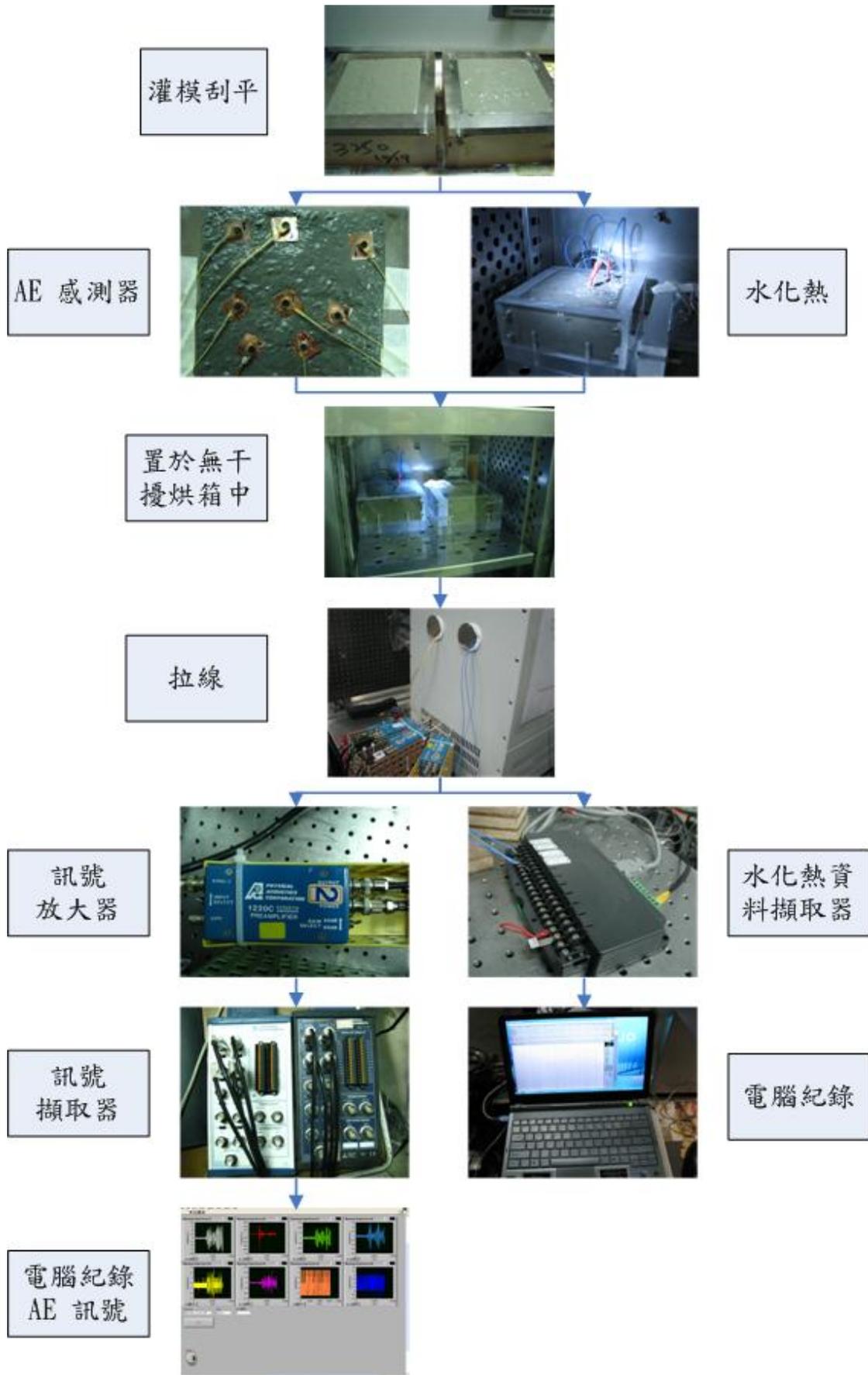


圖 3-7 混凝土於新拌時 AE 與水化熱儀器架設

肆、試驗結果分析

本試驗係以 CNS1230 規定的方式進行試體養護，並對其新拌性質、硬固性質與耐久性質等工程特性逐一進行評估分析。音聲(AE)技術之驗證，本計畫將為了解混凝土在完成結束至硬固這段期間，混凝土受到環境溫度影響之情形，因此，第一部分將以音聲技術了解其影響，並與文獻相互佐證；若混凝土硬固前所產生的微裂縫，可利用螢光漆探傷法，將混凝土原先受到環境溫度影響所產生的微裂縫顯現出來，並與 AE 所探得資訊相互佐證裂縫產生之時機點。

一、水化熱

卜特蘭水泥加水後產生一系列的卜特蘭水泥化學放熱反應，這種反應的特徵會使卜特蘭水泥基質材料產生物理性及化學性變化。而混凝土組成材料會產生放熱的材料主要為卜特蘭水泥，本研究卜作嵐材料發熱量甚低可忽略不計。由於本研究試驗變數為環境溫度的影響，因此，本研究水化熱的量測項目如下：

(1) 混凝土於絕熱狀態下材料本身的水化溫度

發熱量的高低在使用相同型別卜特蘭水泥時，是卜特蘭水泥量多寡而定，因此影響卜特蘭水泥基質材料水化熱的主要因素為膠結漿「質」，表 4-1 和圖 4-1(b)各曲線所顯示的情況中可以看出，隨著水膠比為 0.24、0.32、0.40 與 0.56 時，其水化尖峰溫度分別為 49.7°C、47.9°C、43.2°C 及 38.5°C，且水化熱高峰出現時間分別為 12.9、13.8、15.2 和

14.8 小時，這說明水膠比的改變將影響卜特蘭水泥水化時的熱量，隨著水膠比越高，產生水化熱的卜特蘭水泥用量相對減少，且使得水化高峰出現時間往後延長。

在漿體用量方面，由表 4-1 和圖 4-1(c) 中水膠比 0.32 時可以看出，卜特蘭水泥用量隨著漿量厚度的增加而增加(ED3205、ED3225、ED3250)，在漿體用量厚度為 50 μ m(ED3250)之水化熱，其水化速度最快、溫度最高，這表示卜特蘭水泥在遇到水時，快速水化並放出大量的熱量，使得卜特蘭水泥膠體快速並雜亂無章的成長，這是相當不利於後期強度的發展，也意味著卜特蘭水泥初凝時間短和後期強度發展不易，且易因產生溫度差異而形成溫度裂縫等問題。

由 HFDMDA 與 ACI 在水膠比 0.4 時的水化熱來比較，如表 4-1 和圖 4-1(d) 所示，根據配比設計表 3-11 中可以看出，ACI 配比設計較 HFDMDA 多了 30 kg/m³ 的卜特蘭水泥量，單位拌合水量也多了近 20 kg/m³，相應下兩組的水化溫度差距不大。

(2) 受到環境溫度影響下混凝土之內部溫度

由圖 4-2(a) 中 ED2405 的曲線中可以看出，原先於絕熱狀態下溫度為 49.7°C 在受到環境溫度 60°C 影響下，其溫度在 8 小時時也提升至 60°C，這是因為混凝土內部水化時，本身的卜特蘭水泥用量也多且單位拌合水量少，材料本身在絕熱狀態下就有近 50°C 的高溫，再加上環境場持續供給熱量給混凝土，因此，混凝土內部溫度在上述兩種情況疊加熱量情形下，使混凝土內部溫度易上升至和環境相同。隨

著水膠比的提高，可以看出提升的溫度有限，雖然環境場持續供給熱量，但是材料本身隨著水膠比的提升，單位拌合水量越來越多，相對的提供熱量的卜特蘭水泥量逐漸減少，再加上混凝土並非在絕熱條件的情況下，也會散失熱能，所以才形成混凝土內部溫度無法繼續提升至與環境溫度相同的情況；由圖 4-1(b)和圖 4-2(a) 兩圖中比較配比 ED2405 這組溫度變化可以看出，在環境溫度為 60°C 的影響情況下，將使得混凝土內部較自身絕熱狀態溫度提高約 10°C 的溫度差。

圖 4-2(b) 中顯示在相同的水膠比下，隨著漿體量的增加，在受到環境溫度 60°C 的影響下混凝土內部水化溫度的情形，當漿體量越高，提供熱量的卜特蘭水泥用量也越多，也意味著混凝土將會更早達到環境溫度，對照圖 4-1(c) ED3250 的曲線可以知道混凝土的內部溫度在外在環境溫度影響下，漿體量為 50µm 之內部溫度只需 6 小時即可達到環境溫度。

圖 4-2(c) 中則表示 ACI 與 HFDMDA 所設計的水膠比 0.40 混凝土在受到環境溫度影響下之關係，整體來說兩者的水灰比(約 0.8)相當，因此，混凝土內部溫度也相當，但受限本身水化熱溫度原先就不高的情況下，環境果能給予的溫度並不會造成試體內部溫度與環境溫度相同。

在水膠比 0.24 時，受到不同的環境溫度影響，結果如圖 4-2(d) 所示，當環境溫度為 30°C 時，雖然混凝土本身所產生的水化溫度可達 49.7°C，但是受限於環境場比其溫度較低，使得熱量一直散失至環

環境場中，造成本身所產生的熱量無法蓄積在混凝土內部，因此，無法使水化溫度增加；在環境場為 90°C 時，混凝土內部溫度絕大部分是因為環境溫度而產生的熱量而提升，但由於混凝土本身亦會散失熱量，所以溫度並不相同。

當然，試體大小與置於環境場的時間也會影響混凝土內部之溫度，試體越大，熱量得以儲存蓄積，所能持續的溫度也越長；試體置於環境場越久，試體溫度也會逐漸受到影響，但是，以上因素並非本計畫內容所探討之範圍，故不加以深入討論。

二、初終凝時間

圖 4-3(c) 相同漿體用量不同水膠比與圖 4-3(d) 水膠比 0.32 且不同漿體用量中顯示，當混凝土在受到不同環境溫度(30、60、90°C)影響時，其凝結時間將因環境溫度升高而縮短，當環境溫度為 30°C 時，終凝時間普遍需要 5~10 小時；隨著環境溫度為 60°C 時，終凝時間僅需 3~5 小時，約略縮短凝結時間達 50% 以上。在圖 4-3(c) 可看出水膠比 0.24 這組受到不同溫度的凝結時間，在 90°C 的終凝時間約為 152 分鐘，與 60°C 的 165 分鐘相比，並沒有和 30°C 一樣減少 50% 以上的凝結時間，這是因為混凝土內部的膠體在受到一定的環境溫度下，會增快水化速率，但仍有其極限，實驗結果顯示，在環境溫度為 90°C 的條件下，水膠比 0.24 這組的初凝時間僅 90 分鐘，表示在混凝土初凝左右時受環境溫度卻時可以加快凝結時間，但是，之後由於卜特蘭

水泥快速水化影響，產生微觀組織雜亂，造成卜特蘭水泥核心更加不易，因此強度成長趨緩[27]。

ACI 設計的混凝土在水膠比 0.40 時，不管在哪個環境溫度下，其終凝時間皆較 HFDMDA 配比所設計之混凝土縮短約 10% 左右，如圖 4-3(a)(b) 中 ED4005 與 EA4050 直方圖所示，這是因為 ACI 配比設計的卜特蘭水泥較 HFDMDA 高 30 kg/m^3 的用量，所以水化膠體較 HFDMDA 之設計多；在受到環境溫度 60°C 時，兩者的凝結時間皆比常溫狀態下縮短約 50%。

總體來說，環境溫度越高與卜特蘭水泥用量越多確實會造成混凝土凝結時間的縮短，不利於日後混凝土耐久性與強度之發展[27]。

三、 抗壓強度

抗壓強度為混凝土安全性之重要指標，混凝土由拌合到澆置完成，整個施工流程將會影響到最終混凝土之抗壓強度品質，因此混凝土從拌合、施工、澆製、養護、外在環境等因素將會是影響強度之重要因素。本計畫針對不同配比按標準試驗程序製成之混凝土抗壓試體，然後將試體置於飽和石灰水中養護，並在齡期 3、7、28、56 與 91 天時進行抗壓強度試驗，然後分析評估不同配比混凝土強度的影響，其結果如表 4-2 所示。

圖 4-4(a) 各水膠比於不同齡期之強度曲線中顯示隨著水膠比越低抗壓強度越高，於齡期 28 天時之曲線中得知，水膠比 0.24 之强度高

達到 96.4MPa(14000 psi)，而水膠比為 0.56 之強度亦達 3000 psi 的普通強度範圍；但由齡期 3 天之強度中可以得知，水膠比為 0.56 的強度僅 6.6MPa (957 psi)，可想而知混凝土早期強度並不佳，若在此時受到外力作用下，容易使混凝土產生破裂或劣化。

當水膠比 0.32 時，漿體量 50 μ m 雖然在早期強度較漿體用量 5 μ m 者好，如圖 4-4(b) X 軸為漿體體積 0.434 與 0.34 上的點所示，但隨著齡期增加，則逐漸改變，這是因為在早期漿體量高之配比有較多的卜特蘭水泥用量(約多 140 kg/m³)，而有著較高之強度，但隨著齡期增長，雖然卜作嵐反應仍持續提供強度，但其膠體強度仍弱於粒料強度，而 5 μ m 配比的粒料較 50 μ m 配比多了 250 kg/m³，造成強度有所差異，而一開始高漿體量 50 μ m 提供較高強度的卜特蘭水泥則成長開始趨緩，因此，粒料間的多寡所影響的結果因而顯現。

觀察 ACI 與 HFDMDA 於水膠比 0.40 所設計的混凝土抗壓強度，可以由圖 4-4(c) ED4005 中看出早期強度優於 EA4050，但晚其強度發展差距縮小的結果中得到以下推論，由於 HFDMDA 則有較 ACI 多 135 kg/m³ 的粒料量，使得 ED4005 早期強度高，而 EA4050 有較多的漿體量(多 60 kg/m³)支撐混凝土晚期強度發展，因此，晚齡期時兩者間所提供的強度剛好相當。

四、長度變化量

長度變化為體積穩定性的指標，在乾燥環境下的長度變化，稱為「乾縮」，主因就是「水份的散失」，而主要乃卜特蘭水泥漿中的水分

蒸發而造成乾縮現象產生。乾縮裂縫的產生主要是由於混凝土內外水分蒸發程度不同產生差異變形導致不同的結果；混凝土受到外部條件之影響，表面水分損失過快，變形較大，內部水分損失慢，變形較小，較大的表面乾縮變形受到混凝土內部約束，產生較大拉應力而產生裂縫。相對濕度低，卜特蘭水泥漿體乾縮量大，乾縮裂縫也較容易產生。

本計畫長度變化量的試驗結果如表 4-3 所示，由圖 4-5(a)(b)的圖形中，水膠比越高和漿體用量越高的混凝土，乾縮量也越大，這和單位拌合水量的多寡有關，越高的用水量在乾燥的環境下，水分散失的越多，在水分散失的過程中造成混凝土的收縮變形；本試驗緻密設計法的結果在水膠比 0.40 時較一般傳統 ACI 設計的乾縮量至少減少了 15%的收縮量，如圖 4-5(c) 所示，這是因為堆積法的漿體用量皆少於 ACI 設計法，而粗細粒料用量也較多，因此，在水分少、粒料多的情況下，混凝土較能抑制收縮量的成長，對體積穩定性有益。

五、 混凝土超音波

混凝土超音波檢測為非破壞檢測的一種，可量測混凝土的內部否是有瑕疵，也可量測混凝土內部發展的緻密度，所以超音波波速會隨著齡期越來越大，也會隨著水膠比的下降超音波波速升高，而除了這些粗粒料、細粒料在混凝土中所看的比例也會影響到，粗粒料、細粒料越多則波速也越高，一般而言優良混凝土的超音波波速會大於 4000m/sec[27]。

本計畫設計的配比皆為優良混凝土，其超音波速皆滿足上述情形，由設計不同的變數條件下探討其結果，混凝土各配比於不同齡期之超音波速如表 4-4 所示。由圖 4-6(a) 中單看 3 天齡期的結果可看出隨著水膠比的增加，超音波速則較低，這是因為在緻密配比中，每一組的粒料比例(64.5%)相同的情況下，隨著水膠比的增加，膠結料量下降，相對的低密度的水量也會上升，換言之，水膠比越低則混凝土內部也越趨緻密。

圖 4-6(b)顯示水膠比 0.32 時情形，由曲線趨勢中看出當漿體量越高，超音波速則有越慢的情形，原因是混凝土漿體用量越多，相反的，高密度的粗細粒料用量減少，造成超音波速較低漿體用量的低。緻密堆積法與傳統的取代法相比，也是相同原因，因此 ED4005 的超音波速較 EA4050 更佳，圖 4-6(c)。

總體而言，齡期之增加，超音波速也逐漸上升，表示混凝土內部因水化反應越來越緻密，由本計畫所設計的配比可以看出水膠比與漿體量越低者，超音波速有較佳的結果。在水膠比為 0.24 時，合乎前期計畫[22]之超音波速實驗結果，皆具有較佳的耐久性。

六、 混凝土表面電阻

混凝土表面電阻為耐久性指標之一，也可測混凝土的表面抗滲性，原因為影響混凝土電阻最大因素為混凝土為表面微觀結構的緻密程度，當混凝土表面緻密程度越高則孔隙越小，電通路變長，混凝土表

面電阻提高，外界劣化因子越不容易進入混凝土內部，一般如果 56 天的混凝土電阻值大於 20KΩ-cm則認為優良之不易受侵蝕之混凝土 [27]，而本計畫所設計之混凝土皆遠優於標準。

混凝土各配比電阻之試驗結果列於表 4-5。由實驗結果可以看出，在同樣的漿體量情況下，水膠比越低，單位拌合水量越少，卜特蘭水泥漿的品質越好，使表面結構越緻密，見圖 4-7(a)；在相同水膠比時，漿體量越多，表示單位拌合水用量越高，而使混凝土緻密性較弱，甚至比高水膠比的結果更差，圖 4-7 (b)；緻密配比設計的表面電阻結果也優於傳統取代法。

當水膠比為 0.24 時，合乎前期計畫 [22] 之電阻實驗結果，在前期計畫中電阻值稍低於本期之值，這是因為前期計畫中配比有添加鋼纖維，造成導電率增加，至使電阻值稍低，但皆遠大於 20KΩ-cm，皆無鋼筋腐蝕之疑慮。

七、 混凝土氯離子滲透

混凝土的滲透性為耐久性的重要的性質之一，混凝土的滲透性反應出混凝土內部孔隙的大小、數量及路徑連通等情況，水密性越低者表示外界劣化因子會較難以入侵，由於氯離子較水分子小，因此，利用氯離子量測滲透量更能表現混凝土的水密性與防蝕性，根據 ASTM C1202 當混凝土在 91 天時電滲量在 2000 庫倫以內則表示混凝土發生腐蝕的機率低 [27]，而本計畫設計的混凝土皆低於 1000 庫倫，屬於發生腐蝕的機率非常低的等級，其數據整理至表 4-6。

圖 4-8(a)中顯示混凝土於齡期 91 天時的電滲值，隨著水膠比和漿體厚度的增加，氯離子滲透量越高，這是因為混凝土隨著單位拌合水量與漿體量越多，高密度的膠體與粒料量就越少，試體內部出現微孔隙的機會增加，進而使氯離子滲透性增大。也可看出緻密堆積的滲透率較取代法有更好的抗滲性。且由直方圖中可看出緻密堆積法較傳統取代法有著更佳的抗氯離子滲透性品質。

根據氯離子滲透與表面電阻的試驗結果，其相互關係由圖 4-8(b)(c)中看出，從中得到一結論，混凝土設計時，越高的水膠比與較多的漿體量，電阻值較低而氯離子滲透值越高，成反比現象，故混凝土多水多漿的配比勢必將影響混凝土整體的耐久性。

八、 混凝土吸水率試驗

混凝土中之孔隙及其連通性、裂縫及水化程度等皆會影響對混凝土之吸水率。吸水率試驗係指混凝土在一定時間內或是達飽和狀態下，測定混凝土所能吸水的總量，吸水率量測的目的在評估水分子由外界進入混凝土試體的能力。本計畫可藉由吸水率高低來評估黏結料內部孔隙結構特性，吸水率越高者表示外界有害物質越容易侵入混凝土，因而造成混凝土耐久性不佳。吸水率越高，表示水分子進入越多，進而推測內部孔隙越多，實驗結果如表 4-7 所示。

由實驗結果可看出，見圖 4-8 所示，混凝土各配比的吸水率隨著齡期越長而降低，這是因為混凝土內部膠體隨著齡期而增長，將原先

內部孔隙逐漸填滿的原因；水膠比越高，所需的用水量越高，而在新拌時水所占的空間，因膠體水化作用影響而逐漸空出，造成混凝土內部孔隙變多，吸水率也就提高；漿體用量越高，亦為相同情況，再加上漿體用量越多，粗細粒料用量就越少，而膠結料密度不如粒料般緻密，所以漿體用量越高，吸水率也就會越高；緻密設計法因粒料量較多、膠結料品質較佳與單位拌合水較少等因素，因此，吸水率皆較傳統設計法更低。

由圖 4-8(d)表示混凝土於齡期 91 天時吸水率與氯離子滲透之關係，吸水率越高，氯離子滲透性也越大，兩者成正比現象，這是因為混凝土在受到氯離子侵入時，內部孔隙越多，越容易使氯離子滲透通過，不利於鋼筋混凝土的防蝕性。

九、 硫酸鹽侵蝕

當混凝土靠近含有高硫酸鹽類區時容易遭受硫酸鹽侵蝕，且混凝土緻密性不佳時，容易遭受硫酸鹽類入侵，硫酸鹽類入侵混凝土後會與混凝土中的氫氧化鈣結合形成石膏，造成膨脹反應，進而與混凝土中的單硫鋁酸鈣結合形成鈣鉍石，並且產生鈣鉍石膨脹反應，而使混凝土產生龜裂劣化。本計畫將試體浸泡於石灰水養護 28 天後，以飽和硫酸鈉溶液中浸泡 30 次循環後，量測其重量損失，並觀察期損壞現象。

由圖 4-9 中可以看出，在本計畫所設計的混凝土配比在重量改變

率變動很小，ED5605 和 EA4050 兩組的混凝土在受到硫酸鹽侵蝕下的重量變動率稍高，重量呈現成長的情形，這是因為原先混凝土的內部有較多的孔洞，見表 4-7 吸水率，在硫酸鹽入侵後在其孔隙中結晶，而逐漸使是體重量提升，再加上混凝土的品質優良，不但沒有造成試體損壞，如圖 4-10、圖 4-11，還較同齡期混凝土的強度普遍高出 10% 以上，而 ED5605 這組更高出近 60% 的強度，這是因為高水膠比的配比有著較多的單位拌合水，使得原先內部孔隙較多，而硫酸鹽侵蝕試驗中，其硫酸鹽晶體則逐漸填滿內部孔隙，因而使強度增加，如表 4-2、圖 4-4(d) 所示。

總體而言，本計畫所使用的緻密設計法在相同漿體用量情況下，其粗細粒料用量皆相同(占混凝土體積 64.5%) [5]，而水膠比越高，表示單位拌合水用量越多，產生的缺陷也會越多，因而在混凝土性質試驗中，水膠比越低的性質皆有較佳結果；當相同的水膠比 0.32 時，漿體用量增加，雖然膠體用量越高，但相對的也壓縮到粗細粒料的用量，正常情況下，粒料的材料性質優於膠結料，也可以說試粒料用量越多，相互間堆積的越緊密，在性質試驗中即有較好的結果；緻密堆積法的吸水率較 ACI 法低的原因是因為，傳統取代法的配比設計粗細粒料的用量並不像 HFDMDA 以真實粒料堆積結果計算而得，而是依照查表或查圖的經驗公式，造成單位粒料用量就少了近 100 kg/m^3 ，加上 HFDMDA 有使用尺寸極小的卜作嵐材料-矽灰，更使原先混凝

土內部的孔隙可以更小的奈米材料填充，使得粒料間的更佳的緊密，因此，在相同的水膠比下，混凝土的性質試驗，HFDMDA 所設計混凝土，在性質試驗時皆有較好的結果。

十、音聲(AE)技術於混凝土新拌時之驗證

文獻[27]中指出溫度會影響混凝土一開始的硬固性質與耐久性，本計畫將混凝土新拌時置於環境溫度場，並利用音聲技術所量測的結果加以分析，並與文獻加以驗證，以了解混凝土受到溫度影響下是否會產生微裂縫，因而造成日後耐久性不佳的原因。

圖 4-12、4-13、4-14 及 4-15 的表示方式為同時將環境場溫度、混凝土受環境溫度影響之內部溫度改變情形以及在環境場下混凝土初終凝時間，並加上 AE 訊號發生的時間，同時顯示混凝土未受環境場影響的絕熱水化溫度其整合之圖形是為了瞭解混凝土在受到溫度影響時，可以明確得知其相互關係；若能搭配受環境溫度影響之試體內部第一階段最高溫發生時間，與絕熱狀態下，水化熱最高溫時間，在加上原始溫度，畫出兩個三角圖形，即可了解兩種溫度下的溫度梯度，如圖 4-12(b)三角形(標示 1)之斜率差。

(一)不同環境溫度影響下

由表 4-8、圖 4-12 中顯示的配比為 ED2405 的混凝土，分別受到不同環境溫度(30、60、90°C)影響下的情況。圖 4-12(a)乃位於環境溫度 30°C 的情形，可以看到在受到環境溫度影響下，混凝土內部原本

應該能產生較高的水化溫度，因熱量無法聚積而散失置環境場中，使得溫度實際上只有接近環境場 30°C 之溫度而已，由音聲技術檢測下，可以看出 AE 訊號只出現在初凝前與終凝後，這是因為混凝土與環境溫度接近，溫度梯度並不大，而降低溫度裂縫的產生，與文獻驗證結果，此時機發生的訊號乃塑性收縮與自體收縮造成。圖 4-12(b)則是位於 60°C 的環境場中，由 AE 檢測中，可以明顯看出 AE 訊號明顯集中在終凝後，這是因為水膠比 0.24 在早期水化時，受溫度影響膠體快速成長，使得凝結時間縮短，早期時強度即顯現，而使得混凝土在受到環境溫度下影響時，有較高的強度可以抵抗溫度裂縫的產生；但是隨著混凝土內部溫度一直增加，由圖形中可以看出在 8 小時的水化溫度即可達到 60°C，與原先材料絕熱的水化最高溫度 13 小時相比，足足提早了 5 個小時，也就是說，根據圖形中 1 號三角形的斜率與 2 號三角型斜率於 8 小時時，內部的溫度梯度差距過大，致使溫度應力也逐漸增加，而混凝土此時強度已無法抵抗此應力，而開始顯現訊號；受環境溫度影響下 60°C 影響下，可以得知水膠比 0.24 且漿體用量 5 μ m 的混凝土發生的訊號時機點與文獻印證後，得知會出現自體收縮與乾縮兩種裂縫型態。圖 4-12(c)為溫度 90°C 影響之情況，實驗中發現 AE 訊號發生點皆為初凝前至終凝這段時間，綜合第 4 之 2 節實驗結果及溫度梯度(三角形斜率)中得知，混凝土在未達到一定強度時，因外在溫度影響，產生的溫度梯度過大，造成混凝土內部產生了溫度裂縫，由文獻中印證得知此乃自體收縮或乾縮所產生之裂縫。

因此，由表 4-8 可以知道，在同樣的配比下受到不同的環境溫度，混凝土內部所發生的情況有所不同，當混凝土本身的水化溫度高於環境溫度時，基本上混凝土不太會發生 AE 訊號，這是水化熱量一直散失置環境場中，而兩者溫度差過小的原因；但是隨著溫度增高，溫度應力開始蓄積，當水化溫度與環境場相近時，則會受到時間的影響，因為溫度應力不斷的增加，最後混凝土本身能無法支撐此開裂強度，從而發生裂縫，但是卻也使劣化發生的時間延後產生；當兩者溫度差距過大時，溫度梯度也越大，混凝土內部在膠體尚未有足夠的強度可以支撐的情況下，產生溫度應力的情況就會大增，造成裂縫發生的時間提前。總而言之，環境場溫度越高，發生 AE 訊號的時間將會提前，由原先的自體收縮和乾縮的裂縫型態提前形成塑性收縮之微裂縫；而根據文獻[27]中提到，塑性收縮所產生之裂縫比乾縮與自體收縮的影響更大，因為塑性裂縫發生時，混凝土屬於新拌狀態，此時容易產生貫穿性的裂縫型態，不利結構體的安全性及耐久性。

(二)不同水膠比之影響

圖 4-13 中表示在同樣的漿體用量(5 μ m)下，不同水膠比在受環境溫度 60°C 的影響。比較圖 4-13 (a)(b)(c)(d)圖形中星星符號的位置，發覺最大的差異性在於 AE 訊號發生的時間點不同，如表 4-9 所示，隨著水膠比的增加，AE 訊號所發生的時間點逐漸往前推移。由圖 4-13 (a)(b)的三角圖形中可以看出，ED2405 和 ED3205 AE 訊號的時機點約略在內部溫度出現在第一高峰時出現，推測原因是原先水化溫度與

受環境溫度影響，兩者間的溫度梯度差過大，本身的抗張強度已無法抵抗溫度應力，因而產生 AE 訊號；由文獻中可以知道，這可能為混凝土自體收縮與乾縮生成之微裂縫所造成。

由各圖形與**第 4 之 2 節**中可以看出，在受到相同的環經溫度下，隨著水膠比的增加，初凝的時間也隨著延後，混凝土本身內部膠結料若無法提供抵抗溫度應力的強度時，就會發生 AE 訊號提早出現之現象；根據**第 4 之 3 節**提到，當齡期越短時，混凝土所提供的強度也就越低，特別是水膠比越高的情況更是明顯，ED5605 於 3 天齡期時抗壓強度仍不到 1000 psi，可以推想在抗張力為十分之一抗壓強度的狀況下(約 100 psi)，其抵抗張力裂縫的能力也非常不足；根據**圖 4-13(c)(d)**星星符號的時間點可以知道，ED4005 與 ED5605 兩組配比受環境溫度 60°C 的影響下，所出現的 AE 訊號皆為初凝前，此時所出現的微裂縫乃塑性收縮所造成。隨著時間增加，混凝土內部溫度也開始上升，雖然高水膠比的內部溫度與環境溫度差很大，由於微裂縫早已經發生，而溫度應力也不足以產生更大的應力使裂縫深度延伸或增加時，其發生裂縫的機率也就下降；但是低水膠比此時仍繼續抵抗溫度所產生的張應力，隨著溫度應力不斷的蓄積，在內部強度無法抵抗其應力時，仍造成微裂縫的產生。

綜合以上分析，可以了解，混凝土配比隨著水膠比的改變，在受到同樣的溫度場下，水膠比越高，凝結的所需的時間越長，抵抗力出現的時間就越晚，裂縫發生時間也就會越早，但是隨著時間拉長，原

先弱面區皆已發生微裂縫，在溫度應力不足以抵抗強度且裂無可裂的情況下，發生劣化的情況就會減少；而高強度的配比則是受到溫度應力不斷的增強，而使得微裂縫發生的時機得以延長。換言之，水膠比 0.40 以上時，所發生的微裂縫乃塑性收縮所造成，而水膠比 0.32 以下時，發生的微裂縫為自體收縮與乾縮所產生。

(三)不同漿體用量之影響

圖 4-14 之圖形為水膠比 0.32 時，不同漿體用量(5、25、50 μm) 在受到環境溫度 60 $^{\circ}\text{C}$ 影響的情形。由**表 4-9**ED3205、ED3225、ED3250 三格中得知，隨著漿體用量增加，AE 訊號發生的時間點也會提前；從**圖 4-14(b)**中顯示，在漿體用量為 25 μm 時，AE 訊號並未發生，這可能的原因是混凝土內部當受到張應力時，膠體適時的生成，從而提供較佳的強度，使其能抵抗溫度場所產生的溫度應力，而達到一個平衡點；由**圖 4-14(a)(b)**中星星符號之時機點比較，漿體用量為 50 μm 時，雖然發生訊號的時機點較 5 μm 晚，但因為本身漿量較高，粒料用量較 25 μm 少 130 kg/m^3 ，在多漿體的情況下，仍無法抵抗溫度造成之張應力所產生之裂縫。

漿體用量的改變亦會受到外部溫度的影響，漿體用量越多，產生微裂縫產生的機率越高，但普遍少於漿體量較少的混凝土，且得以延緩微裂縫出現時機，特別的是，由本實驗終在漿體用量為 25 μm 時，其本身產生的強度將會適時並足夠抵抗因溫度梯度所產生的張應力；而本組出現之訊號皆屬混凝土自體收縮與乾縮所生成。

(四)不同配比設計方法之影響

由表 4-9 ED4005 與 EA4050 兩格中與圖 4-15 星星符號中得知，在不同設計法的情況下，緻密設計與 ACI 設計法因水膠比為 0.4 的情況下，發生的時間皆在終凝前，同屬塑性收縮所產生，但是由表中可以看出緻密設計的混凝土在受到溫度作用下，AE 訊號發生的時間得以支撐至初凝後，這是因為 HFDMDA 的粒料用量較 ACI 的高，在初凝強度尚未出現時，唯一能抵抗張力裂縫的則為粒料間因堆積效應所產生的強度；在微裂縫發生時，HFDMDA 雖然和 ACI 法一樣無法抵抗張應力，但是隨著初凝出現後，仍有一定的強度抑制裂縫繼續發展與延伸，而 ACI 的試體仍未產生足夠的強度，產生塑性裂縫；隨著溫度應力逐漸的蓄積，最後 HFDMDA 的混凝土仍無法抵抗，所以造成 AE 訊號置稍晚仍產生；相對的 ACI 設計法的混凝土微裂縫面積已有較大且溫度應力已無得以延伸裂縫的能力，所以使得知後皆無訊號產生。

綜合以上所有結論，分析出以下之結果：

1. 在相同的配比下，環境溫度越高，試體內部產生收縮裂縫的時機點會越早發生。
2. 當水膠比越低時，AE 訊號產生在終凝後，在混凝土終凝後所發生的裂縫，主要為自體收縮與乾縮造成，換言之，當水膠比越低時

自體收縮發生的機率越高。

3. 水膠比越高，AE 訊號發生在初凝前，乃是混凝土塑性收縮所產生的裂縫，換言之，水膠比越高，塑性收縮的機率越大。
4. 在漿體用量 $5\mu\text{m}$ 與環境溫度 60°C 的情形下，水膠比越高，劣化的時機點將會提前；而水膠比越低者則會延緩裂化發生的時間。
5. 在水膠比高 (>0.40) 的情況下，受環境溫度 60°C 影響，其劣化發生時機為初凝前，之後發生的機率降低。
6. 高水膠比 (>0.40) 受到環境溫度 60°C 影響時，所產生之訊號乃塑性收縮所造成。
7. 水膠比 <0.32 時之配比，因混凝土自體收縮與乾縮原因所生成的微裂縫。
8. 當水膠比為 0.32 時，漿體用量越高，劣化的時機得以延緩；在漿體用量為 $25\mu\text{m}$ 則可以與環境溫度 60°C 所產生的溫度應力相互抵抗，微裂縫不易產生。
9. HFDMDA 與 ACI 法在受到環境溫度 60°C 的作用下，發生劣化的時機皆在初凝前，因水膠比皆為 0.4 ，故皆為塑性裂縫，但是緻密堆積法因本身粒料較多的關係，得以使微裂縫發生時間延緩並拉長。

十一、 螢光漆探傷法

以螢光漆探傷法之試驗結果如圖 4-16、4-17、4-18 所示，分為方

形塊體與長條形試體兩種型態。

(一)不同溫度場之影響

由圖 4-16 中的 ED2405 中看出，受不同環境溫度(30、60、90°C)影響，其混凝土表面裂縫型態也有所不同；方塊試體表面在環境溫度改變的影響下，其裂縫逐漸增加，且裂縫深度也隨之加深，這是受到溫度應力影響而產生的裂縫，配合第 4 之 10 節中敘述可以了解混凝土在 90°C 時出現的裂縫乃塑性收縮所造成，而 60°C 的則為自體收縮與乾縮之影響。由長條形試體可看出，在環境溫度為 30°C 時，裂縫較 60°C 明顯，由 ED2405 30°C 的圖形中可以看到裂縫皆平行長向方向，其原因可能為混凝土本身之溫度高於環境溫度，但熱量無法蓄積而散失置環境場中，帶動內部水分散失，再加上試體形狀為長條形，左右兩變的應力受到束制無法分散，產生較大的應力能量，連動影響混凝土表面裂縫形成。

總之，混凝土在受到越高的環境溫度場時，裂縫出現的比例增加且深度更深，更可能會對其結構型態產生貫穿型裂縫，不得不注意。

(二)不同漿體用量影響

由圖 4-16 與圖 4-17 中的 ED2405、ED3205、ED4005、ED5605 等圖片看出，在同樣受到環境溫度 60°C，隨著隨膠比的提升，裂縫也逐漸增多加深，這是因為每組單位拌合水量相差了 20 kg/m³，而水量越多在溫度影響時，散失量也越多，進而促使裂縫生成；由圖片 ED4005 與 ED5605 中看到裂縫相當明顯，這是因為此裂縫為塑性收

縮所造成，是在混凝土尚未有強度可抵抗前出現的裂縫，所以看起來較深較明顯。為了避免塑性裂縫的產生或裂縫過多，在混凝土配比中，宜採用較低的水膠比做配比設計。

(三)不同漿體用量影響

由圖 4-16 與圖 4-17 中的 ED3205、ED3225、ED3250 等方形試體影像看出，在同樣受到環境溫度 60°C，ED3250 的裂縫明顯較其它兩者更深、更多，這是因為 50 μ m 的單位拌合水量較多，在受到溫度影響時，散失至環境場的機率也增大，也將影響裂縫數量的增加；ED3225 的照片搭配圖 4-14(b) 圖片顯示，雖然 AE 系統並未接收到訊號，但試體表面實際上仍有裂縫產生，這是因為在 AE 檢測時，AE 感測器黏貼至試體表面，對微裂縫產生束制作用，而產生的溫度應力並不足以使其開裂，故 AE 檢測時，並無 AE 訊號產生，但仍可說明，在水膠比 0.32 且漿體用量 25 μ m 中，只要改變些許的變數，也許是漿體用量的增加或減少，即可有較佳的強度抵抗 60°C 所產生的溫度應力。由圖片顯示可明顯得知一結果，漿體用量越多，受到溫度影響下，出現裂縫的機會將增多。在長條試體中 ED3250 的裂縫型態與邊界成夾角延伸，這是因為在長條試體中，長向具有邊界效應，而 ED3250 在裂縫產生前，已具有一定的抗張強度，但隨著環境溫度持續影響，最終使裂縫朝較弱的兩旁出現。

(四)不同配比設計方法之影響

圖 4-17 中的 ED4005 與 EA4050 的圖像可以明顯看到由 ACI 所

設計的EA4050裂縫較ED4005寬且深，這是因為在塑性裂縫產生時，ED4005的粒料體積占總體積的64.5%，而EA4050僅占59.4%，因此，HFDMDA有較多的粒料可以抑制溫度應力所造成的裂縫。

(五)比較 HIC 配比

由圖 4-18 中的 ED2405 與 ED240515(HIC 配比)可以看出，在同樣受到 60°C 作用時，兩者表面所生成的維裂縫皆非常微小，這是因為兩組配比皆為 0.24 的低水膠比，在易蒸散的水分少的情況下，使得表面不致出現明顯裂紋；增加鋼纖維在新拌時的影響似乎不大，經由觀察，裂縫也並沒有隨著鋼纖維延伸破裂，這是因為 HIC 所使用的鋼纖維與混凝土收溫度影響的膨脹係數相當接近，並不會受溫度而有所影響。

綜合以上分析結果得知以下結論：

1. 在相同配比下，裂縫會隨著環境溫度提升而增加，且裂縫寬度也會加大。
2. 在不同水膠比受到相同環境溫度時，水膠比越高，其水分散失的越多，造成裂縫數量增加。
3. 在水膠比 0.4 時，HFDMDA 的混凝土較 ACI 設計的混凝土表面裂縫較淺。
4. 塑性收縮的裂縫明顯在乾燥收縮與自體收縮的裂縫深且寬。
5. HIC 添加鋼纖維時，在受到溫度影響下，並不會造成裂縫缺陷的

產生。

6. AE 可以合理偵測裂縫形成之時機點，是一有效之先進技術。

表4-1常溫絕熱狀態下混凝土水化溫度

	W/B	水化溫度尖峰值	
		溫度(°C)	時間(小時)
ED2405	0.24	49.7	12.98~14.20
ED3205	0.32	47.9	13.80~15.46
ED3225		51.6	14.42~15.37
ED3250		57.8	12.52~13.53
ED4005	0.40	43.2	15.28~16.72
EA4050		46.3	16.1~17.41
ED5605	0.56	38.5	14.83~15.49

表4-2混凝土各齡期之強度

強度 (MPa)							
試體編號	W/B	3 天	7 天	28 天	56 天	91 天	硫酸鹽 30 次
ED2405	0.24	53.9	74.8	94.8	96.4	102.0	107.5
ED3205	0.32	32.4	53.2	74.9	79.8	82.9	94.6
ED3225		36.2	50.5	72.3	80.3	81.0	92.1
ED3250		36.4	48.9	69.7	75.7	76.4	84.1
ED4005	0.40	20.7	35.8	56.0	62.7	66.8	78.8
EA4050		19.5	30.1	52.8	59.7	67.6	76.9
ED5605	0.56	6.6	13.5	26.8	33.4	39.5	63.1

表4-3混凝土乾縮值

乾縮量(%)							
試體編號	W/B	1 天	4 天	7 天	14 天	28 天	56 天
ED2405	0.24	-0.006	-0.014	-0.021	-0.033	-0.039	-0.042
ED3205	0.32	-0.006	-0.018	-0.025	-0.034	-0.044	-0.050
ED3225		-0.009	-0.020	-0.026	-0.033	-0.041	-0.055
ED3250		-0.003	-0.017	-0.028	-0.045	-0.053	-0.058
ED4005	0.4	0.000	-0.012	-0.024	-0.036	-0.047	-0.048
EA4050		0.002	-0.019	-0.036	-0.057	-0.066	-0.072
ED5605	0.56	0.003	-0.010	-0.025	-0.039	-0.051	-0.056

表4-4混凝土各齡期超音波波速

超音波波速 (m/sec)						
試體編號	W/B	3 天	7 天	28 天	56 天	91 天
ED2405	0.24	4514.5	4610.1	4715.8	4744.3	4816.9
ED3205	0.32	4360.8	4500.4	4661.0	4682.5	4716.9
ED3225		4237.0	4400.9	4531.3	4599.3	4676.4
ED3250		4207.7	4298.2	4391.6	4432.9	4507.2
ED4005	0.4	4084.1	4315.5	4524.9	4613.3	4662.4
EA4050		3941.6	4152.8	4427.8	4520.9	4597.0
ED5605	0.56	3576.7	3840.9	4228.1	4335.1	4424.6

表4-5混凝土各齡期之電阻值

電阻 (kΩ-cm)						
試體編號	W/B	3 天	7 天	28 天	56 天	91 天
ED2405	0.24	10.7	26.5	260.3	379.5	489.3
ED3205	0.32	6.7	16.3	159.8	263.3	398.5
ED3225		5.6	10.3	122.3	178.5	234.5
ED3250		5.1	8.9	98.7	141.1	192.5
ED4005	0.40	4.9	11.2	101.1	180.3	252.8
EA4050		4.2	6.7	40.0	71.8	110.8
ED5605	0.56	3.7	7.1	57.5	132.2	223.3

表4-6混凝土各齡期之氣離子滲透值

電滲 (庫倫)				
試體編號	W/B	28 天	56 天	91 天
ED2405	0.24	134.55	229.5	268.2
ED3205	0.32	321.3	194.4	298.8
ED3225		477.9	472.5	445.5
ED3250		576	648.9	477.9
ED4005	0.40	436.5	507.6	362.7
EA4050		906.75	881.1	526.9
ED5605	0.56	730.8	684.9	666.9

表4-7混凝土各齡期之吸水率

吸水率%				
試體編號	W/B	28 天	56 天	91 天
ED2405	0.24	0.51	0.40	0.48
ED3205	0.32	0.75	0.57	0.70
ED3225		0.87	0.70	0.81
ED3250		1.03	0.83	0.99
ED4005	0.40	1.09	0.78	0.91
EA4050		1.22	1.30	1.06
ED5605	0.56	1.80	0.93	1.44

表4-8 ED2405於不同溫度場下AE訊號產生時間點

溫度	30°C		
組別	AE 訊號產生時間		
ED2405	初凝前	初凝後終凝前	終凝後
	◎		◎
	60°C		
	初凝前	初凝後終凝前	終凝後
		◎	◎
	90°C		
	初凝前	初凝後終凝前	終凝後
	◎	◎	

註:◎AE 訊號發生處

表4-9混凝土各組於60°C溫度場下AE訊號產生時間點

溫度	60°C		
組別	AE 訊號產生時間		
	初凝前	初凝後終凝前	終凝後
ED3205	◎		◎
ED3225			
ED3250	◎		◎
ED4005	◎	◎	
EA4050	◎		
ED5605	◎		

註:◎AE 訊號發生處

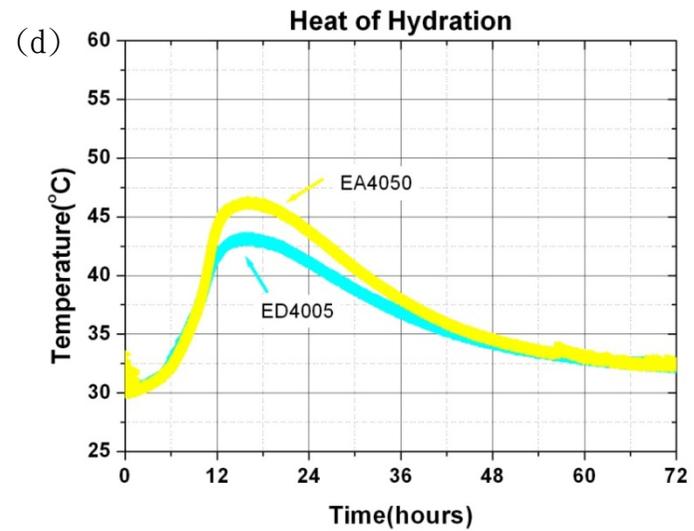
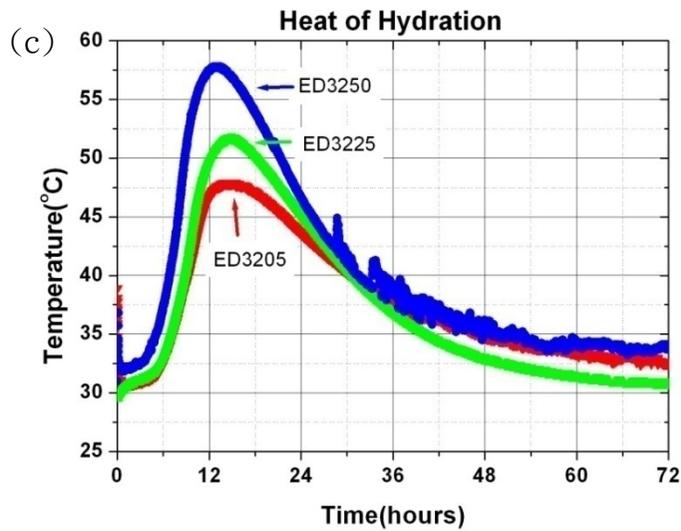
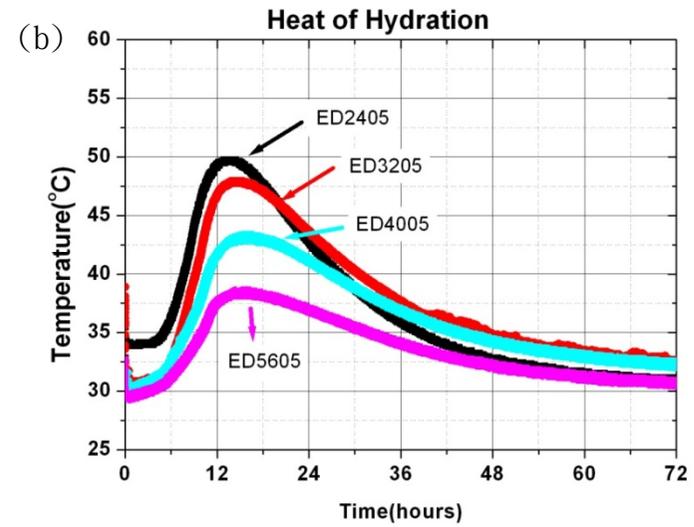
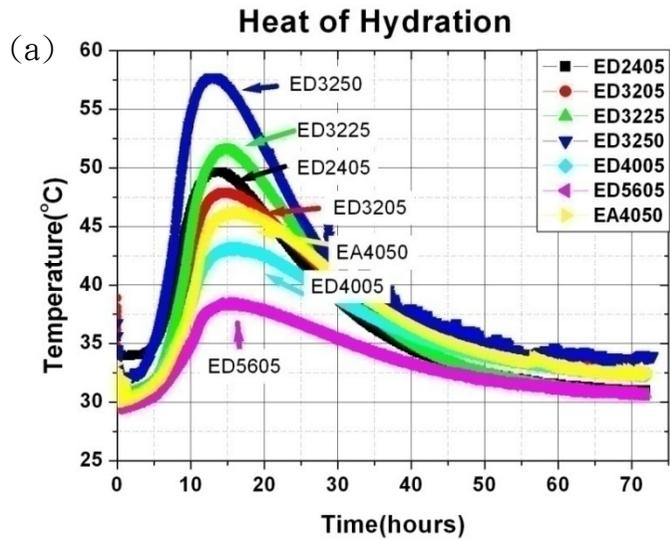


圖 4-1 混凝土於絕熱狀態下之水化溫度(a)各組配比之水化溫度(b)漿量厚度 5 μ m 之不同水膠比(c)水膠比 0.32 之不同裹漿厚度(d) 水膠比 0.4 之

HFDMDA 與 ACI

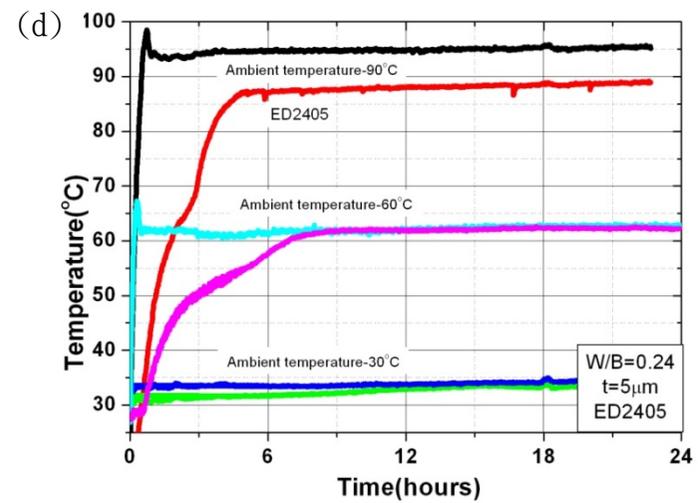
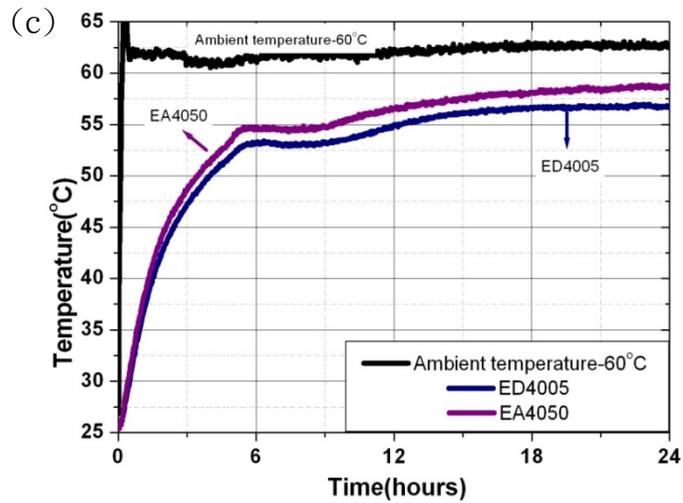
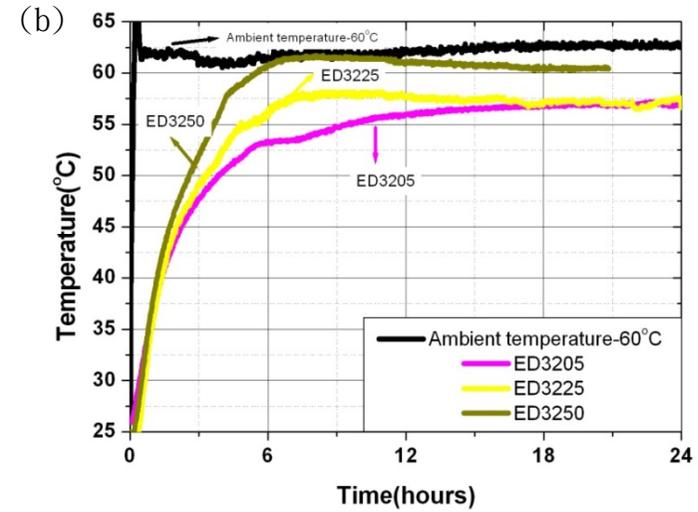
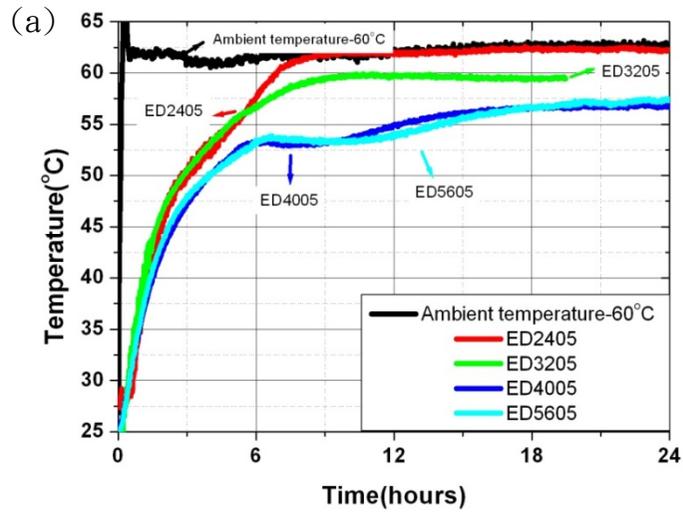


圖 4-2 混凝土於各環境溫度下之水化溫度(a)各水膠比於 60°C 環境下(b)不同漿量厚度於 60°C 環境下(c)水膠比 0.4 之 HFDMDA 與 ACI (d)ED2405 於 30、60、90°C 環境下

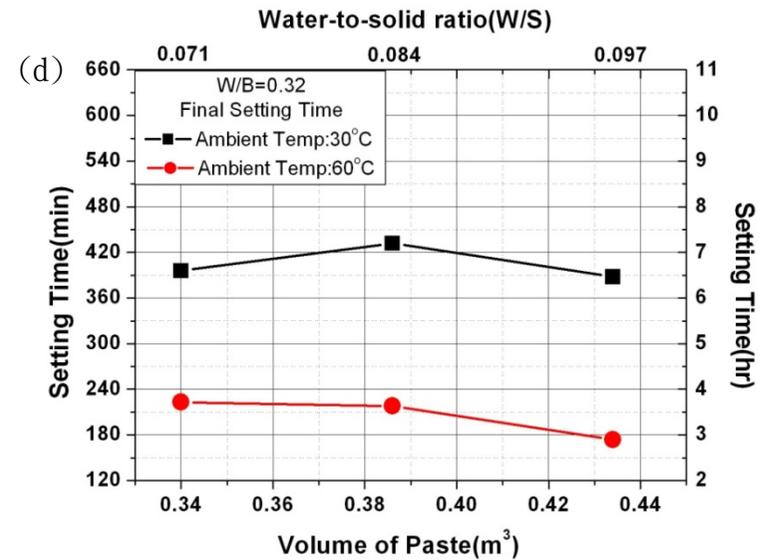
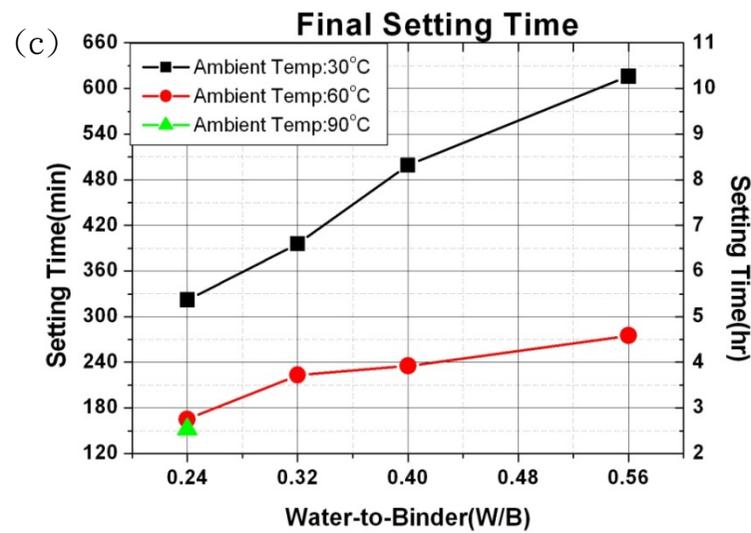
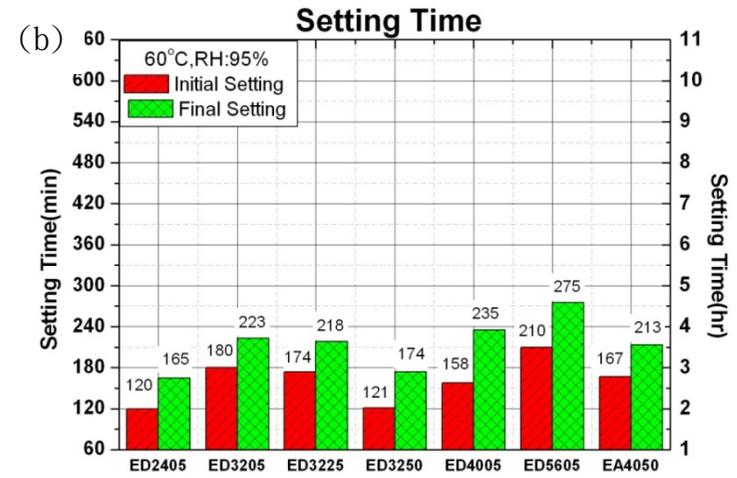
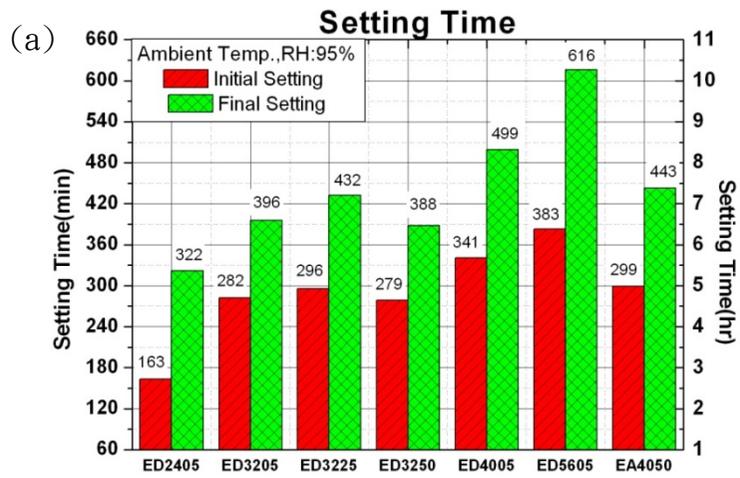


圖 4-3 混凝土於各環境溫度下之凝結時間(a)各組配比於 30°C 環境下(b)各組配比於 60°C 環境下(c)各水膠比於 30、60、90°C 環境溫度下(d) 各漿體厚度於 30、60、90°C 環境溫度下

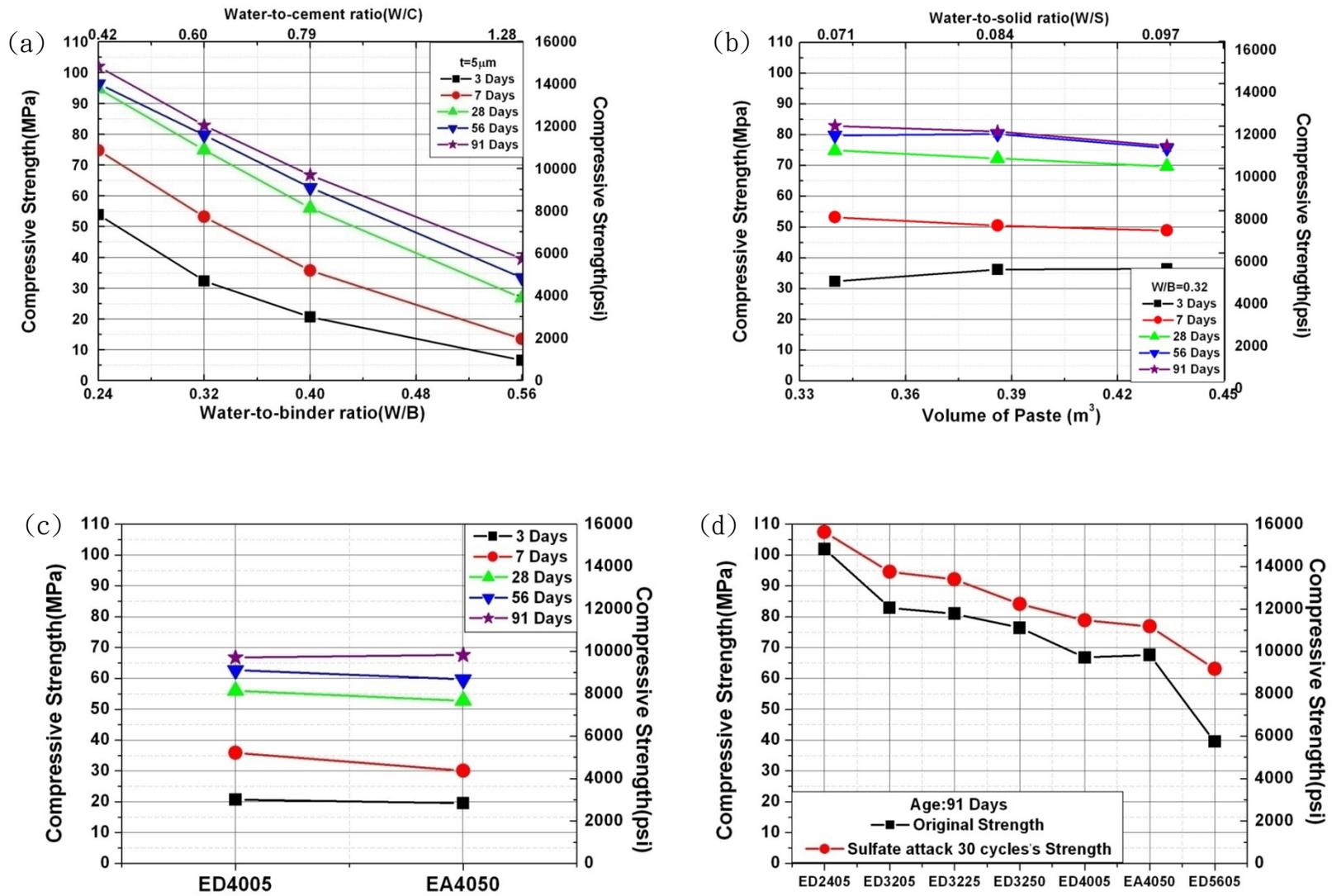


圖 4-4 混凝土各齡期之強度(a) $t=5\mu\text{m}$ 之各水膠比(b) $W/B=0.32$ 之各漿體厚度(c) $W/B=0.4$ 之 ACI 與 HFDMDA 配比(d)齡期 91 天之原始強度與硫酸鹽侵蝕 30 次強度比較

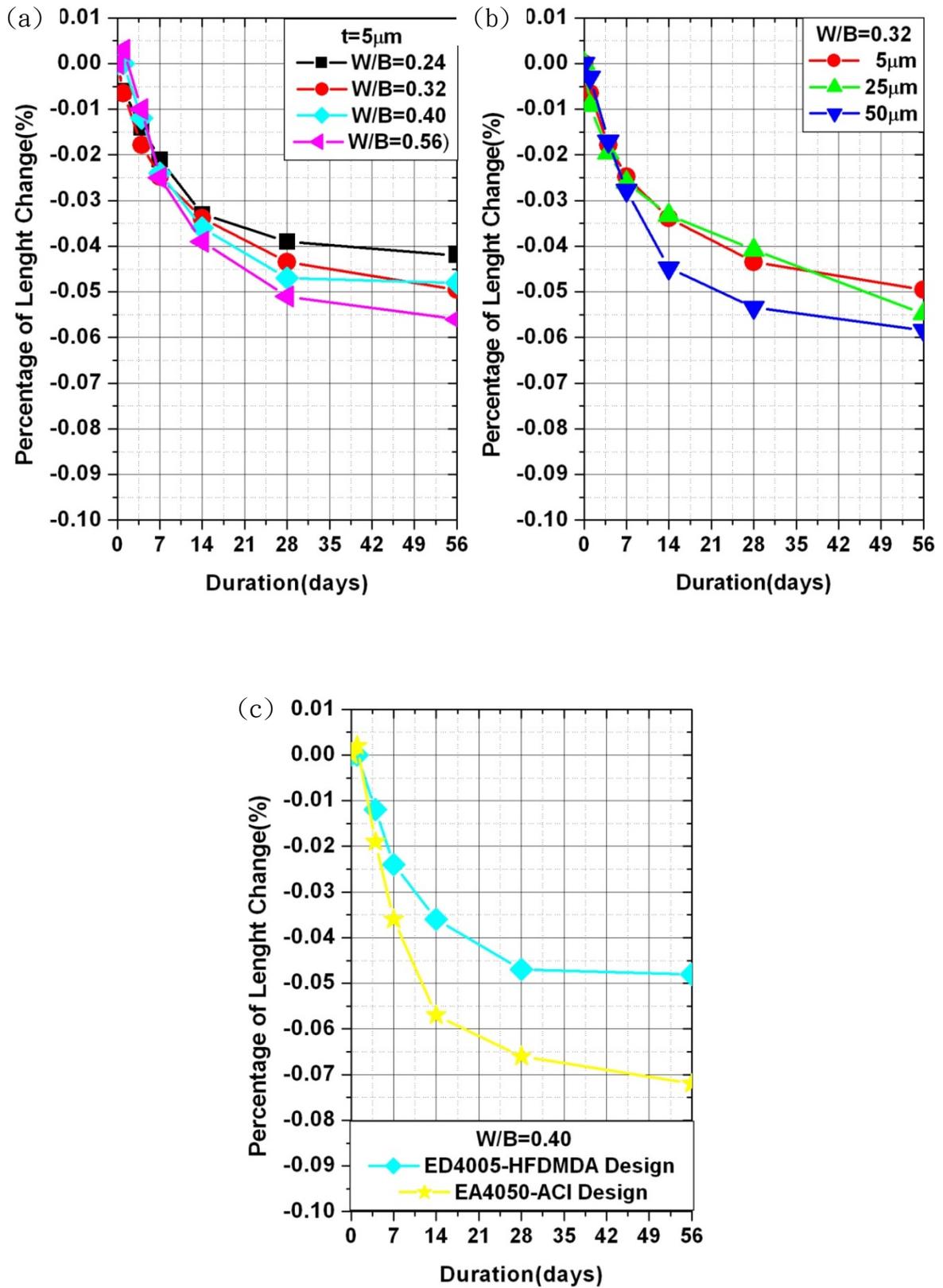


圖 4-5 混凝土各齡期之長度變化量(a) $t=5\mu\text{m}$ 之各水膠比(b) $W/B=0.32$ 之各漿體厚度(c) $W/B=0.4$ 之 ACI 與 HFDMDA 配比

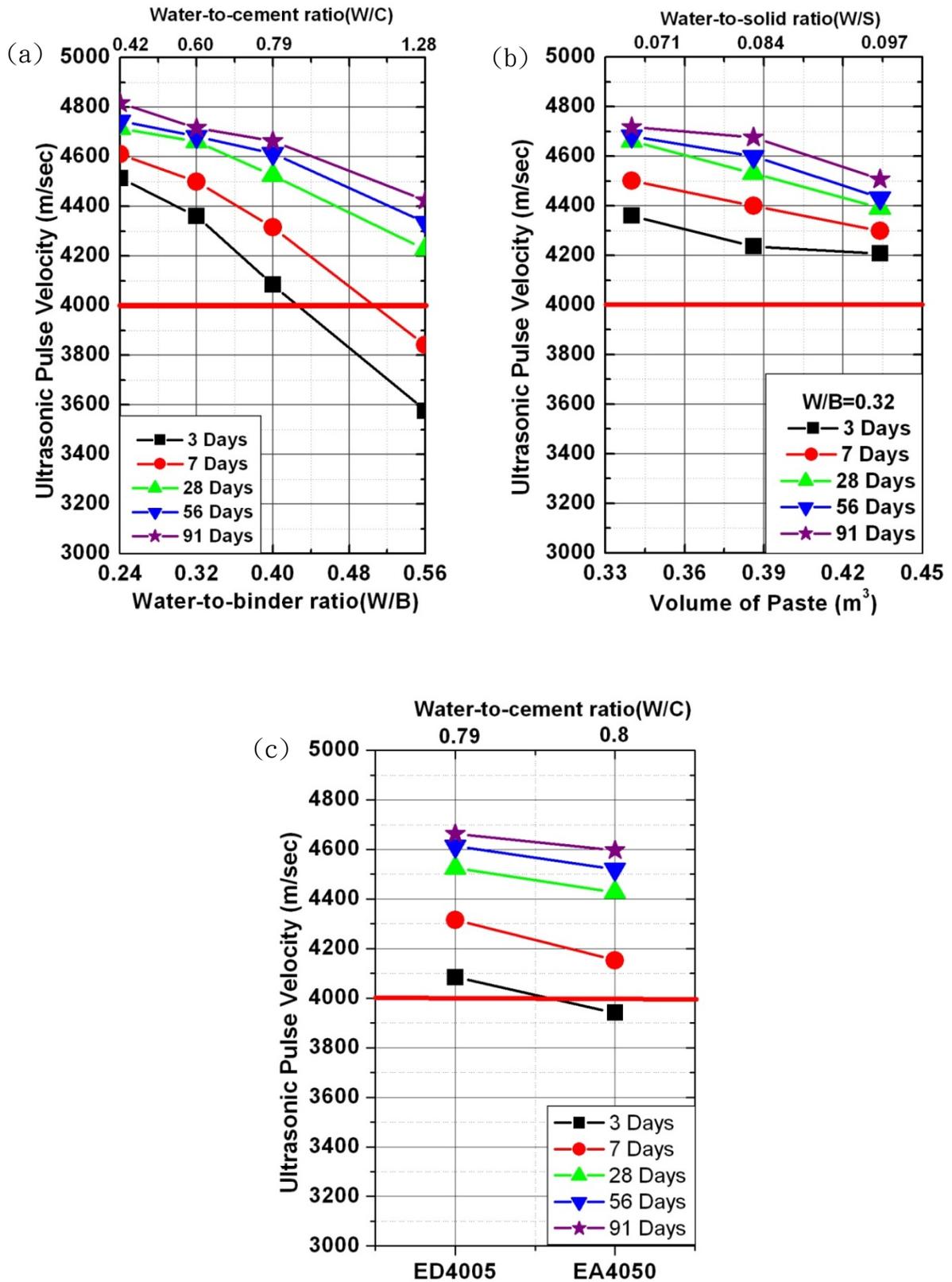


圖 4-6 混凝土各齡期之超音波波速(a) $t=5\mu\text{m}$ 之各水膠比(b) $W/B=0.32$ 之各漿體厚度(c) $W/B=0.4$ 之 ACI 與 HFDMDA 配比

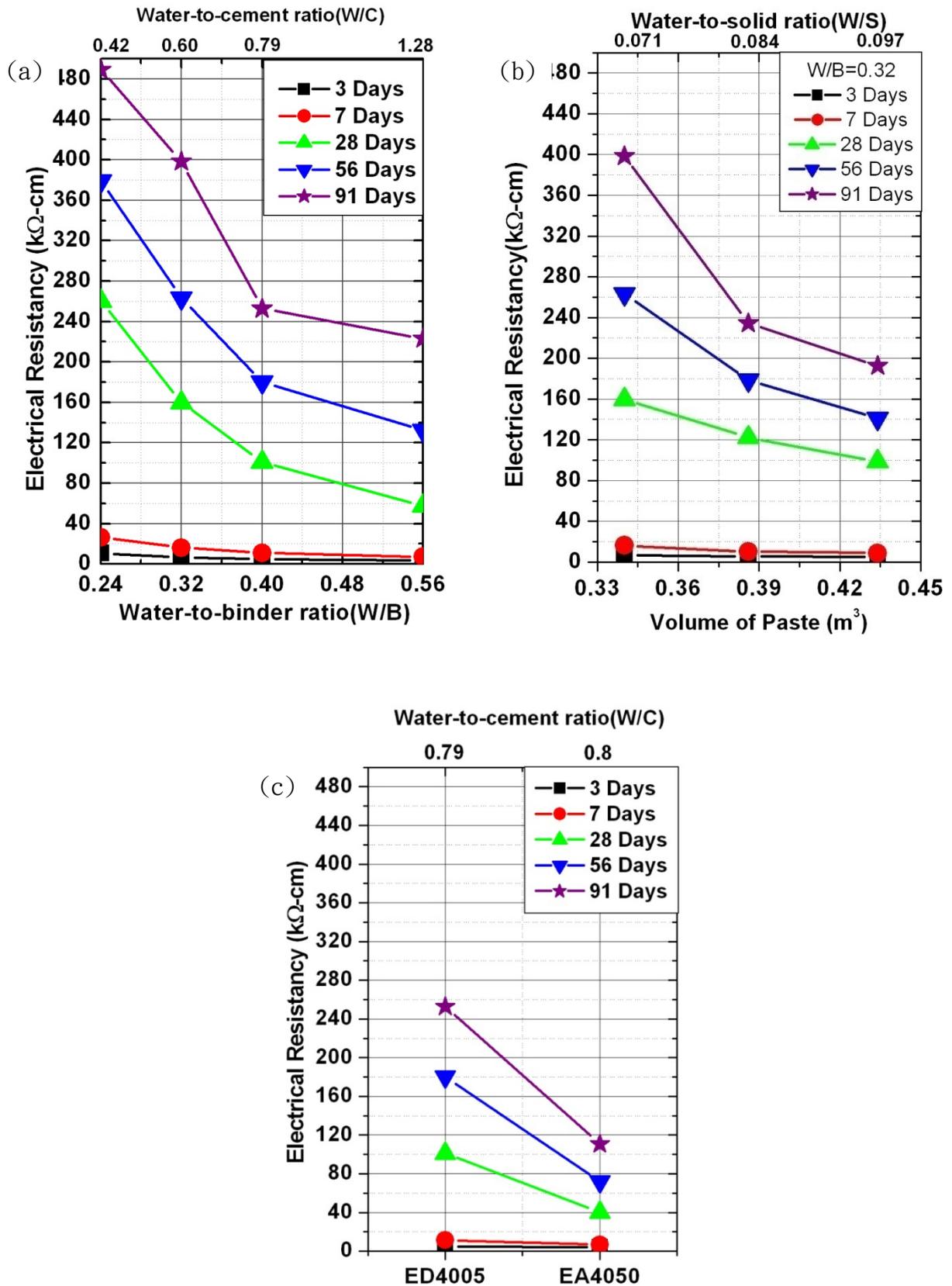


圖 4-7 混凝土各齡期之電阻值(a) $t=5\mu\text{m}$ 之各水膠比(b) $W/B=0.32$ 之各漿體厚度(c) $W/B=0.4$ 之 ACI 與 HFDMDA 配比

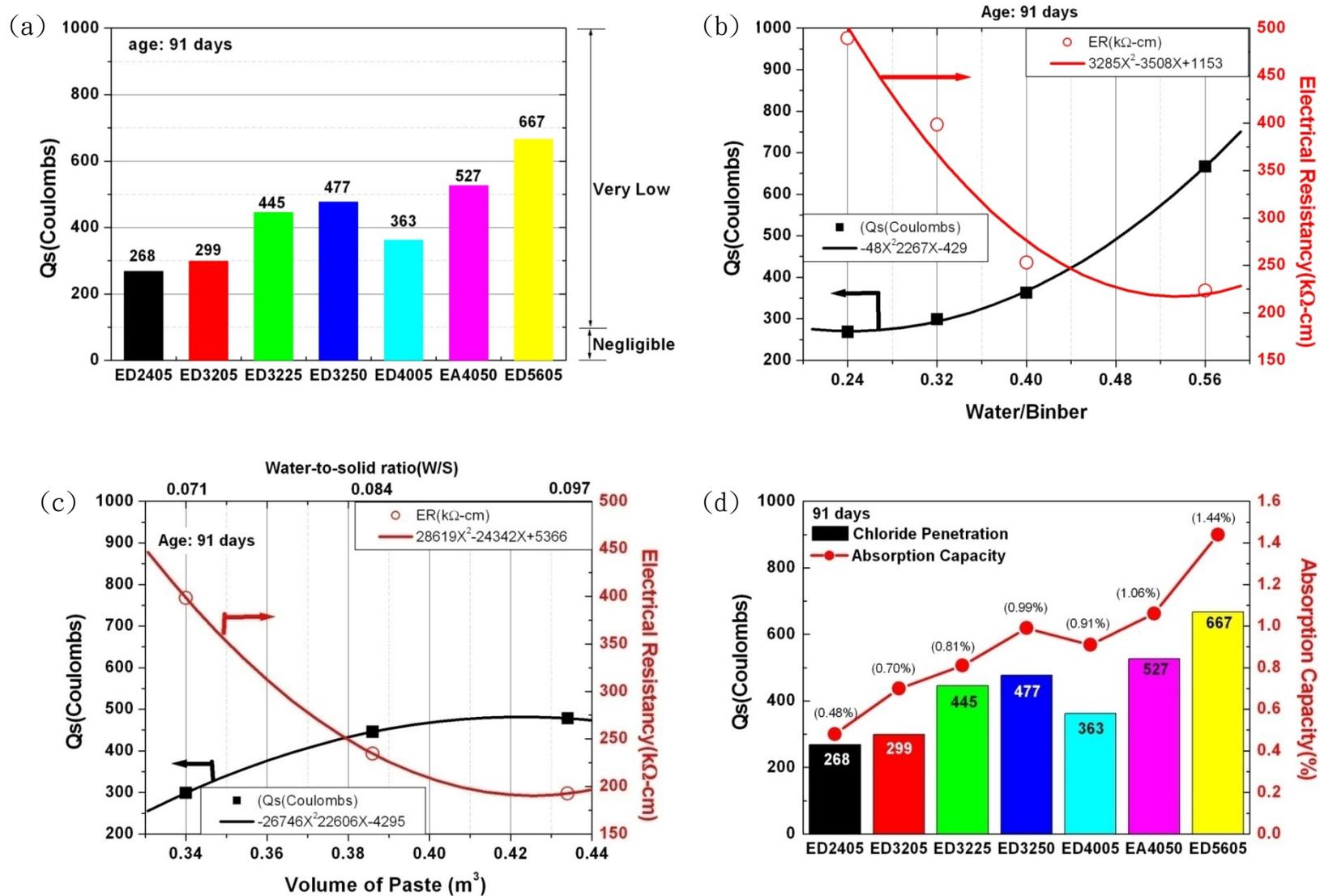


圖 4-8 混凝土 91 天之電滲值(a) 各組配比(b)漿體量 5μm 之電滲與電阻關係圖(c)水膠比 0.32 之電滲與電阻關係圖(d)電滲與吸水率關係圖

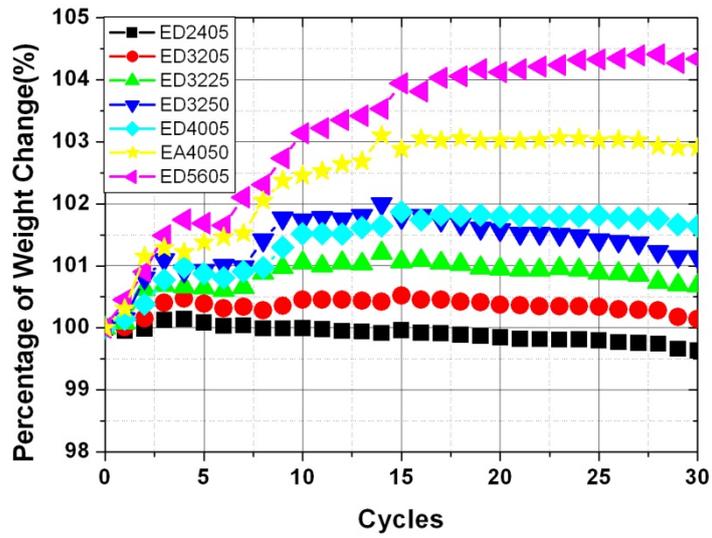


圖 4-9 混凝土之硫酸鹽侵蝕重量改變情形

	原始情形	30 次硫酸鹽侵蝕後情形
ED2405		
ED3205		
ED3225		

圖 4-10 混凝土受硫酸鹽侵蝕實際情形(一)

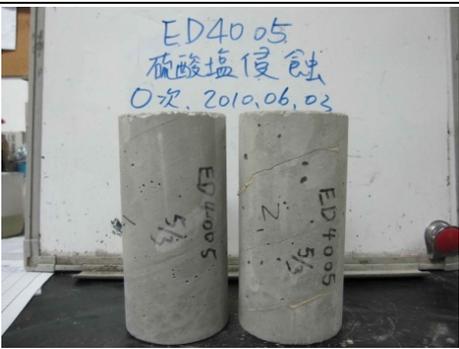
ED3250		
ED4005		
EA4050		
ED5605		

圖 4-11 混凝土受硫酸鹽侵蝕實際情形(二)

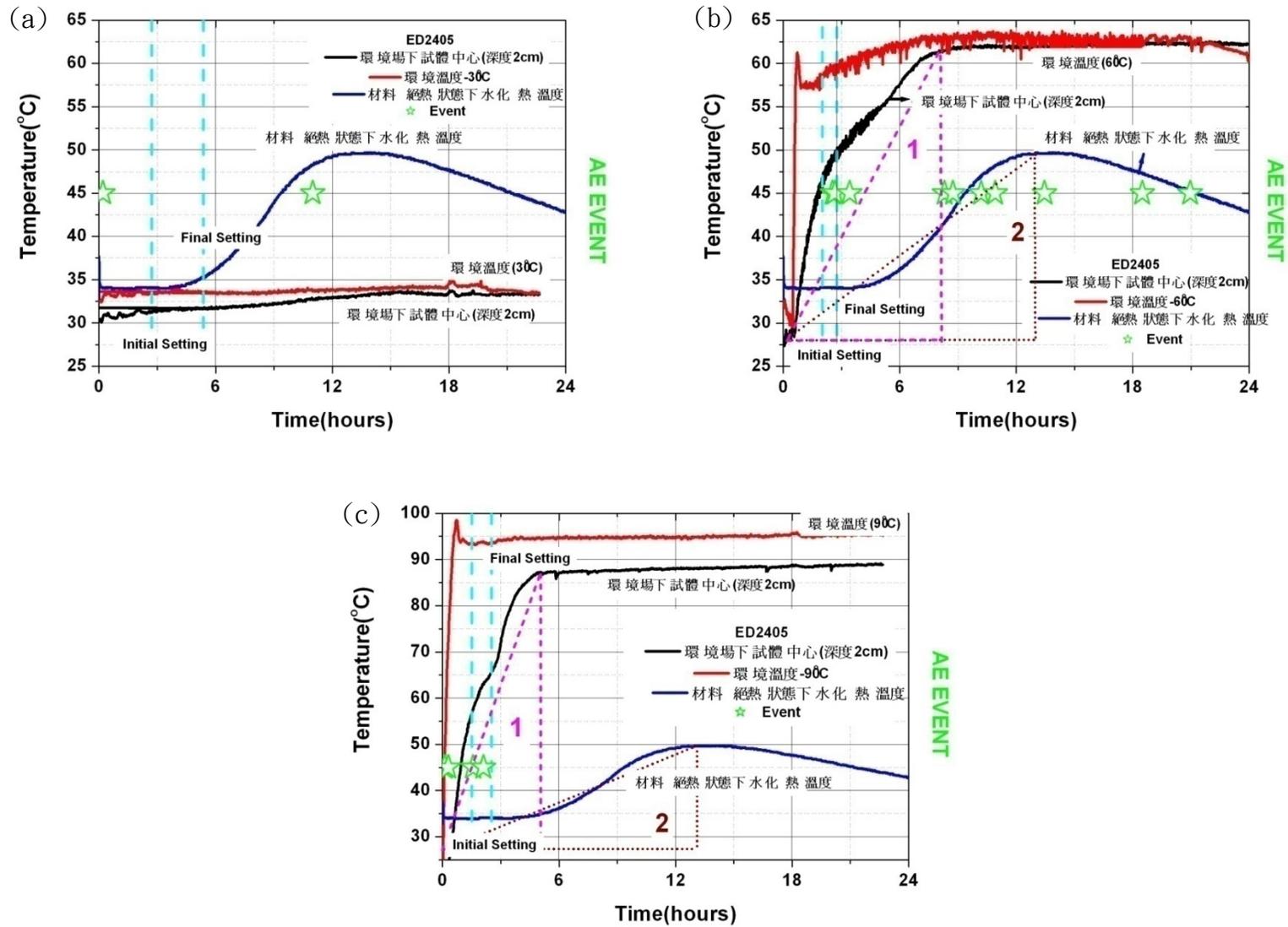


圖 4-12 ED2405 於不同環境溫度下 AE 訊號發生時間與溫度關係圖 (a)環境場 30°C(b) 環境場 60°C(c) 環境場 90°C

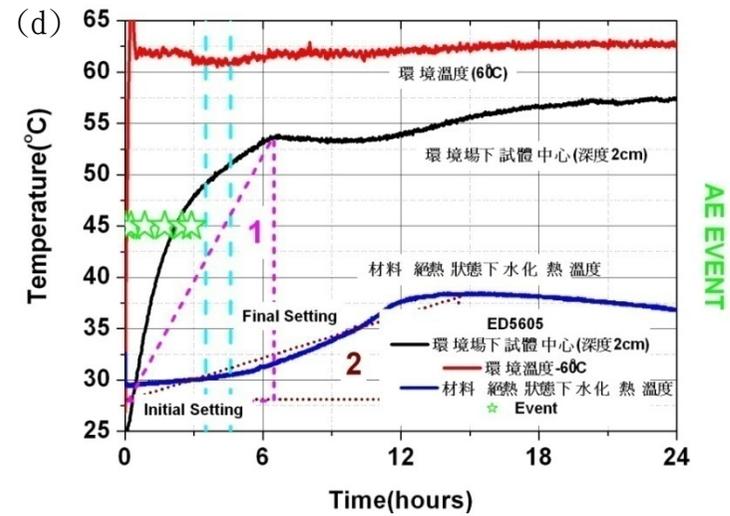
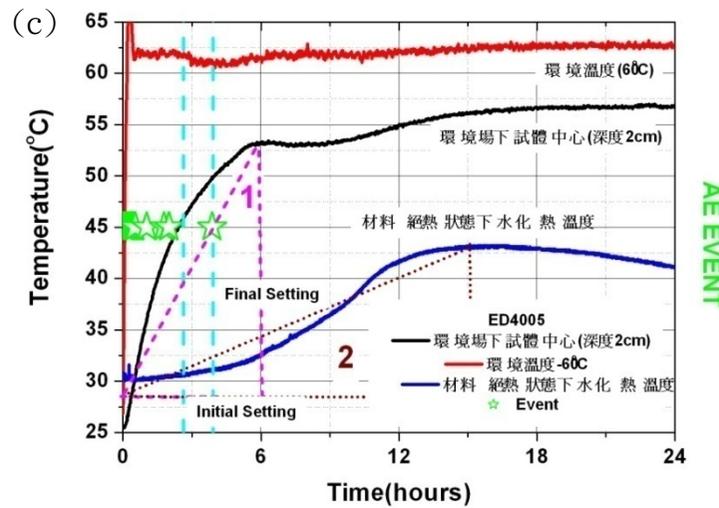
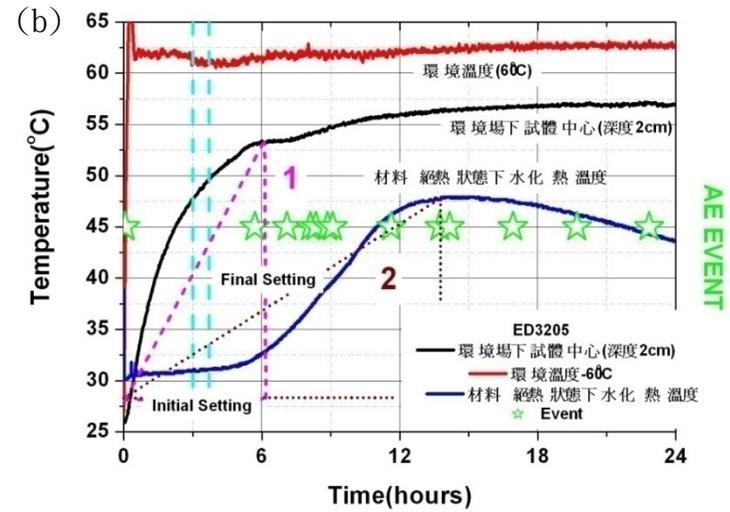
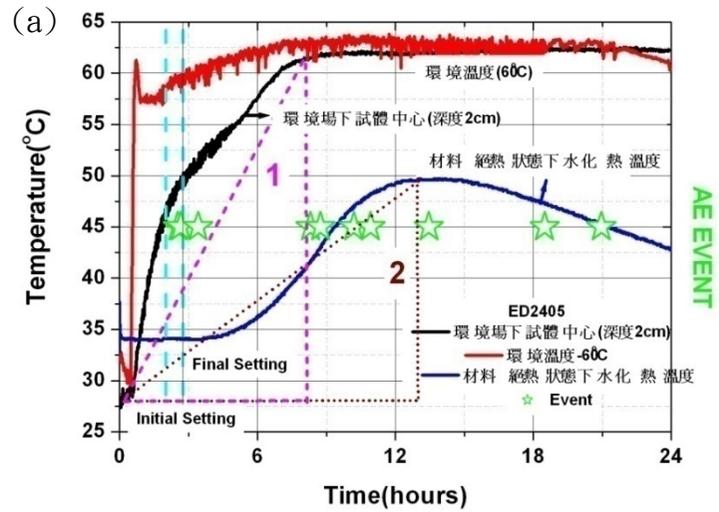


圖 4-13 各組於環境溫度 60°C 下 AE 訊號發生時間與溫度關係圖 (a) ED2405(b) ED3205(c) ED4005(d)ED5605

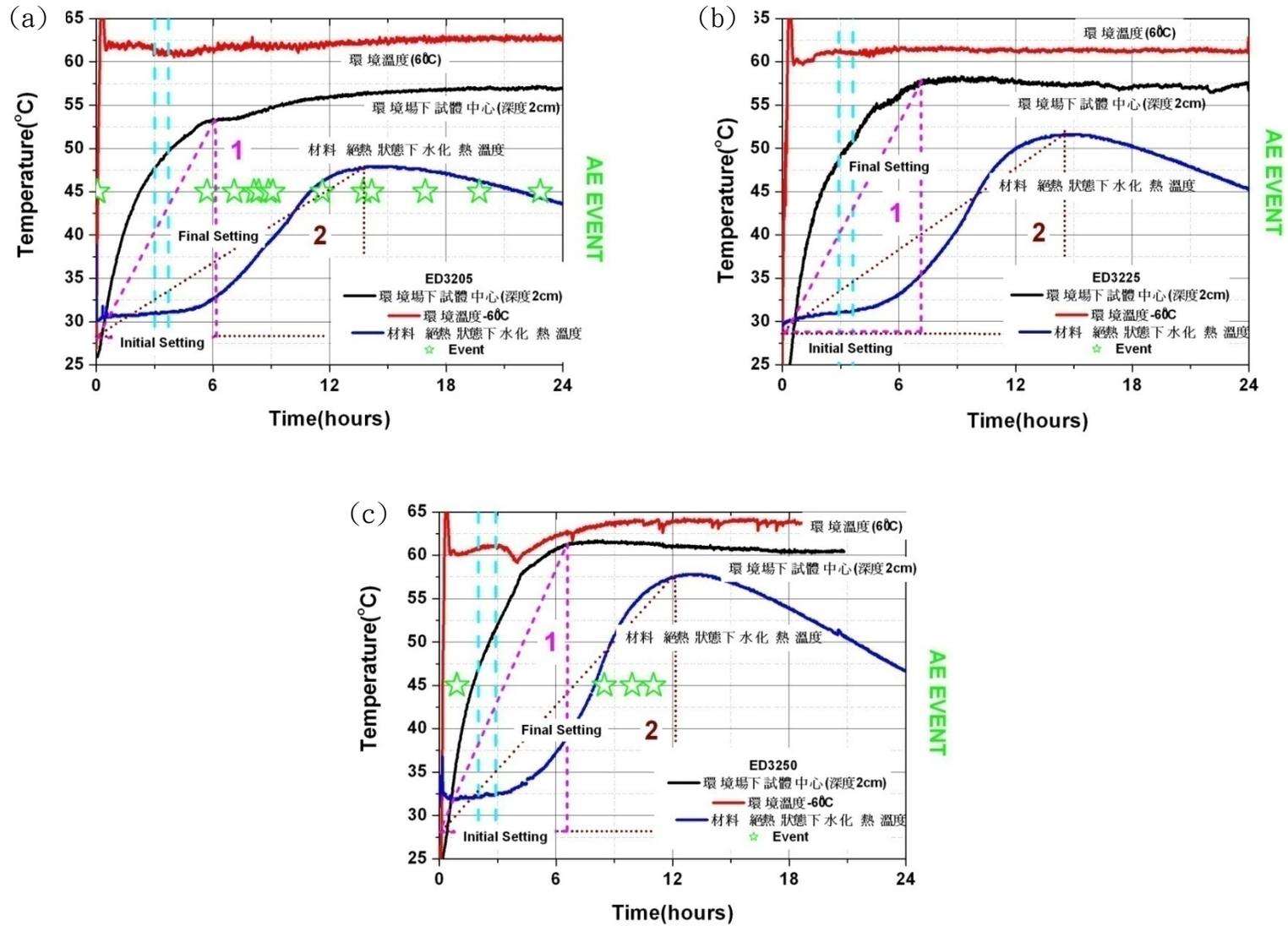


圖 4-14 水膠比 0.32 之不同漿體厚度於環境溫度 60°C 下 AE 訊號發生時間與溫度關係圖 (a) 5μm(b) 25μm (c) 50μm

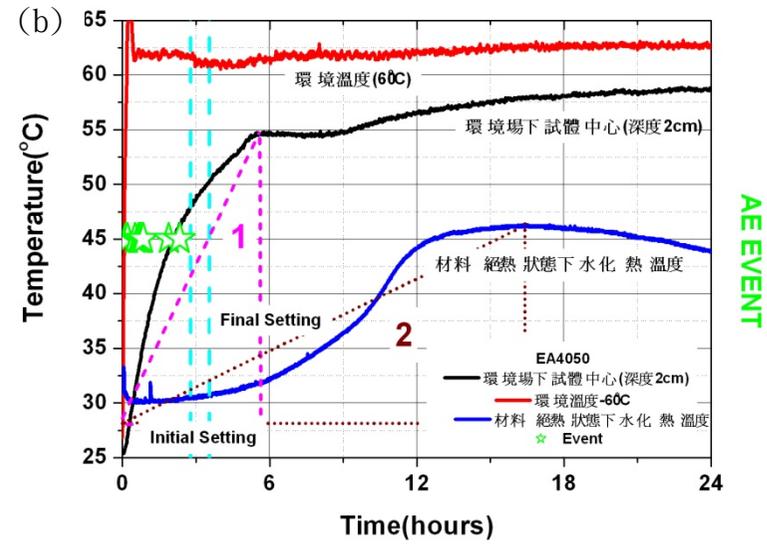
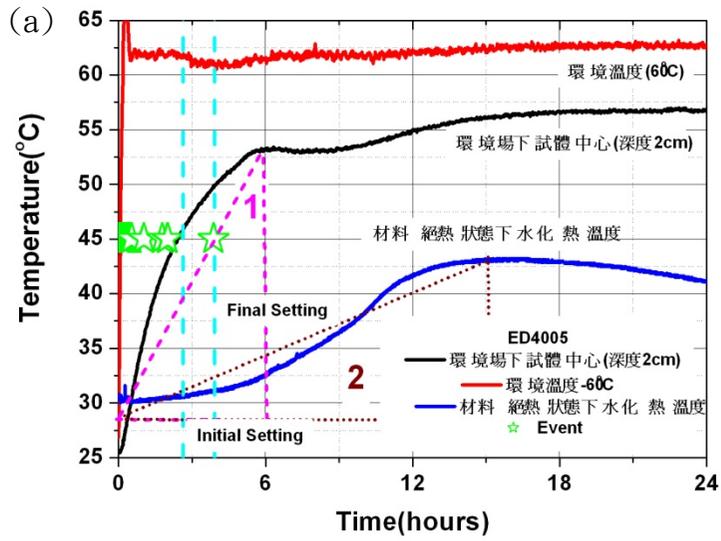


圖 4-15 水膠比 0.40 之不同設計方式於環境溫度 60°C 下 AE 訊號發生時間與溫度關係圖 (a) ED4005(b) EA4050

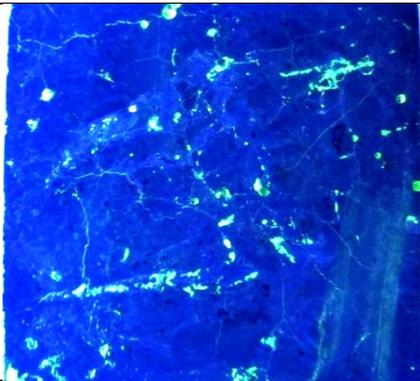
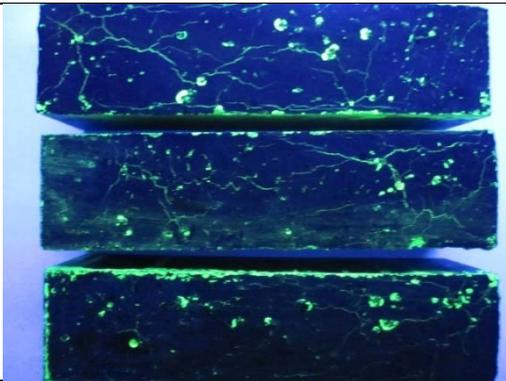
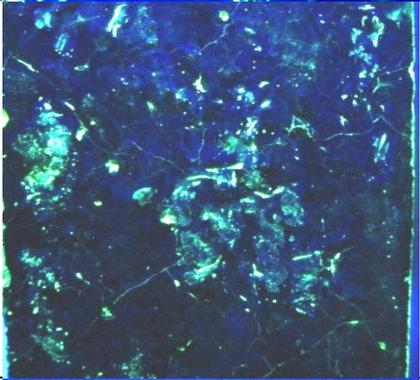
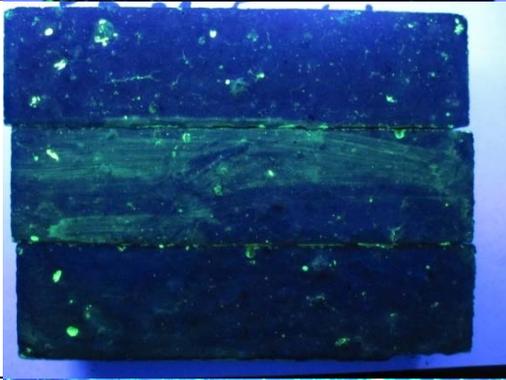
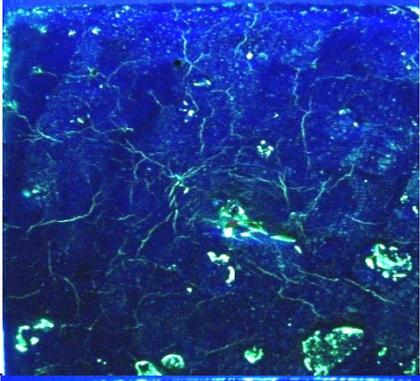
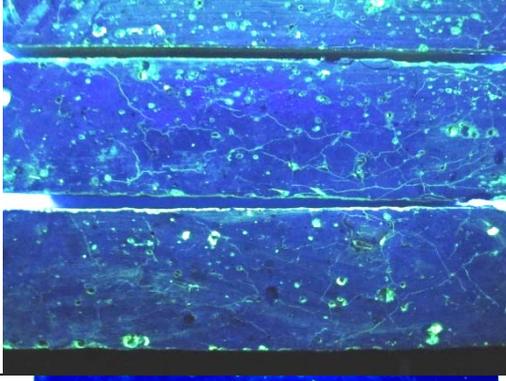
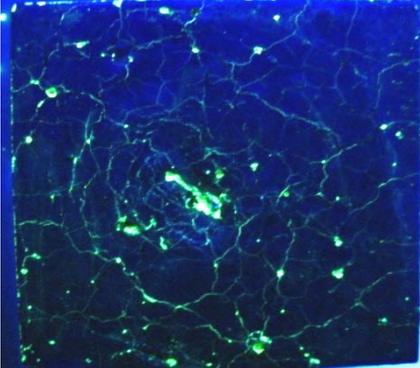
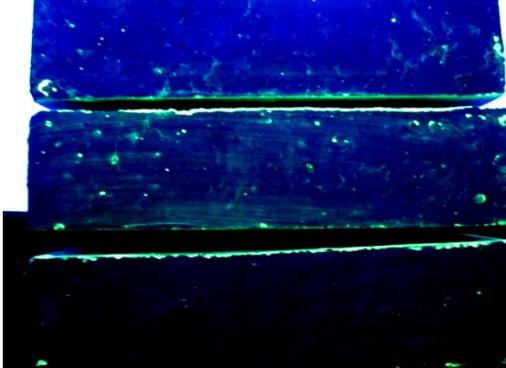
組別	溫度	方型塊體	長條狀試體
ED2405	30°C		
	60°C		
	90°C		
ED3205	60°C		

圖 4-16 以螢光漆探傷法觀察各配別之微裂縫(一)

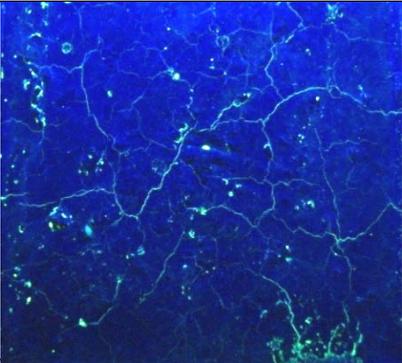
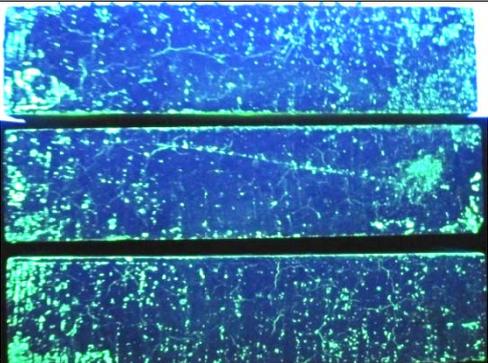
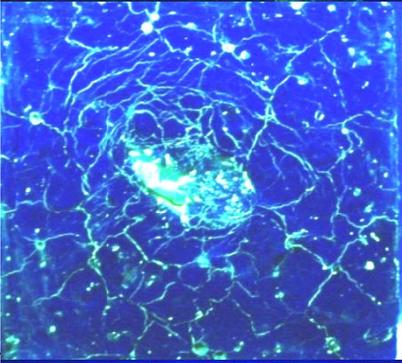
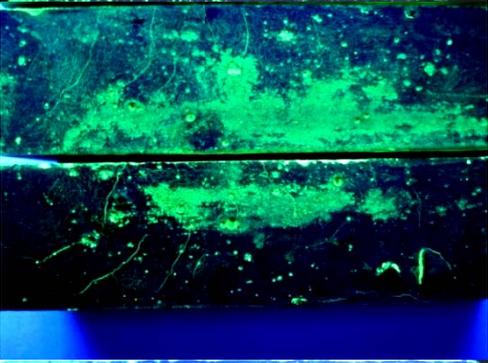
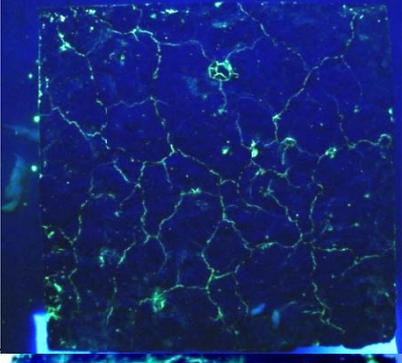
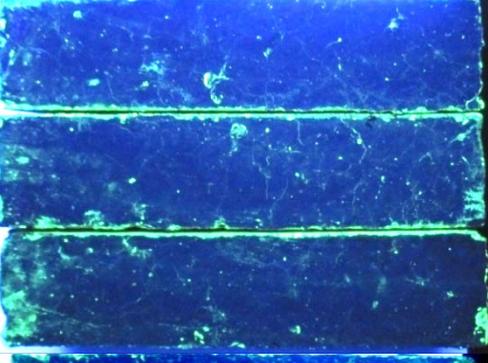
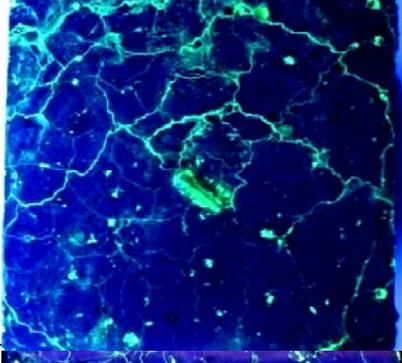
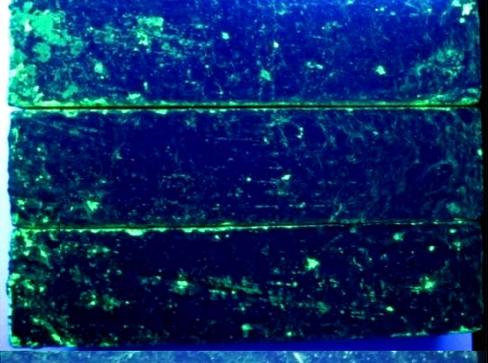
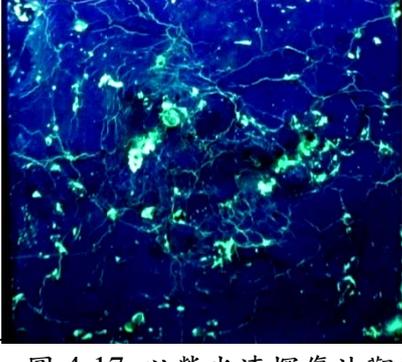
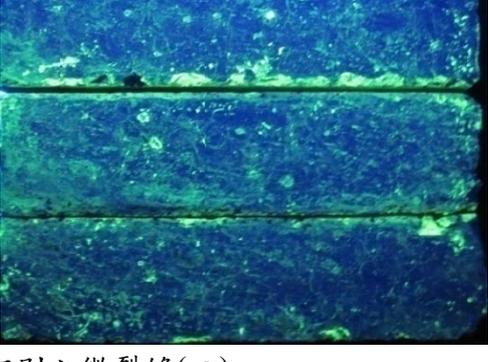
組別	溫度	方型塊體	長條狀試體
ED3225	60°C		
ED3250			
ED4005			
EA4050			
ED5605			

圖 4-17 以螢光漆探傷法觀察各配別之微裂縫(二)

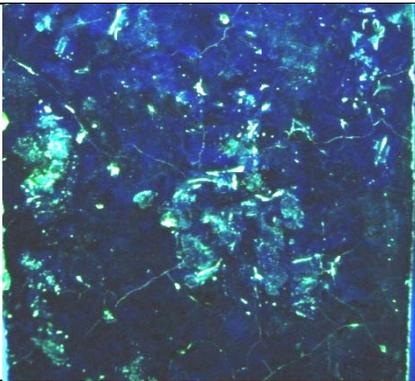
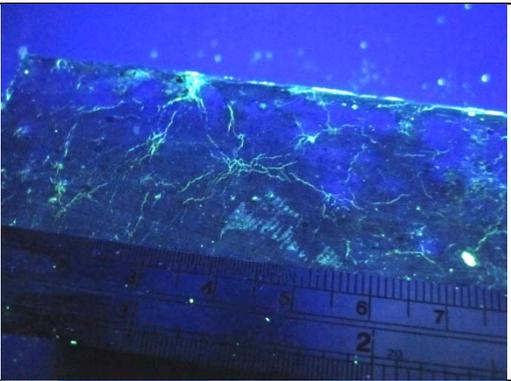
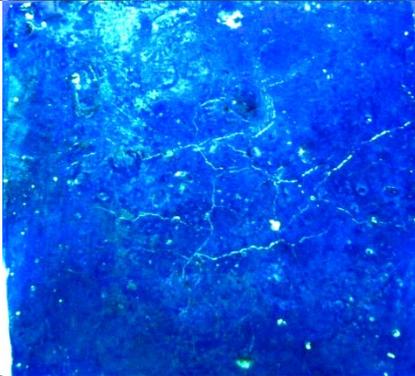
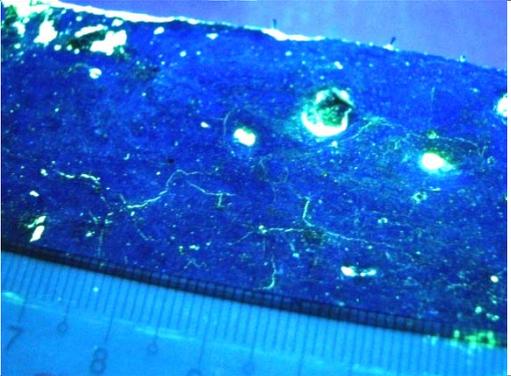
組別	溫度	方型塊體	長條狀試體
ED2405	60°C		
ED240515 (HIC 配比) (1.5%鋼纖維)			

圖 4-18 以螢光漆探傷法 ED2405 與 HIC 配比(240515)之裂縫型態

伍、 結論與建議

一、 結論

本計畫主要依據高承裝容器(HIC)配比做為配比設計依據，為了解不同配比變數在受到不同環境溫度場下對混凝土之影響，因此，配比設計觀察不同漿質、漿量及配比設計法作為設計變數，以高強度、高耐久性作為混凝土設計目標；並利用音聲技術系統，偵測混凝土在上述變數中所產生的影響，最後以螢光漆探傷法觀察試體表面裂縫型態，經試驗驗證結果可得下列結論：

1. 採用 HFDMDA 設計法，無論在新拌、硬固及耐久性質之結果均能達到設計要求，且表現較 ACI 理想甚多。
2. 混凝土新拌性質方面，凝結時間將隨著環境溫度增高而縮短。
3. 在力學性質方面，漿質愈佳，漿量厚度愈小則有較佳的抗壓強度 (>10000 psi) 與超音波速。
4. 在乾縮方面，漿質愈佳(W/B 越小)，漿量厚度愈小，乾縮之長度變化愈小。且 HFDMDA 較 ACI 至少減少 15%的乾縮量。
5. 在耐久性方面，各組配比在氯離子電滲均小於 1000 庫倫以下，電阻均超過大於 100k Ω -cm。在受到硫酸鹽侵蝕下，除了具有良好的抗侵蝕性外，更可以提高混凝土的抗壓強度。
6. 由音聲技術檢測中，在相同配比條件下，隨著環境溫度越高時，

發生 AE 訊號的時機點將會提前出現，由 AE 訊號出現時間表示混凝土裂縫型態由自體收縮提前形成塑性收縮。在相同漿量的條件下，受到溫度場 60°C 的影響，隨著水膠比的增加，AE 訊號發生時機也隨之提前，混凝土裂縫由自體收縮轉變成塑性收縮。水膠比 0.32 且不同漿量於 60°C 環境影響下，皆屬自體收縮所產生的微裂縫，但隨著漿體厚度的增加，發生微裂縫的時間將延後。水膠比 0.4 時，AE 訊號皆屬塑性收縮造成，但 HFDMDA 所設計的混凝土得以延長裂縫發生時間。

7. 由 AE 技術檢測中，證實本技術可用於混凝土品質中的即時檢測。
8. 經螢光漆探傷法檢測下，可以知道混凝土在受到高溫的環境溫度、高水膠比、高漿體用量時，會出現深度較深且寬度較寬的表面裂縫，因此，低水膠比、低漿體量與適當溫度場可以抑制裂縫生成與蔓延。

二、建議

根據以上結論，分別對混凝土配比設計與儀器做以下建議：

(一)材料

1. 為降低塑性收縮，建議水膠比不宜超過 0.40。
2. 水灰比建議大於 0.42 即可降低混凝土自體收縮與乾燥收縮的產

生。

3. 養護環境溫度，不宜超過 60°C，以免產生溫度裂縫以及對膠體發展的抑制。
4. 混凝土漿體體積不宜超過 40%，以免有過高的收縮現象。
5. 緻密的粒料堆積比使用較多的膠結料，在強度與耐久性方面有著較優異的結果。
6. 在相同的粒料比用與漿體用量下，單位拌合水量越多，則對混凝土耐久性質有不良之影響。

(二)儀器

本計畫於音聲技術系統檢測新拌混凝土裂縫，僅能偵測二維平面訊號發生的時機點，而無法進行三維空間之音源定位。

建議可以搭配光學技術一起和聲射技術整合，由於本計畫於混凝土新拌性時聲學無法定位，僅能從發生聲源的時間偵測發生裂縫時機，若能搭配光學技術(ESPI)，則更能清楚得知微裂縫發生的情況，甚至連如何延伸及型態皆可清楚顯示。

陸、參考文獻

1. James, T. D., "Crack Controlled Maximum Durability Concrete for Low Level Radioactive Waste Disposal", ACI Concrete International, Vol.15, No.12, (1993).
2. 黃兆龍，高性能混凝土覆工版開發研究案，期末報告，榮民工程處，(2003)。
3. 黃兆龍，中鋼鐵路道岔預力 PC 軌枕開發，結案報告，中國鋼鐵公司，(2007)。
4. 黃兆龍，低放射性硫酸鈉固化廢料高性能容器研發，行政院原子能委員會專題研究計劃期末報告，(1997)。
5. 葉叔通，以理想級配曲線估算粒料緻密混合比及飛灰卜特蘭水泥漿包裹厚度評估混凝土性質之探討，國立台灣科技大學碩士論文，(2005)。
6. 黃兆龍，高完整性承裝容器製成及自動化研究，行政院原子能委員會研究報告-II，(2007)。
7. 劉信宏，超音波在混凝土中波傳行為之探討與應用，碩士論文，私立中原大學土木工程研究所，(1995)。
8. Bjontegaard, O., Hammer, T.A. and Sellevold, E.J., "Cracking in HPC before Setting Concrete", International Symposium on High-Performance and Reactive Power Concretes, Vol.1, pp1-16, (1998).
9. 黃兆龍、許桂銘，「超音波在混凝土內傳遞行為及其應用」，中華民國建築學會，建築學報，第四期，pp.83-99，(1991)。
10. 黃兆龍，高性能混凝土理論與實務，詹氏書局，(2003)。
11. Ohtsu, M., "Source Inversion of Acoustic emission Waveform", Structural Eng. / Earthquake Eng.", Vol. 5, No. 2, pp. 275s-283s,(1988) .
12. Ohtsu, M., "Acoustic Emission Characteristics of Concrete and Fundamental Mechanisms", Ph. D. Thesis, Kyoto University, (1982).
13. Rossi, P., Robert , J.L., Gervais, J.P. and Bruhat, D., "The Use of Acoustic Emission in Fracture Mechanics Applied to Concrete", Engineering Fracture Mechanics, Vol.35, No.4/5, pp.751-763,(1990).
14. Maji, A.K., "Acoustic emissions from reinforced concrete", Experimental Mechanics, Vol. 34, No.4, p 379-388, (1994).
15. Alliche, A., and Francois, D., "Fatigue Behavior of Hardened Cement Paste", Cement and Concrete Research, Vol.16, pp.199-206 ,(1986).
16. Mihashi, H., Nomura, N. and Niiseki, S., "Influence of aggregate size on fracture process zone of concrete detected with three dimensional acoustic emission technique", Cement and Concrete Research, Volume 21, Issue 5, Pages 737-744 ,(1991).
17. Wu, K., Chen, B., Wu, Y., "Study on the AE Characteristics of Fracture Process

- of Mortar, Concrete and Steel-fiber-reinforced Concrete Beams”, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp. 1495-1500, (2000).
18. 楊斯然，飛灰卜特蘭水泥砂漿之音洩訊號特性研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文，(1991)。
 19. 曾祥璣，水淬爐石及矽灰卜特蘭水泥砂漿受壓過程中音洩訊號特性之研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文，(1992)。
 20. 張仲佐，非破壞性音洩凱撒效應對混凝土材料荷載歷史之檢核，國立交通大學土木工程學系碩士論文，(1995)。
 21. 曾聖智，岩石材料之音射特性及音射源定位研究,國立成功大學土木工程研究所碩士論文，(1999)。
 22. 黃兆龍，高完整性承裝容器製成及自動化研究，行政院原子能委員會研究報告- I ，(2006)。
 23. Cement Association of Canada ，「Autoclave Steam Curing and Atmospheric Steam Curing」,(2003).
 24. 吳建憲，卜特蘭水泥混凝土蒸汽養護成效對施工成本效益之研究 以台灣高鐵 C215 標橋梁工法為例，國立中央大學土木工程學系碩士論文，(2005)。
 25. 黃兆龍，高完整性承裝容器製成及自動化研究，行政院原子能委員會研究報告-III ，(2008)。
 26. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)，ACI Committee 211, Detroit, mich: ACI. 2002.
 27. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，(2007)。
 28. DIN 50008-1, Atmospheres and their technical application; Standard atmospheres over aqueous solutions; Saturated salt solutions, glycerol solutions ,(1981).
 29. ASTM E104 ,Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions,(2007)。
 30. 劉崧璋，以非破壞偶合試驗研探類岩材料受楔型貫切破壞之側向自由邊界效應，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，(2007)。
 31. 洪崇嚴，台灣地區氣候對自充填混凝土乾縮之影響，國立臺灣大學土木工程系碩士論文，(1999)。
 32. Pierre Mounanga, Véronique Baroghel-Bouny, Ahmed Loukili and Abdelhafid Khelidj“Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro–macro correlations”, *Cement and Concrete Research* 36,pp110~122,(2006).
 33. Wajahat H. Mirza, Soliman I. Al-Noury & Waleed H. Al-Bedawi,“Temperature Effect on Strength of Mortars and Concrete Containing Blended Cements”, *Cement & Concrete Composites*13,pp.197~202,(1991).

34. Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen, "Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste", *Cement and Concrete Research* 29, pp567~575,(1999).
35. Abdullah A. Almusallam, "Effect of environmental conditions on properties of fresh and hardened concrete", *Cement & Concrete Composites* 28, pp.3535-361, (2001).
36. 楊珮琳、黃 然，不同養護條件下添加飛灰或爐灰對水泥質材料性質影響之研究，國立台灣海洋大學河海工程學系碩士專班研究成果發表會，(2004)。
37. 丘惠生、王瑞禎、高健章編著，「橋梁現地蒸汽養生技術推廣手冊」，(2000)。
38. 莊昆斌，“蒸氣養護對不同爐石添加量自充填混凝土熱學性質及工程性質之研究”，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，(2004)。
39. 歐書豪“礦物摻料及蒸氣養護對不同配比水泥砂漿熱傳導性質之影響”，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，(2003)。
40. 熊哲堅，混凝土裂縫發展之 AE 訊號研析，朝陽科技大學營建工程系碩士論文，(2008)。
41. 楊明輝，「AE 檢測技術的現況」，*檢測技術*，第 9 卷第 3 期，pp4-11，(1991)。
42. Miinshiou H., and Liang J., "Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research," *Nondestructive Evaluation, JOM-e, Vol. 50, No. 11, 1998.*
43. 李佳龍，音射定位法於岩石材料之應用，國立成功大學資源工程學系碩士論文，(2003)。
44. 蔡昇哲，應用非破壞檢測之聲射法於岩石貫切破壞試驗之探討，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，(2005)。
45. Spanner, J. C., Brown, A. and Hay, D.R., V., Notvest, K. and Pollock, A., "Fundamentals of Acoustic Emission Testing", *Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed., Vol. 5, pp. 11-44, (1987).*
46. Bray, D. E. and McBride. "Acoustic Emission Technology." *Nondestructive Testing Techniques*, p 345-377, John Wiley & Sons Inc.,(1992).
47. Kaiser, J. "Untersuchungen Uber Das Auftreten Geraucchen Beim Zevgersuch." Ph.D Thesis, Technische Hochschule,(1953).