

行政院原子能委員會
放射性物料管理局
委託計畫研究報告

乾式貯存混凝土護箱
受高溫及濱海環境作用之效應研究

計畫編號：96FCMA003

受委託機關：國立中央大學

計畫主持人：黃偉慶

摘要

關鍵詞：乾式貯存、混凝土劣化、非破壞檢測、高溫

用過核子燃料乾式貯存設施主體是由混凝土材料所構成，且考慮到混凝土材料需長時間承受內部用過核燃料所散發的衰變熱，及台灣地區特殊的環境氣候條件下，對混凝土材料可能受損或劣化有必要加以評估分析。

本研究依據 ACI 349 中有關核能安全混凝土結構物的材料規定進行配比製作混凝土試體，探討實驗室模擬乾式貯存混凝土護箱受高溫及濱海環境作用下，可能對混凝土屏蔽造成損害或劣化甚至影響混凝土耐久性作相關之研究，同時利用非破壞性檢測方法包括超音波試驗、動彈性模數試驗及反彈鎚試驗等，觀察混凝土受持續高溫作用下之結構緻密性及內部是否產生裂縫，而影響混凝土的品質及耐久性安全。試驗結果得知 (1)混凝土在乾式貯存設施長期操作溫度環境下之抗壓強度，無論添加卜作嵐材料與否，其抗壓強度所受直接影響效應有限，不致損及混凝土結構承載之能力；(2)混凝土受高溫(94°C)環境作用下，其脈波波速及動彈性模數於初期會略為降低，而後趨於穩定；而混凝土反彈數則呈現持續降低現象直至受熱歷時 90 天降低趨勢有減緩現象；(3)混凝土受熱環境作用後體積產生收縮，以純混凝土及使用飛灰之混凝土體積變化量較小。

此外，針對混凝土劣化分析模式整理並建立混凝土劣化模式。依據混凝土劣化模式分析模擬時所需之傳輸參數，建立實驗室試驗評估方法，以求取傳輸參數供模式分析。並利用美國國家標準署(NIST)所建立的混凝土劣化模式針對氯離子入侵及硫酸鹽侵蝕反應進行參數敏感度分析，未來可應用於用過核子燃料乾式貯存設施之評估。

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	V
壹、緣起與目的	1
貳、文獻回顧	3
2.1 混凝土受高溫作用下之性質.....	3
2.1.1 溫度與混凝土抗壓強度.....	3
2.1.2 溫度與混凝土動彈模數.....	4
2.1.3 溫度與混凝土波速.....	5
2.2 非破壞性檢測.....	6
2.2.1 超音波量測混凝土波速.....	6
2.2.2 混凝土試體機本頻率之量測.....	8
2.2.3 混凝土非破壞檢測之影響因素.....	11
參、試驗材料與方法	14
3.1 試驗材料.....	14
3.2 主要試驗設備.....	15
3.3 試驗內容及方法.....	18
3.3.1 試驗流程.....	18
3.3.2 試驗變數.....	20
肆、結果與分析	22
4.1 抗壓強度.....	22
4.1.1 不同配比混凝土抗壓強度發展.....	22
4.1.2 環境溫度對混凝土抗壓強度之影響.....	24
4.1.3 不同混凝土配比在相同溫度環境條件下之抗壓強度關係.....	28
4.2 體積變化.....	30
4.2.1 不同配比之混凝土體積變化.....	30
4.2.2 環境溫度對混凝土體積變化之影響.....	30

4.2.3 不同混凝土配比在相同溫度環境條件下之體積變化關係.....	34
4.3 超音波波速.....	35
4.3.1 環境溫度對混凝土脈波波速之影響.....	35
4.3.2 不同混凝土配比在相同溫度環境條件下之脈波波速變化.....	38
4.4 動彈性模數.....	40
4.4.1 環境溫度對混凝土動彈性模數之影響.....	40
4.4.2 不同混凝土配比之動彈性模數變化.....	44
4.5 反彈槌試驗.....	46
4.5.1 環境溫度對混凝土反彈數之影響.....	46
4.5.2 不同混凝土配比之反彈數變化.....	50
伍、混凝土劣化分析模式評估與劣化試驗評估方法建立	54
5.1 混凝土劣化分析模式評估.....	54
5.2 混凝土劣化試驗評估方法之建立.....	62
5.2.1 氯離子入侵試驗.....	63
5.2.2 硫酸鹽侵蝕試驗.....	67
5.3 美國國家標準署混凝土劣化預測模式.....	68
5.3.1 模擬程式參數敏感度分析.....	71
第六章 結論與建議	80
6.1 結論.....	80
6.2 建議.....	81
參考文獻.....	83
附錄 A.....	85
附錄 B 混凝土非破壞檢測標準之作業程序.....	91

圖目錄

圖 2.1 混凝土抗壓強度比與溫度之關係.....	4
圖 2.2 混凝土動彈性模數與溫度之關係.....	5
圖 2.3 混凝土波速與溫度之關係.....	5
圖 2.4 直接傳遞法.....	7
圖 2.5 半直接傳遞法.....	7
圖 2.6 間接傳遞法.....	8
圖 2.7 混凝土試體縱向基本頻率量測配置圖.....	11
圖 2.8 混凝土試體橫向基本頻率量測配置圖.....	11
圖 2.9 混凝土試體扭曲基本頻率量測配置圖.....	11
圖 3.1 混凝土拌和機.....	15
圖 3.2 200 噸抗壓試驗機.....	15
圖 3.3 數位式比長計.....	16
圖 3.4 超音波量測儀.....	16
圖 3.5 共振儀裝置圖.....	17
圖 3.6 示波器.....	17
圖 3.7 反彈鎚.....	18
圖 3.8 烘箱.....	18
圖 3.9 研究流程圖.....	19
圖 4.1 混凝土各種配比常溫環境下之抗壓強度趨勢圖.....	23
圖 4.2 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展.....	25
圖 4.3 使用 10%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展.....	26
圖 4.4 使用 20%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展.....	26
圖 4.5 使用 30%爐石混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展.....	27
圖 4.6 使用 50%爐石混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展.....	28
圖 4.7 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之抗壓強度發展.....	29
圖 4.8 混凝土各種配比常溫環境下之體積變化.....	30
圖 4.9 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之體積變化.....	31
圖 4.10 使用 10%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之體積變化.....	32
圖 4.11 使用 20%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之體積變化.....	32
圖 4.12 使用 30%爐石混凝土在兩種環境溫度下之體積變化.....	33

圖 4.13 使用 50%爐石混凝土在兩種環境溫度下之體積變化.....	33
圖 4.14 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之體積變化.....	34
圖 4.15 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化.....	35
圖 4.16 使用 10%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化.....	36
圖 4.17 使用 20%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化.....	36
圖 4.18 使用 30%爐石混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化.....	37
圖 4.19 使用 50%爐石混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化.....	37
圖 4.20 各種混凝土配比在常溫環境下之脈波波速.....	39
圖 4.21 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之脈波波速.....	39
圖 4.22 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數.....	40
圖 4.23 使用 10%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數.....	41
圖 4.24 使用 20%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數.....	42
圖 4.25 使用 30%爐石混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數.....	43
圖 4.26 使用 50%爐石混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數.....	43
圖 4.27 各種混凝土配比在常溫環境下之動彈性模數.....	45
圖 4.28 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之動彈性模數.....	46
圖 4.29 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之反彈數.....	47
圖 4.30 使用 10%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之反彈數.....	48
圖 4.31 使用 20%飛灰混凝土在兩種環境溫度下之反彈數.....	48
圖 4.32 使用 30%爐石混凝土在兩種環境溫度下之反彈數.....	49
圖 4.33 使用 50%爐石混凝土在兩種環境溫度下之反彈數.....	49
圖 4.34 各種混凝土配比在常溫環境下之反彈數.....	50
圖 4.35 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之反彈數.....	51
圖 5.1 硫酸鹽侵蝕示意圖.....	56
圖 5.2 硫酸鹽侵蝕劣化深度與時間關係圖.....	57
圖 5.3 氯離子相對濃度與侵入深度關係圖.....	60
圖 5.4 中性化劣化深度與時間關係圖.....	62
圖 5.5 擴散試驗裝置示意圖.....	65
圖 5.6 試體加壓克力環之示意圖.....	66
圖 5.7 運算流程圖.....	70
圖 5.8 模式視窗化輸入介面.....	71
圖 5.9 硫酸根離子外在濃度 0.1 MOLE/L 各預測年限硫酸根離子入侵剖面.....	74
圖 5.10 硫酸根離子外在濃度 0.5 MOLE/L 各預測年限硫酸根離子入侵剖面.....	75
圖 5.11 硫酸根離子外在濃度 1MOLE/L 各預測年限硫酸根離子入侵剖面.....	75
圖 5.12 氯離子外在濃度 0.1 MOLE/L 各預測年限氯離子入侵剖面.....	77

圖 5.13 氯離子外在濃度 0.5MOLE/L 各預測年限氯離子入侵剖面	77
圖 5.14 氯離子外在濃度 1 MOLE/L 各預測年限氯離子入侵剖面.....	78

表目錄

表 2.1 t 修正值.....	10
表 3.1 試驗材料之化學成份	14
表 3.2 粗、細骨材物理性質	15
表 3.3 各環境溫度及歷時時間之施作試驗項目	21
表 3.4 混凝土配比	21
表 4.1 混凝土各種配比常溫環境下之抗壓強度	23
表 4.2 高溫(94℃)作用下對混凝土性質產生之變化反應	52
表 4.3 各配比混凝土高溫(94℃)作用下試驗結果之綜合比較	53
表 5.1 各配比混凝土歷時 180 天之材質擴散係數	68
表 5.2 降雨之化學離子成份	72
表 5.3 各國地下水化學成份	72
表 5.4 硫酸根離子侵蝕模擬變數	74
表 5.5 氯離子侵蝕模擬變數	76

壹、緣起與目的

用過核子燃料從核子反應器退出時，具有較高的放射性及熱量，必須在反應器旁的用過燃料池中冷卻，待其放射性及熱量降低後，再進行後續處理。由於用過核子燃料可經再處理，回收鈾與鈾等有用資源，其中高放射性廢棄物約僅佔百分之三的體積。因此，是否將用過核子燃料視為廢棄物而直接處置，各國依其國情、社會環境與能源需求，有不同的考量。我國用過核子燃料管理政策，行政院原子能委員會曾就技術、安全、經濟、政治、人文社會與自然環境等因素，綜合後，採行「近程以廠內水池式貯存，中程以廠內乾式貯存，長程推動最終處置」為我國目前較佳之管理策略。

為紓解核電廠用過核燃料池貯存容量不足，台電公司規劃興建乾式貯存設施，進行約50年的用過核子燃料乾式貯存計畫。目前規劃採用直立式混凝土護箱型態的貯存設施。乾式貯存護箱設施主體由混凝土材料所構成，但不同於一般混凝土結構物之用途，乾式貯存設施貯存用過核子燃料的期限長達數十年，甚至在循環重複使用考量下，可能延長其服務年限。而混凝土護箱需長時間承受用過核子燃料所產生之衰變熱及台灣地區環境氣候潮濕，乾式貯存設施場址多瀕臨海邊，混凝土結構物易受環境中鹽分之侵蝕，對其耐久性可能形成不利影響。此環境有利於腐蝕反應之發生，使得貯存設施長期在此種環境下，可能對混凝土造成損害或劣化而影響用過核子燃料之貯存安全。

本研究目的係針對乾式貯存設施之混凝土材料長期受持續高溫效應

及濱海區域特有環境條件下，於實驗室模擬混凝土護箱受到內部用過核子燃料持續散發的衰變熱及外部環境因子交互作用下，是否會造成混凝土屏蔽的劣化或受損，同時利用非破壞檢測方法針對混凝土材料長期受持續高溫效應及濱海區域環境作用下，其劣化機制對耐久性的影響進行分析評估，以提供國內興建乾式貯存設施之依據及參考，提昇用過核子燃料貯存的安全性。

貳、文獻回顧

2.1 混凝土受高溫作用下之性質

混凝土受高溫作用時影響其性質的主要因素分為混凝土之初始性質及溫度條件。混凝土初始性質包括含水量、水灰比、粗細骨材的用量、種類、形狀、大小及水泥漿體界面結合狀況等。溫度條件則包括升溫速率、最高作用溫度、最高作用溫度延時及降溫速率等。一般而言，混凝土力學及耐久性等性質隨著作用溫度增高而呈衰減現象，而且溫度愈高則混凝土劣化愈形嚴重。

2.1.1 溫度與混凝土抗壓強度

Young (2002) 認為混凝土的強度通常可支持到300°C，除非溫度產生巨大改變，則強度才會如預期下降。強度下降的程度視混凝土初始濕度及骨材性質而定。混凝土加熱冷卻後之殘餘強度 (unstressed residual strength) 較受熱中直接試驗的混凝土強度低，主要有下列兩個原因。第一是由於混凝土在冷卻過程中，水泥漿體與骨材熱應力不一致，再度引起第二次裂縫所造成；第二則是部份脫水的水化產物再水化，導致在原位置膨脹所致。

一般混凝土在高溫環境下對混凝土殘餘強度影響大致上有兩個階段，第一階段在室溫至300°C範圍時，其混凝土殘餘強度有增加或輕微損失的現象，如圖2.1所示。強度增加的可能原因，是由於高溫作用後混凝土產生乾燥而磨擦力增加，使得水泥漿體與骨材間產生互鎖效應，而凡得瓦爾力增加，因此混凝土強度增加 (Young, 2002; Castillo, 1990; Dias, 1990)。

此外，在Castillo et al. (1990) 與Khoury (1992) 研究中指出，混凝土在此溫度範圍內有輕微強度損失原因，是由於混凝土內吸附水及層間水受熱蒸發，使得水泥漿體內可蒸發水受熱膨脹，因而降低漿體與骨材間的鍵結強度，而影響混凝土抗壓強度值。

第二階段是溫度超過300°C 以上時，混凝土強度開始有劣化狀況，當溫度愈高時，其混凝土抗壓強度損失愈明顯，如圖2.1所示。高溫下抗壓強度劣化原因，由於混凝土受熱後造成水泥漿體中的孔隙粗化現象，增加孔隙率及增大孔隙尺寸，使得混凝土抗壓強度下降。

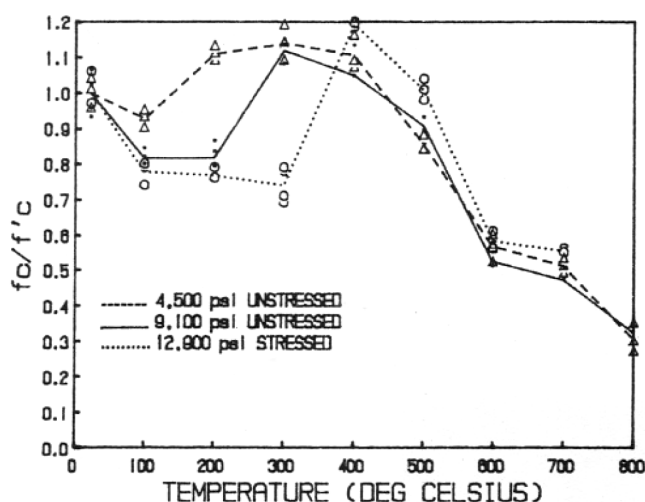


圖2.1 混凝土抗壓強度比與溫度之關係

2.1.2 溫度與混凝土動彈性模數

Malhotra (2004) 認為影響動彈性模數的因素為強度及密度，因此強度變化亦會改變動彈性模數，但其影響主要參數則為密度。混凝土受高溫作用下，混凝土內部水份散失、水化物被分解及裂縫產生，而導致混凝土的密度降低及孔隙率增加，使得動彈性模數降低，且溫度愈高則下降趨勢愈顯著，如圖2.2所示 (Castillo, 1990)。

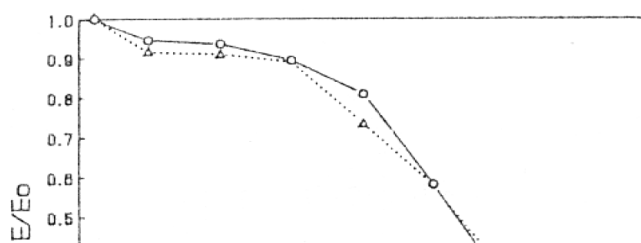


圖2.2 混凝土動彈性模數與溫度之關係

2.1.3 溫度與混凝土波速

沈得縣（1994）等人研究中指出，混凝土超音波速隨著溫度升高則波速降低，如圖2.3所示。由於混凝土受熱後，骨材與水泥漿體變形不一致，造成水泥漿體與骨材界面產生微裂縫，導致混凝土波速降低，且混凝土內部中孔隙及微裂縫對混凝土波速造成的影響較對抗壓強度敏感。因此，混凝土受熱後的波速折減會較抗壓強度來的明顯。

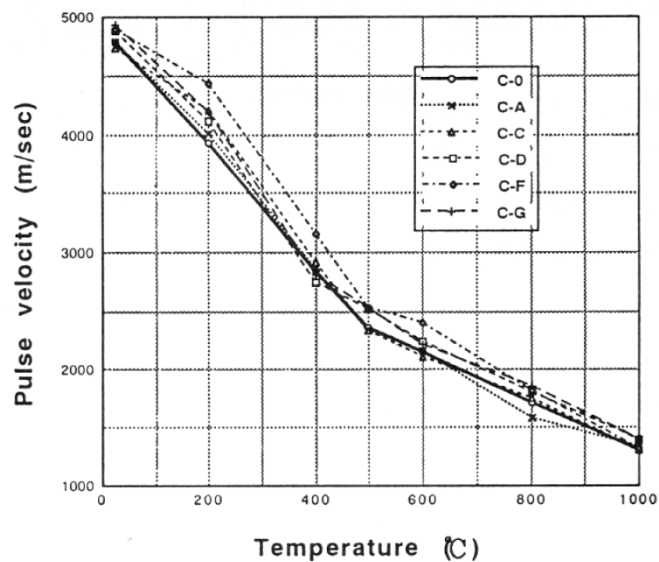


圖2.3 混凝土波速與溫度之關係

2.2 非破壞性檢測 (Non-destructive Testing)

非破壞性檢測乃是運用各種不同的物理方法，對於材料、構件或成品以不破壞其原有的組織、性能、品質和可用性的原則下，來檢測潛伏於物件表面或內部的缺陷和量測其各種不同之物理量，進而將所檢測之資料加以分析後，決定物件品質的完整性及使用的可靠性。

一般常用於土木結構物的非破壞性檢測有超音波波速及基本頻率試驗，茲分述如下。

2.2.1 超音波量測混凝土波速

一般而言，人耳可聽見的音波，頻率約介於 16 Hz ~ 20 kHz 之間，當音波頻率高於此範圍時，則人耳便無法聽見，因此，當人耳無法聽到高頻率之聲音（音波），即稱為超音波。而通常超音波用來檢測混凝土的頻率範圍，約在 20 kHz ~ 250 kHz 之間，其中又以 50 kHz 左右較為常用（張維麟等，1987）。

超音波量測混凝土波速之原理，乃利用一脈波產生器之探頭，置於混凝土表面觸發應力波源，此應力波傳遞於混凝土中，經一段距離，由置於混凝土另一端之接收探頭接收，經儀器內的時間迴路計算，可求得波在混凝土內傳遞的時間 t ，若兩探頭距離為 L ，則波速 C_p 可由式(2.1)計算而得（Malhotra et al., 2004；陳勇智，2004）。

$$C_p = \frac{L}{t} \quad (2.1)$$

以超音波檢測混凝土波速時，由發射端及接收端之探頭配置方式不同，可分為下列三種檢測法：

1. 直接傳遞法 (Direct Transmission)：乃是將探頭底部以面對面方式放置於試體兩側進行量測，如圖 2.4 所示。由於此法之接收探頭能接收到音波最大能量，因此，此法為量測超音波波速最適當之方法。
2. 半直接傳遞法 (Semi-direct Transmission)：乃是將探頭放置試體相鄰垂直兩側量測波速，如圖 2.5 所示。此配置為了避免超音波在傳遞過程中衰減而無法接收，因此，發射探頭與接收探頭間距不宜過大。
3. 間接或表面傳遞法 (Indirect or Surface Transmission)：乃是將兩探頭拉接放置於試體同一表面上進行量測，如圖 2.6 所示。由於表面量測所得之縱波振幅相當小，僅為直接傳遞法縱波振幅之 3% 以下，且訊號常會受到隨後振幅較大的表面波所干擾，故許多超音波儀器在使用此法時，常無法精確量測出縱波。

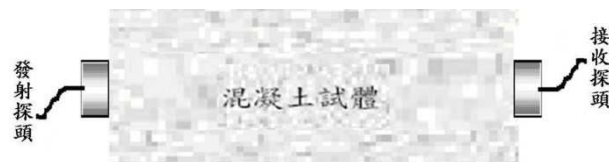


圖 2.4 直接傳遞法

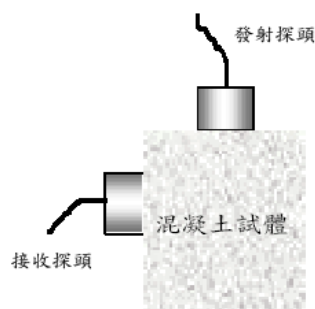


圖 2.5 半直接傳遞法

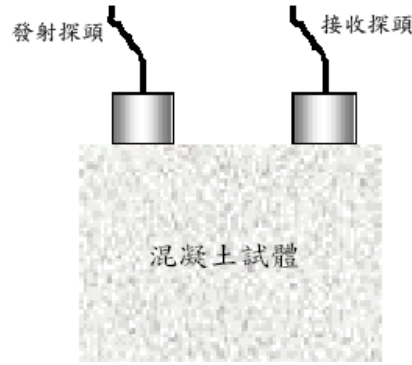


圖 2.6 間接傳遞法

2.2.2 混凝土試體基本頻率之量測

混凝土試體基本頻率之量測因振動配置方式不同，可分別求得混凝土試體的橫向、縱向及扭曲之基本頻率，以下分別對三種基本頻率量測的配置方式及動彈性模數計算詳加介紹。

1. 縱向基本頻率之測定

混凝土試體縱向基本頻率量測係將試體放置於支承上，且使試體自由縱向傳遞之振動，試體之安置須使驅振器垂直作用於試體一端表面中央，再將收振器附著於試體另一端表面上，配置如圖 2.7 所示。利用驅動器使試體振盪，進而以示波器分析，將可得到混凝土縱向基本頻率，再經由混凝土試體的縱向基本頻率及試體質量計算出動彈性模數，其公式如式 (2.2)：

$$E_D = Dwn^2 \quad (2.2)$$

其中 E_D ：混凝土動彈性模數值 (kgf/cm^2)

矩形試體... $D = 0.00408 \, l/bt$ (s^2/cm^2)

圓柱試體... $D = 0.00519 \, l/d^2$ (s^2/cm^2)

l ：混凝土試體長度 (cm)

d ：混凝土圓柱試體直徑 (cm)

t ：矩形試體橫斷面，沿振動方向之尺度 (cm)

b ：矩形試體橫斷面之另一尺度 (cm)

w ：試體質量 (kg)

n' ：縱向基本頻率 (Hz)

2. 橫向基本頻率之測定

混凝土試體橫向基本頻率量測係將試體放置於支承上，且使試體自由橫向傳遞之振動，試體之安置須使驅振器垂直作用於試體長度之中央，再將收振器附著於試體另一面上，配置如圖 2.8 所示。利用驅動器使試體振盪，進而以示波器分析，將可得到混凝土橫向基本頻率，再經由混凝土試體的橫向基本頻率及試體質量計算出動彈性模數，其公式如式 (2.3)：

$$E_D = Cwn^2 \quad (2.3)$$

其中 E_D ：混凝土動彈性模數值 (kgf/cm²)

矩形試體... $C = 0.000966 l^3 T / bt^3$ (s²/cm²)

圓柱試體... $C = 0.00164 l^3 T / d^4$ (s²/cm²)

n ：橫向基本頻率 (Hz)

T ：修正值，其值因旋轉半徑 k (圓柱試體 $k=d/4$ ，矩形試體 $k=t/3.464$) 對試體長度 l 之比及動柏松比 (μ) 而異，當動柏松比大於 1/6 時， T 值應按動柏松比修正為 T' ，修正公式如式 (2.4)，其修正值如表 2.1 所示。

$$T' = T \left[\frac{1 + (0.26\mu + 3.22\mu^2) k/l}{1 + 0.1328 k/l} \right] \quad (2.4)$$

表 2.1 T 修正值

k/l	T	k/l	T
0.00	1.00	0.09	1.60
0.01	1.01	0.10	1.73
0.02	1.03	0.12	2.03
0.03	1.07	0.14	2.36
0.04	1.13	0.16	2.73
0.05	1.20	0.18	3.14
0.06	1.28	0.20	3.58
0.07	1.38	0.25	4.78
0.08	1.48	0.30	6.07

3. 扭曲基本頻率之測定

混凝土試體扭曲 (torsional) 基本頻率量測係將試體放置於支承上，且使試體自由扭曲傳遞之振動，試體之安置須使驅振器垂直作用於試體一端之邊緣，再將收振器附著於試體另一端表面上，使產生扭曲效果，配置如圖 2.9 所示。利用驅動器使試體振盪，進而以示波器分析，將可得到混凝土扭曲基本頻率，再經由混凝土試體的扭曲基本頻率及試體質量計算出動彈性模數，其公式如式 (2.5)：

$$G = Bwn''^2 \quad (2.5)$$

其中 G ：混凝土動彈性模數值 (kgf/cm^2)

n'' ：扭曲基本頻率 (Hz)

B ： $4 lR/gA$ (s^2/cm^2)

R ：形狀因素

圓柱試體... $R = 1$

方形試體... $R = 1.183$

$$\text{矩形試體} \cdots R = \frac{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}{4(\frac{a}{b}) - 2.52(\frac{a}{b})^2 + 0.21(\frac{a}{b})^6}$$

a, b ：長方形斷面尺度 ($a < b$) (cm)

g ：重力加速度 (980 cm/s^2)

A ：試體斷面積 (cm^2)

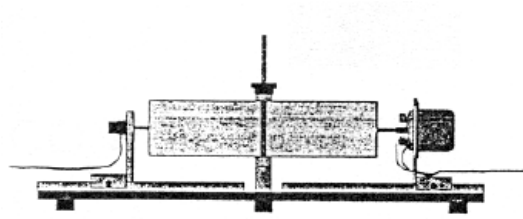


圖 2.7 混凝土試體縱向基本頻率量測配置圖

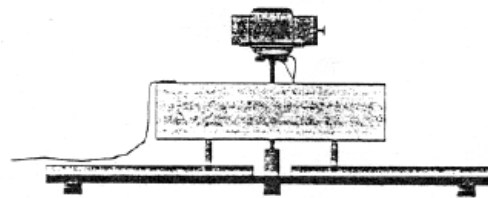


圖 2.8 混凝土試體橫向基本頻率量測配置圖

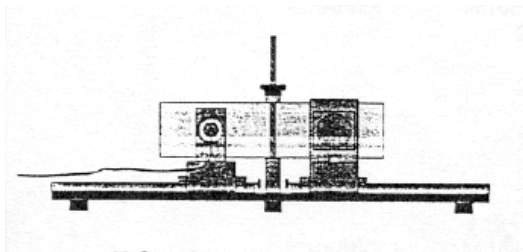


圖 2.9 混凝土試體扭曲基本頻率量測配置圖

2.2.3 混凝土非破壞檢測之影響因素

混凝土非破壞檢測（波速、基本頻率）之影響因素很多，除了因混凝土本身是由水泥、水、及粗細骨材等材料所組成的非均質材料之影響外，其組成的環境條件與狀態，均會對混凝土非破壞檢測時產生影響。

針對混凝土非破壞檢測之影響因素分別述敘如下：

1. 骨材的種類、形狀與含量

混凝土中由於抗壓強度所評估的是骨材與膠結材之間弱面破壞強度大小，而波速則是著重於混凝土內部波傳遞時，最短路徑所通過之時間。因此，在粗骨材的選用上，即使有相同配比且抗壓強度也相同的混凝土，亦可能會因為粗骨材的不同而造成波速的差異。

根據Jones研究中指出，當骨材含量越高時，混凝土波速則越高。混凝土波速會隨著骨材含量而增加，但對於抗壓強度卻反而降低。這是由於骨材含量增加，將造成膠結漿量不足，使得骨材與膠結材之間弱面增加則破壞機率隨著增加（Malhotra et al., 2004）。

2. 水泥種類

根據Jones研究中指出，水泥的種類對於混凝土波速並未有明顯的直接影響。影響波速的真正原因並非是水泥種類的本身，而是各水泥的水化速率。以早強水泥為例，早強水泥的速硬特性，加速水化作用反應，使混凝土加速早期抗壓強度發展，亦增加混凝土波速與動彈性模數（Malhotra et al., 2004；張奇偉，2004）。

3. 水灰比大小

當水灰比增加時，混凝土的密度、抗壓強度、撓曲強度等都會隨著下降，同時，混凝土波速與動彈性模數也會呈現下降之趨勢。

4. 養護條件

根據Ravindrajah (1992) 研究中指出，當相同的混凝土分別在水與空氣狀態下養護，則混凝土的波速與動彈性模數將有所差異。研究中發現，以空氣養護的混凝土之波速及動彈性模數較水養護的混凝土低，且隨著齡期增加越顯著。由於混凝土曝露空氣中，水份的損失導致混凝土波速及動彈性模數下降，甚至影響抗壓強度。

5. 含水狀況

一般而言，含水飽和的混凝土之波速及動彈性模數較乾燥混凝土高，但影響差異不大。波速及動彈性模數之含水狀況對於低強度及高強度之混凝土，則較有明顯差異；另一方面，高強度混凝土的內部結構較緻密、孔隙量少，受到水份的影響也較不明顯。

6. 齡期

在相同的養護狀態下，混凝土早期的波速及動彈性模數發展較為迅速，而晚期則為成長緩慢趨勢。當混凝土養護完成後，混凝土的波速及動彈性模數會因齡期增加而降低。導致波速及動彈性模數不增反減的主因是混凝土中水份損失，而混凝土產生乾縮造成骨材與漿體交界面出現微裂縫所致。

參、試驗材料與方法

3.1 試驗材料

本研究就混凝土配比設計主要考量不同礦物摻料添加量，對於混凝土材料長期受高溫作用下的影響。本研究針對純水泥混凝土、使用飛灰(10%、20%)及爐石(30%、50%)取代部份水泥製成之混凝土材料進行各項試驗研究，水泥依核一廠乾式貯存設施混凝土護箱目前規劃採用之Ⅱ型水泥。其中，試驗材料之化學成份及粗、細骨材物理性質，分別如表3.1及3.2所示。

表 3.1 試驗材料之化學成分

化學成分含量(%)	主要試驗材料		
	Ⅱ型卜特蘭水泥	飛灰	爐石
SiO ₂	24.42	54.09	33.34
Al ₂ O ₃	4.45	28.94	14.36
Fe ₂ O ₃	3.82	8.04	0.59
CaO	62.07	3.28	41.35
MgO	3.38	1.46	6.18
SO ₃	2.05	0.17	0.99
Na ₂ O	0.15	0.57	0.23
K ₂ O	0.60	1.54	0.20
C ₃ S	46.00	-	-
C ₂ S	27.00	-	-
C ₃ A	5.30	-	-
C ₄ AF	11.60	-	-
燒失量		5	
細度(cm ² /g)		3800	4060

表 3.2 粗、細骨材物理性質

試驗項目	試驗材料		試驗規範
	粗骨材	細骨材	
比重(SSD)	2.6	2.54	CNS 488
吸水率(%)	1.0	0.57	CNS 488
單位重(kg/m ³)	1636	—	CNS 1163
最大粒徑(mm)	20	—	CNS 486
細度模數(F.M.)	6.74	2.40	CNS 486

3.2 主要試驗設備

1. 混凝土拌合機

本研究進行混凝土拌合使用之拌合機為強拌式拌合機，拌合裝備由迴轉軸、臂及翼片等組成，用以攪拌粗、細骨材、膠結料及拌合水等混合料，混合攪拌製成混凝土，由Milano Italy公司所生產，其型號為STD2069拌合機，如圖3.1所示。

2. 抗壓試驗機

本研究共使用抗壓試驗機為全自動抗壓試驗機。全自動抗壓試驗機為進行混凝土抗壓試驗之用，由ELE公司所製造的200噸全自動抗壓試驗機，如圖3.2所示



圖 3.1 混凝土拌和機

圖 3.2 200 噸抗壓試驗機

3. 數位式比長計

本研究所使用 Hunb Oldt 公司所出產製造之數位式比長計，如圖 3.3 所示，精準度可量測到 $0.254\ \mu\text{m}$ ，其主要功能為量測混凝土試體受溫度變化所產生之收縮量，及水泥砂漿棒受到硫酸鹽侵蝕所造成的長度變化。



圖 3.3 數位式比長計

4. 超音波量測儀

本試驗所用儀器為 C.N.S 電子公司所製造之超音波量測儀，如圖 3.4 所示。超音波之原理乃利用音波在不同物質中有不同傳遞波速，藉以音波波速量測物質內部的緻密性。其主要功能為量測混凝土試體之縱向波，以瞭解混凝土受溫度變化前後對混凝土內部是否產生劣化，屬於非破壞性試驗。



圖 3.4 超音波量測儀

5. 共振量測儀

本試驗所用儀器為 C.N.S 電子公司所製造之 ERUDITE MKII 共振儀，並連接示波器，如圖 3.5 及 3.6 所示。共振儀之原理與超音波相似，而共振儀是以不同頻率強迫試體振盪，求得最大振幅，其主要功能為量測混凝土試體之縱向最大共振頻率，以瞭解混凝土長期持續受高溫作用下，是否對混凝土品質、耐久性產生影響，屬於非破壞性試驗。

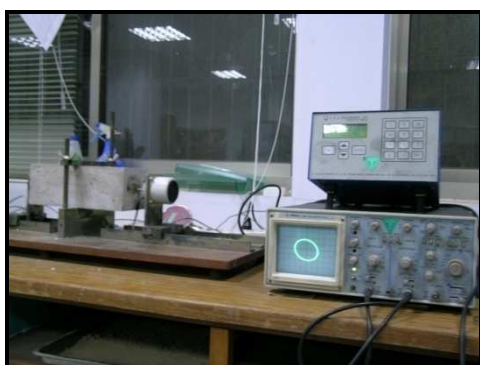


圖 3.5 共振儀裝置圖

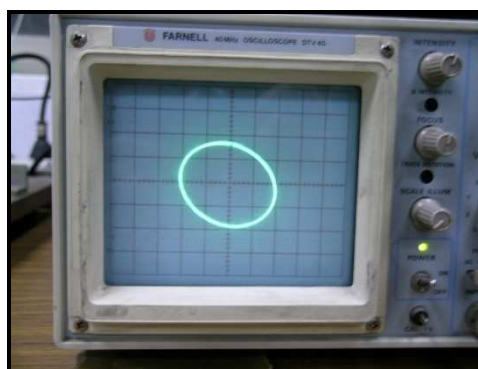


圖 3.6 示波器

6. 反彈鎚

本研究使用之反彈鎚為瑞士 proceq 公司所製造，如圖 3.7 所示。檢測範圍在 10 到 70 N/mm² 之間，符合 ASTM C805 的非破壞檢測規範。

7. 烘箱

本研究利用烘箱模擬混凝土結構物受用過核子燃料衰變熱作用之環境，係將混凝土試體放置於烘箱中，並配合不同溫度，試驗模擬溫度設定為 100°C 及 250°C，達所需試驗齡期後，再將混凝土試體取出進行後續試驗，其烘箱溫度設定範圍可由常溫至 500°C，溫度變異為±0.1°C，設備如圖 3.8 所示。



圖3.7 反彈鎚



圖3.8 烘箱

3.3 試驗內容及方法

3.3.1 試驗流程

本研究主要針對混凝土材料長期受高溫及濱海環境等作用，進行混凝土材料之耐久性研究。在試驗計畫方面，則主要分成材料配比設計與混凝土試驗兩大部份。

目前在材料配比設計上，在混凝土中添加礦物摻料將會影響混凝土耐久性。以ACI 349-97中有關核能安全混凝土結構物規定，考量各種不同摻料比例，進行混凝土配比製作，做為試驗所用之試體，並詳加探討添加卜作嵐材料因素的影響。

在試驗方面，環境模擬混凝土試體長期受高溫的影響下，分別利用力學及非破壞性檢測試驗微觀分析等進行探討，以評估乾式貯存混凝土護箱之混凝土材料的安全性。整體試驗研究流程如圖3.9所示。

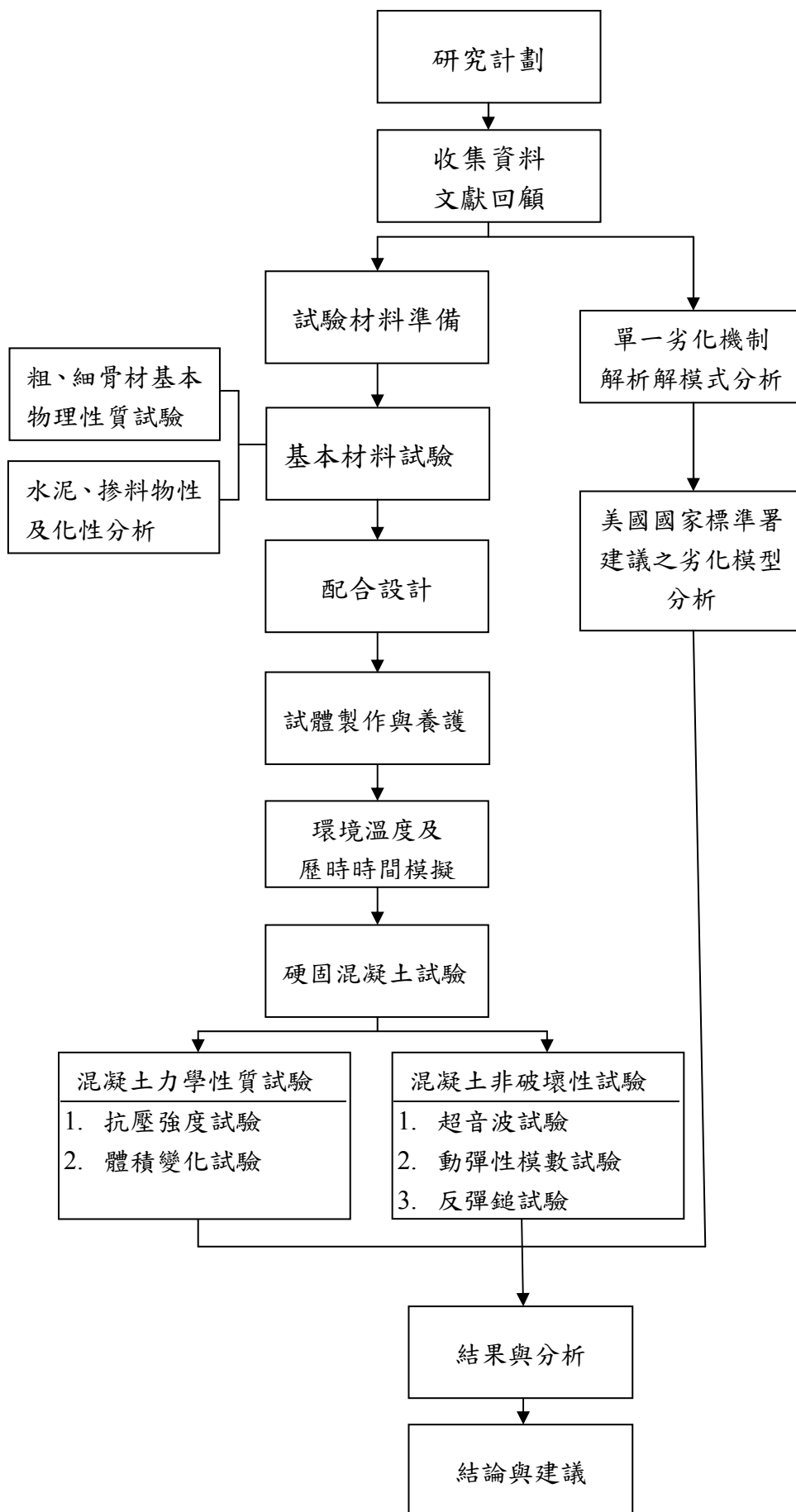


圖3.9 研究流程圖

3.3.2 試驗變數

本研究之試驗條件設定，主要針對混凝土材料受長期高溫及歷時時間長短的模擬。以下就針對環境模擬及試驗材料配比詳加說明。

1. 環境模擬

本研究試驗條件設定，主要因為乾式貯存設施與一般混凝土結構物之用途不同。混凝土護箱之設計應符合ACI349之規定，混凝土護箱及外加屏蔽結構體混凝土之最高局部溫度為應小於200 °F (93.3 °C)；而混凝土護箱及外加屏蔽結構體混凝土之最高整體溫度應小於150 °F (65.5 °C)。本研究設計模擬長期處於最高局部溫度，故進行模擬長期處於約94°C之溫度環境與常溫環境狀態下之試體作比對。此外，在環境溫度模擬前，所有試驗用試體置於相對濕度100%的養護室養護至42天，使混凝土發展成熟，再將試體從養護室取出直接放置於模擬溫度中，進行環境溫度及歷時時間的模擬（如表3.3所示），最後進行各項試驗。

2. 混凝土配比

本試驗混凝土配比設計主要考量不同礦物摻料添加量，對於混凝土材料長期受溫度的影響。本研究於混凝土配比設計，依據ACI 349-97中關於核能安全混凝土結構物的材料規定，將水膠比（w/b, water-binder ratio）固定，添加不同礦物摻料以取代不同比例之水泥，製作強度為4000 psi之混凝土配比。混凝土配比如表3.4所述，五種配比之水膠比均為0.5，且所有配比均添加F型高性能減水劑，使其工作性達到所要求之坍度。其中配比編號係依所添加礦物摻料不同比例而有所差別：純水泥OPC混凝土配比，此配比中未添加任何礦物摻料；F10與F20組配比則添加飛灰取代水泥用量，分別為10%及20%重量比例；S30與S50組配比則添加爐石取代水泥用量，分別為30%及50%重量比例。

試體製成直徑 $\phi 10 \times 20$ cm 混凝土圓柱試體及 $10 \times 10 \times 28$ cm 混凝土角柱。混凝土圓柱試體則進行力學性質試驗，混凝土角柱則進行非破壞性試驗及體積變化量測。

表 3.3 各環境溫度及歷時時間之施作試驗項目

	常溫				94℃			
	0 天	30 天	60 天	90 天	0 天	30 天	60 天	90 天
抗壓強度試驗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
體積變化	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
超音波波速	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
動彈性模數	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
反彈鎚試驗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

表 3.4 混凝土配比

配比編號	膠結材(kg/m ³)			骨材(kg/m ³)		水	減水劑
	II 型水泥	飛灰	爐石	粗骨材	細骨材	(kg/m ³)	(kg/m ³)
OPC	420	0	0	1091	607	210	4.2
F10	378	42	0	1091	592	210	4.2
F20	336	84	0	1091	577	210	4.2
S30	294	0	126	1091	602	210	4.2
S50	210	0	210	1091	597	210	4.2

w/b：0.5，卜作嵐材料取代水泥用量：飛灰(F)10%、20%；爐石(S)30%、50%

肆、結果與分析

本研究係模擬乾式貯存設施之混凝土材料長期受持續高溫效應及濱海區域特有環境下，以實驗室條件模擬混凝土受到內部用過核子燃料持續散發的衰變熱及外部環境因子交互作用，是否會造成混凝土屏蔽的劣化或受損。故本研究主要針對不同配比之混凝土材料在 94℃ 溫度狀態下進行模擬，待混凝土試體達環境模擬之齡期後再進行混凝土力學性質及非破壞性方法檢驗。

本研究所採用之混凝土試驗有混凝土抗壓強度試驗、混凝土體積變化量測以及非破壞性試驗之超音波量測、動彈性模數試驗及反彈鎚試驗。

4.1 抗壓強度

4.1.1 不同配比混凝土抗壓強度發展

混凝土材料評估品質優劣的重要參數包括強度、滲透性、體積穩定性等，其中又以抗壓強度為工程性質之主要指標。混凝土強度主要取決於骨材與膠結強度，當膠結材料中添加卜作嵐材料時，將產生卜作嵐反應消耗水泥漿體中的氫氧化鈣生成並 C-S-H 膠體，增加混凝土強度。因此，卜作嵐材料的種類及添加量多寡均會影響水泥漿體性質，導致混凝土產生差異。故本研究以不同配比之混凝土（如表 3.4），養護 42 天成熟後，依各歷時時間進行抗壓強度試驗，比較混凝土各種配比在常溫環境下之抗壓強度發展趨勢，試驗結果如表 4.1 及圖 4.1 所示。

表 4.1 混凝土各種配比常溫環境下之抗壓強度(kgf/cm²)

配比代號	歷時時間（天）			
	0	30	60	90 天
OPC	386.79	446.18	451.25	457.45
F10	377.84	413.63	461.17	463.23
F20	354.02	390.13	452.54	455.38
S30	312.30	383.66	425.49	428.56
S50	303.46	327.28	357.03	359.67

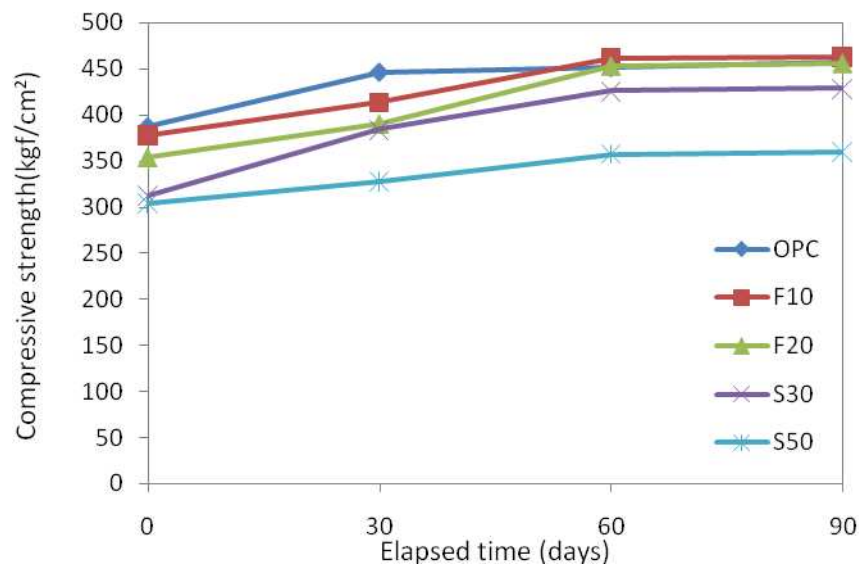


圖 4.1 混凝土各種配比常溫環境下之抗壓強度趨勢圖

由圖 4.1 中顯示，以卜作嵐材料（飛灰、爐石）取代水泥用量下，在常溫環境下其抗壓強度初期均低於純水泥 OPC 混凝土，研判其原因為研究中採用卜作嵐材料，相對水泥用量減少，造成抗壓強度較低之情形。使用飛灰（10、20%）歷時 90 天與純水泥 OPC 混凝土並無顯著差異，而使用爐石（30、50%）歷時 90 天抗壓強度明顯低於純水泥 OPC 混凝土，這是由於水泥取代量過大，反而因此造成強度降低。

在混凝土強度發展中，添加適量的卜作嵐材料（飛灰、爐石等），能提昇混凝土晚期強度，若添加過量則會適得其反。這是由於隨著混凝土歷時時間的增加，卜作嵐材料逐漸產生卜作嵐反應，消耗混凝土中的氫氧化鈣形成 C-S-H 膠體，而填充混凝土內大毛細孔隙、降低滲透性，因此增加混凝土強度（Young, 2002；Mehta, 1986）。圖 4.1 中使用適量飛灰（10、20%）及爐石（30%）之配比，其抗壓強度於後期已與純水泥 OPC 混凝土相近。

4.1.2 環境溫度對混凝土抗壓強度之影響

本研究主要模擬乾式貯存設施之混凝土材料，混凝土長時間受用過核子燃料所產生之衰變熱作用下之行為。五種配比之混凝土，在受環境溫度（常溫及 94°C）影響下，其抗壓強度發展如下所述。

1. 環境溫度對純水泥 OPC 混凝土抗壓強度之影響

純水泥 OPC 混凝土在不同環境溫度與歷時時間下，其抗壓強度發展如圖 4.2 所示。由圖 4.2 中可看出，純水泥 OPC 混凝土在常溫與 94°C 環境下，並無較明顯差異，且隨歷時時間增加強度的發展略有提昇，但隨著歷時時間的延長強度趨於平緩。

由試驗結果研判，純水泥 OPC 混凝土長期曝露在 94°C 環境下，並不會造成試體強度折減。而在沈得縣等（1994）研究中指出，添加減水劑之混凝土受火害高溫作用後，殘餘強度則比未使用減水劑之混凝土高。換句話說，使用減水劑對於混凝土受高溫作用是無害的，甚至有提昇混凝土抗熱能力的效果。

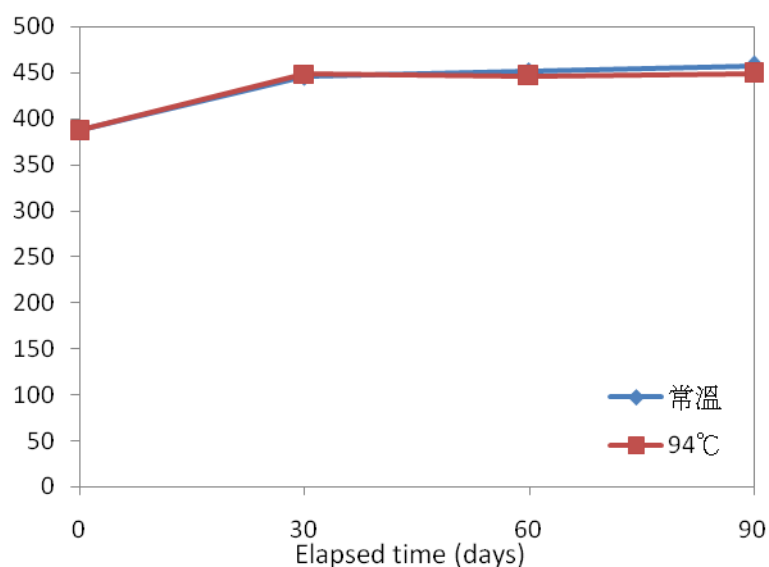


圖 4.2 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展

2. 環境溫度對飛灰取代水泥之混凝土抗壓強度之影響

飛灰取代水泥用量製成之混凝土，取代比例分別為 10% 及 20%，且在不同環境溫度與歷時時間下，其抗壓強度發展如圖 4.3 及 4.4 所示。由圖 4.3 可看出，飛灰取代水泥用量 10% 之混凝土在 94°C 環境下，隨著歷時時間愈長，抗壓強度則略低於常溫下混凝土，但差異不大。

另外，由圖 4.4 中顯示，飛灰取代水泥用量 20% 之混凝土在長期高溫環境下，其抗壓強度均略低於常溫下之混凝土，而伴隨著溫度愈高及歷時時間愈久，則強度仍略為成長。

由試驗結果研判，以飛灰取代部份水泥之混凝土，在長期高溫環境下，將造成混凝土抗壓強度略低於常溫環境下之混凝土，但影響有限。當飛灰取代量愈多時，其抗壓強度降低趨勢也略為增大。而在 Papayianni and Valliasis (2005) 的研究中，亦發現含有飛灰之混凝土，對於高溫環境下較為敏感，而取代量愈多則愈敏感，這主要原因是含有飛灰之水泥漿體具有較高的失水量及潛變所造成的。由於添加卜作嵐材料，使得混凝土內部微

結構孔隙細緻化，而增加毛細管張力，導致增加乾縮及潛變（Young, 2002）。整體而言，飛灰對於混凝土在高溫環境下的表現稍有影響，可能造成抗壓強度小幅降低。

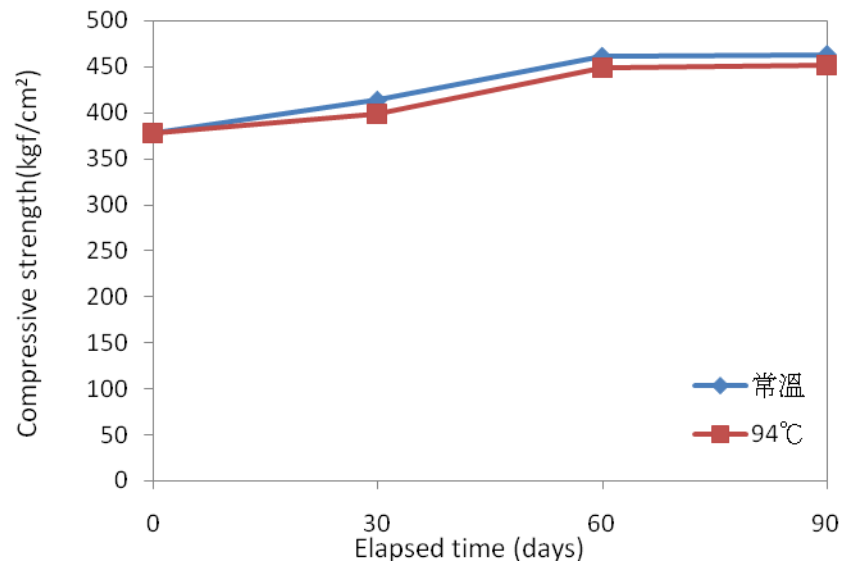


圖 4.3 使用 10% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展

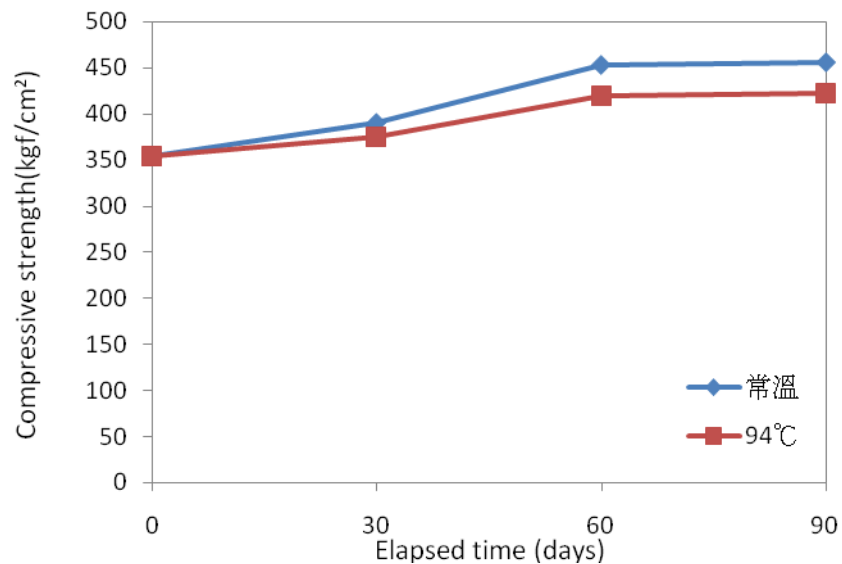


圖 4.4 使用 20% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展

3. 環境溫度對爐石取代水泥之混凝土抗壓強度之影響

爐石取代水泥用量製成之混凝土，取代比例分別為 30%及 50%，且在不同環境溫度與歷時時間下，其抗壓強度發展如圖 4.5 及 4.6 所示。

由圖 4.5 及 4.6 中可看出，爐石取代水泥用量 30%及 50%之混凝土在 94℃環境下，隨著歷時時間增加，其強度雖略有成長趨勢，但皆略低於純水泥 OPC 混凝土。由試驗結果研判，以高量爐石取代部份水泥之混凝土，在長期高溫環境下，對於混凝土抗壓強度而言稍有不和。這是由於添加高量的爐石，相對的減少水泥用量，而混凝土中添加卜作嵐材料時，加上混凝土在高溫環境下，水分快速蒸發，造成膠結材料無法繼續產生水化作用，因此影響其抗壓強度發展。

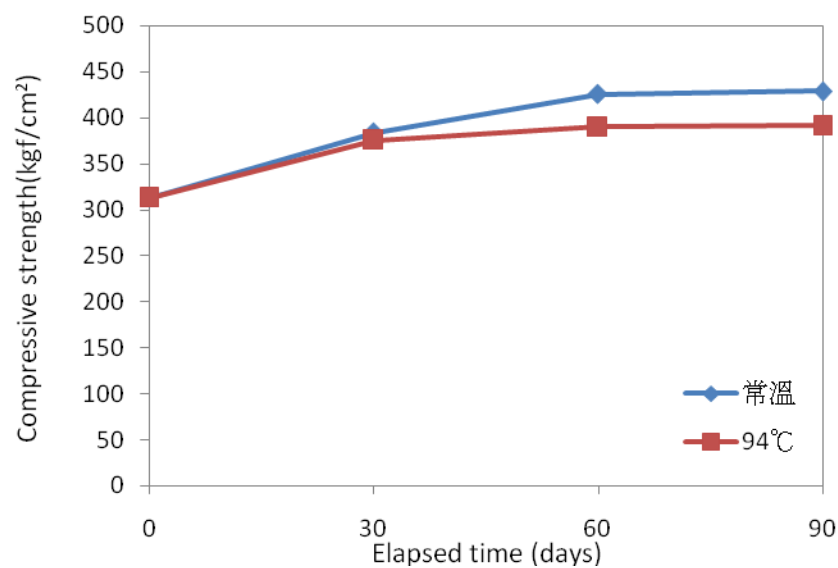


圖 4.5 使用 30%爐石之混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展

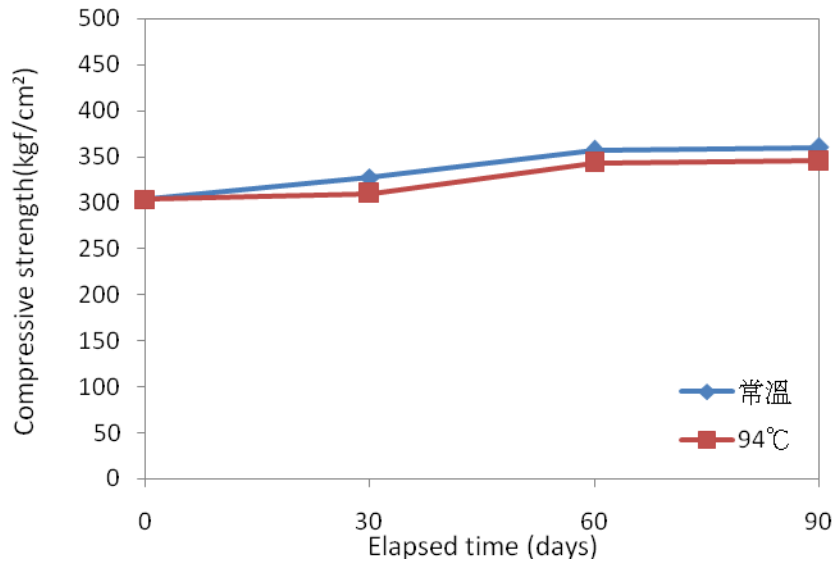


圖 4.6 使用 50%爐石之混凝土在兩種環境溫度下之抗壓強度發展

綜合上述結果得知，混凝土試體在乾式貯存設施在高溫(94°C)環境與常溫下比較，添加適量的化學及礦物摻料對於混凝土之抗壓強度值差異不大，其原因主要可分為兩個因素，第一由於混凝土在高溫作用初期還含有水份，類似高溫養護，從 Young (2002) 等人研究中指出，將養護溫度提高，可加速水泥的水化速率，促使混凝土強度早期發展，而在初期得到較好的強度；第二由於高溫作用後混凝土乾燥磨擦力增加，使得水泥漿體與骨材間產生互鎖效應，而凡得瓦爾 (Vander Waal's) 力增加，因此增加混凝土強度 (Young, 2002; Castillo, 1990; Dias, 1990)。

4.1.3 不同混凝土配比在相同溫度環境條件下之抗壓強度關係

在實務上，卜作嵐材料與減水劑已常使用在混凝土中，而添加適當的礦物或化學摻料，不但能有效的填充混凝土孔隙、增加混凝土流動性及緻密性，且在抗壓強度成長上也較一般混凝土來的優異。因此，本研究利用此特性，添加飛灰、爐石及減水劑等摻料製成之混凝土，再將混凝土放置於模擬的高溫環境 (94°C) 中，比較不同配比混凝土對於長期高溫環境下之性質，試驗結果如下所述。

五種混凝土試驗配比長期在高溫 94°C 環境下，其抗壓強度發展如圖 4.7 所示。由圖中可明顯看出，長期在 94°C 環境下，以純水泥 OPC 混凝土表現出最高的抗壓強度值，次者為添加飛灰（10%），而添加高量爐石（50%）之混凝土則在 94°C 環境中表現最低。此外亦可發現，在 94°C 環境下並未使各配比混凝土之強度差異出現明顯擴大的情形。

綜合上述結果，混凝土長期在 94°C 高溫環境下，以純水泥 OPC 混凝土及飛灰（10%）之混凝土，表現出較高的抗壓強度值。這是由於添加減水劑或適量的飛灰之混凝土，對於混凝土增加其流動性及緻密性，使得強度增加。而由於添加較大量之爐石（30、50%），因卜作嵐反應較慢，強度尚未發展成熟，且混凝土在高溫環境下使水分喪失，無法再繼續產生水化反應，導致強度發展終止，造成較低的強度值。由此可見添加適當之摻料能有助於混凝土強度發展，但過量則會適得其反。

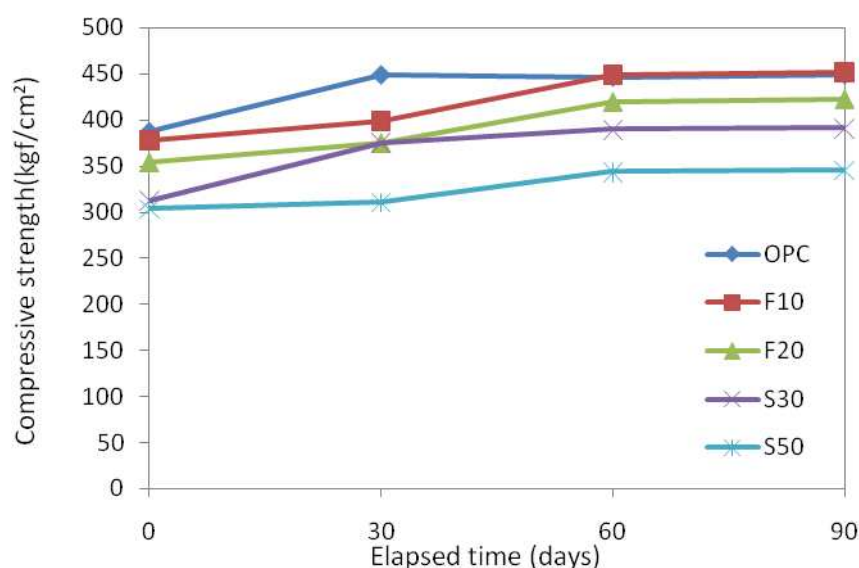


圖 4.7 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之抗壓強度發展

故整體而言，曝露於用過核子燃料乾式貯存設施之高溫(94°C)環境，對於混凝土之抗壓強度，無論添加卜作嵐材料與否，其直接影響效應有限，不致損及混凝土結構承載之能力。

4.2 體積變化

4.2.1 不同配比之混凝土體積變化

混凝土本身組成材料的水化及受到外在環境的改變（如溫度、濕度及時間等）均會造成混凝土體積變化。而尤其是溫度及濕度的改變，將造成混凝土內部的水份蒸發，導致混凝土收縮或進而產生裂縫而影響其耐久性（Young, 2002）。本研究係以添加不同摻料製成之混凝土，經養護 42 天成熟後放置常溫環境下，依各歷時時間進行混凝土體積量測，比較各配比之混凝土體積變化，試驗結果如圖 4.8 所示。由圖 4.8 中可看出，不論何種配比混凝土放置常溫環境下，試體體積均隨著齡期增加而有收縮情形，且五種配比混凝土收縮量差異並不顯著。

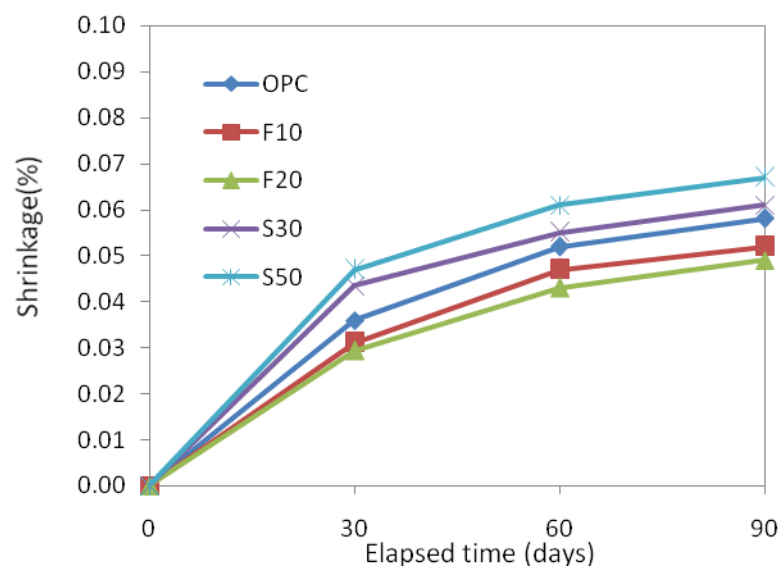


圖 4.8 混凝土各種配比常溫環境下之體積變化

4.2.2 環境溫度對混凝土體積變化之影響

本節在探討乾式貯存設施之混凝土材料，在常溫及高溫(94°C)環境溫度下，混凝土承受熱負荷所呈現之體積變化行為。五種配比之混凝土，在不同環境溫度影響下，其體積變化情形如下所述。

1. 環境溫度對純水泥 OPC 混凝土體積變化

純水泥 OPC 混凝土在不同環境溫度與歷時時間下，其體積之變化情形如圖 4.9 所示。由圖 4.9 中可明顯看出，置於常溫環境下之混凝土試體的體積收縮量明顯較 94°C 環境中的體積收縮量小，混凝土的體積收縮會隨著歷時時間增加而逐漸呈現趨緩。

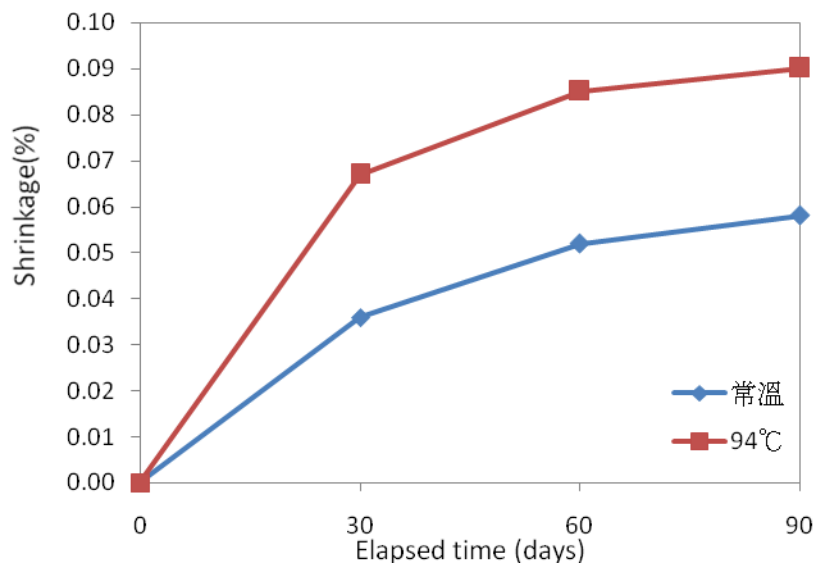


圖 4.9 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之體積變化

2. 環境溫度對飛灰取代水泥之混凝土體積變化

飛灰取代水泥用量製成之混凝土，取代比例分別為 10% 及 20%，在不同環境溫度與歷時時間下，其混凝土體積變化如圖 4.10 及 4.11 所示。由圖 4.10 及 4.11 可看出，不論飛灰取代水泥量多寡，均以常溫環境下混凝土試體的體積收縮量較小。

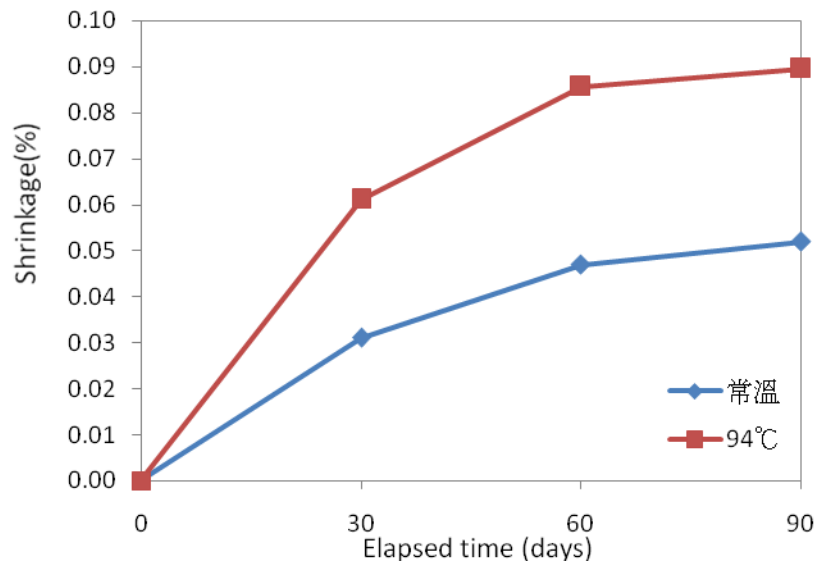


圖 4.10 使用 10% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之體積變化

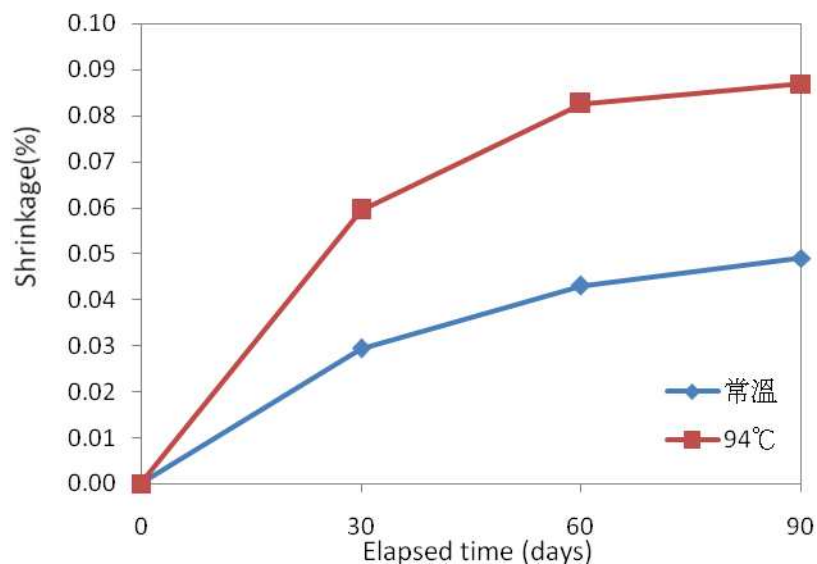


圖 4.11 使用 20% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之體積變化

3. 環境溫度對爐石取代水泥之混凝土體積變化

爐石取代水泥用量製成之混凝土，取代比例分別為 30% 及 50%，在不同環境溫度與歷時時間下，其混凝土體積變化如圖 4.12 及 4.13 所示。由圖中 4.12 及 4.13 中可明顯看出，使用 30% 及 50% 爐石製成之混凝土與使用飛灰之混凝土均有相似的趨勢，皆以常溫環境下混凝土試體有較小的收縮量。

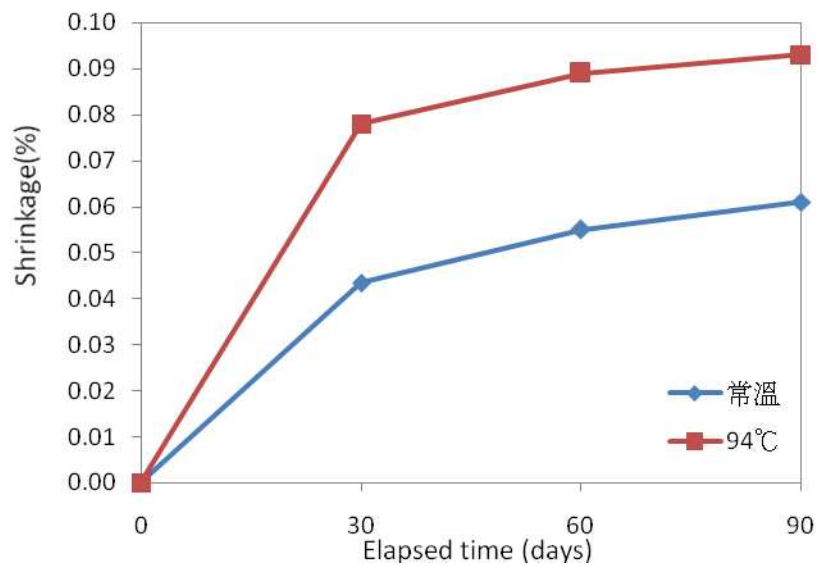


圖 4.12 使用 30%爐石之混凝土在兩種環境溫度下之體積變化

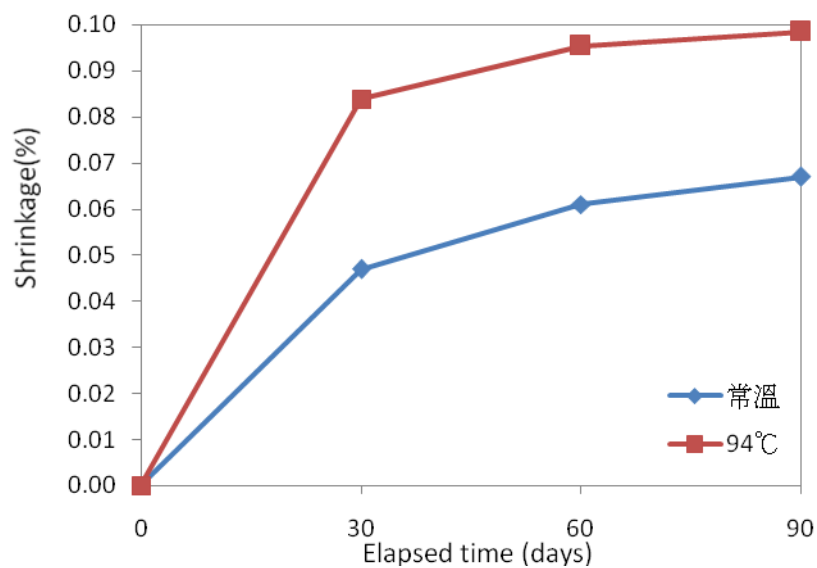


圖 4.13 使用 50%爐石之混凝土在兩種環境溫度下之體積變化

由以上試驗結果得知，不論何種的混凝土配比，均以常溫環境下混凝土收縮變化最小，且當環境溫度愈高時，混凝土體積收縮量將愈大。這是由於混凝土在常溫環境下，溫度及濕度改變造成混凝土內部之大孔隙及中孔隙的水分部份蒸發散失，使得混凝土產生收縮現象。而混凝土受到溫度升高時，除了導致混凝土內部的大小孔隙水散失之外，甚至使得 C-H-S 膠

體層間水喪失及 C-S-H 膠體的分解，因此造成混凝土收縮量增加（Young, 2002；Mehta, 2002；黃兆龍，1999）。當混凝土受高溫作用後水份迅速蒸發散失，造成混凝土產生收縮，而由於混凝土的組成材料熱膨脹係數不同，使得骨材與水泥漿體界面變形不一致，因此，可能在此界面形成微裂縫，進而對混凝土產生劣化影響。

4.2.3 不同配比之混凝土在相同環境條件下之體積變化

本節探討不同用量之卜作嵐材料取代水泥所製成之五種混凝土試驗配比長期受高溫(94°C)環境下，其體積變化情形如圖 4.14 所示。由圖 4.14 中可看出，以飛灰取代量之混凝土與純水泥 OPC 混凝土的體積收縮量相近，而以爐石取代量之混凝土的體積收縮量略高，可能與強度有關。陳柏忠(2005)研究指出體積收縮變化皆以取代水泥 20%之飛灰混凝土呈現出最大收縮量。由於飛灰中含有燃燒未完全之碳粒，且燒失量愈高顯示飛灰中的含碳量亦愈高。因此，當混凝土受高溫作用後，則添加飛灰含量愈多之混凝土，則體積收縮變形量愈大（Papayianni et al., 2005）。總之，若使用飛灰取代水泥應該注意飛灰品質的控制，也就是在燒失量要特別注意。

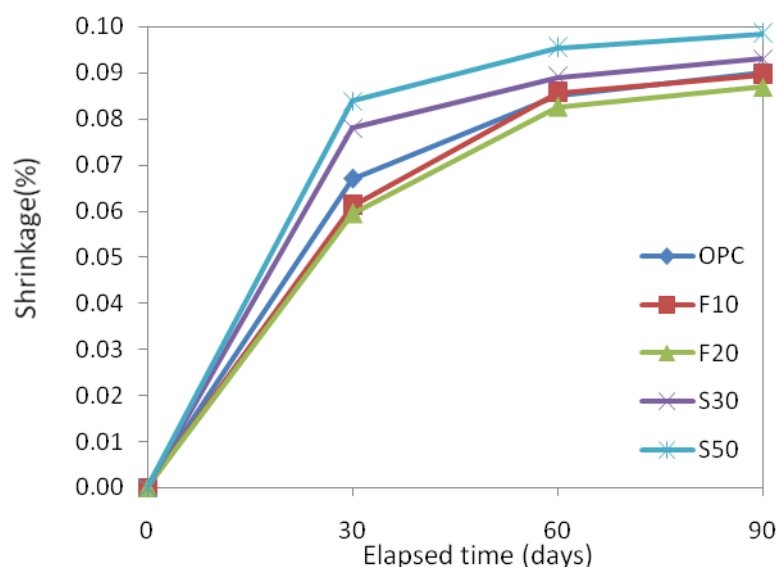


圖 4.14 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之體積變化

4.3 超音波波速

4.3.1 環境溫度對混凝土脈波波速之影響

超音波量測乃利用音波在不同物質中傳遞波速之不同，以量測物體內部狀況；應用於混凝土時，則是利用傳遞波速之不同，評估混凝土整體內部是否有孔隙或裂縫產生進而影響混凝土的品質。

1. 環境溫度對純水泥 OPC 混凝土脈波波速變化

純水泥 OPC 之混凝土在不同環境溫度與歷時時間下，其混凝土脈波波速之變化情形如圖 4.15 所示。由圖 4.15 中可看出，在常溫環境下之混凝土脈波波速，隨著歷時時間增加並無明顯變化。此外，置於常溫環境下之混凝土試體的脈波波速，明顯高於在 94°C 環境中的脈波波速。

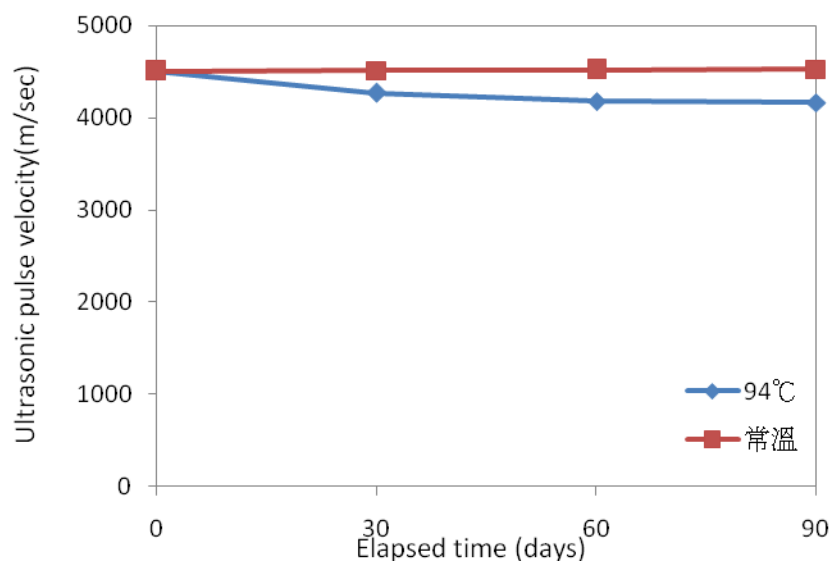


圖 4.15 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化

2. 環境溫度對飛灰取代水泥之混凝土脈波波速變化

飛灰取代水泥用量製成之混凝土，取代比例分別為 10% 及 20%，且在不同環境溫度與歷時時間下，其混凝土脈波波速變化情形如圖 4.16 及 4.17 所示。由圖 4.16 及 4.17 中顯示出，取代 10 及 20% 水泥之飛灰混凝土，

皆以置於常溫環境下之混凝土有較高的脈波速，且脈波波速隨著歷時時間增加呈現穩定而不再變化的趨勢。另外，當飛灰混凝土受到高溫環境作用，其混凝土脈波波速愈低。

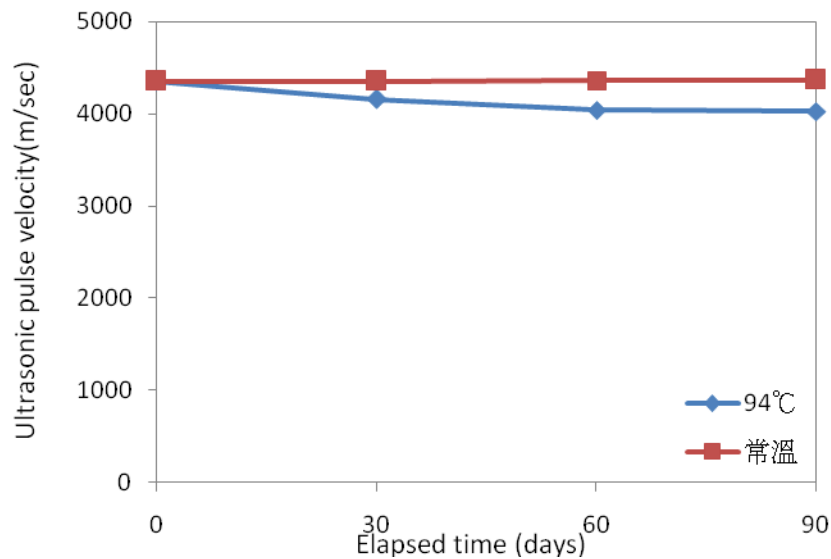


圖 4.16 使用 10% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化

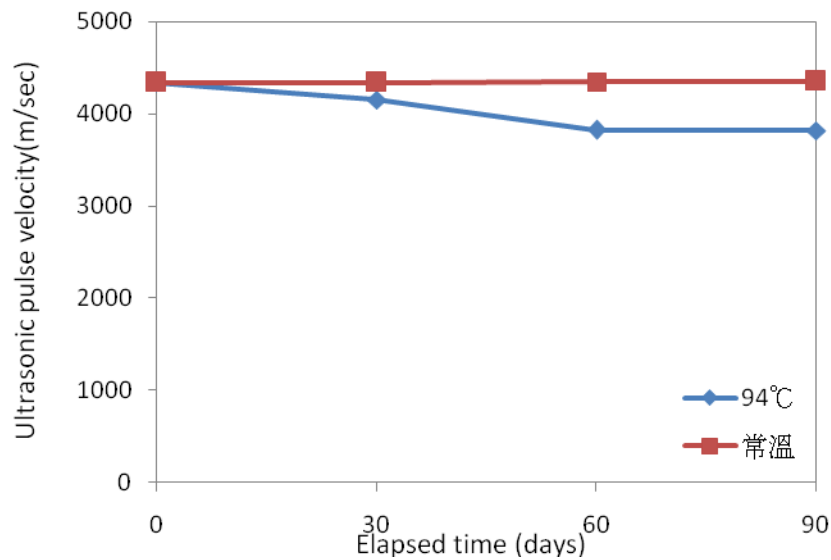


圖 4.17 使用 20% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之脈波波速變化

3. 環境溫度對爐石取代水泥之混凝土脈波波速變化

爐石取代水泥用量製成之混凝土，取代比例分別為 30% 及 50%，且在不同環境溫度與歷時時間下，其混凝土脈波波速變化情形如圖 4.18 及 4.19 所示。由圖 4.18 及 4.19 中可以看出，不論爐石量的多寡，均與純水泥 OPC 混凝土及使用飛灰之混凝土呈現類似的趨勢，同樣是在常溫環境下能獲得較高的混凝土脈波波速，當混凝土受環境高溫作用，則脈波波速損失增大。

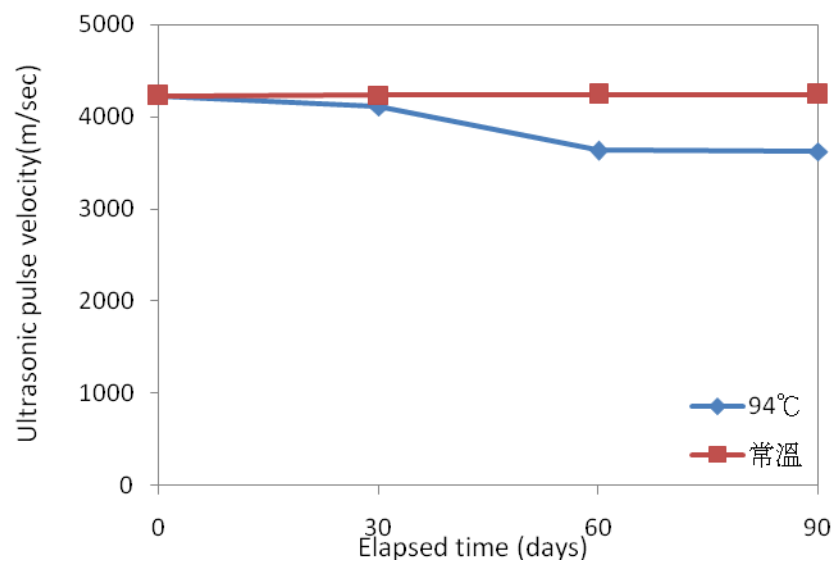


圖 4.18 使用 30% 爐石之混凝土在各環境溫度下之脈波波速變化

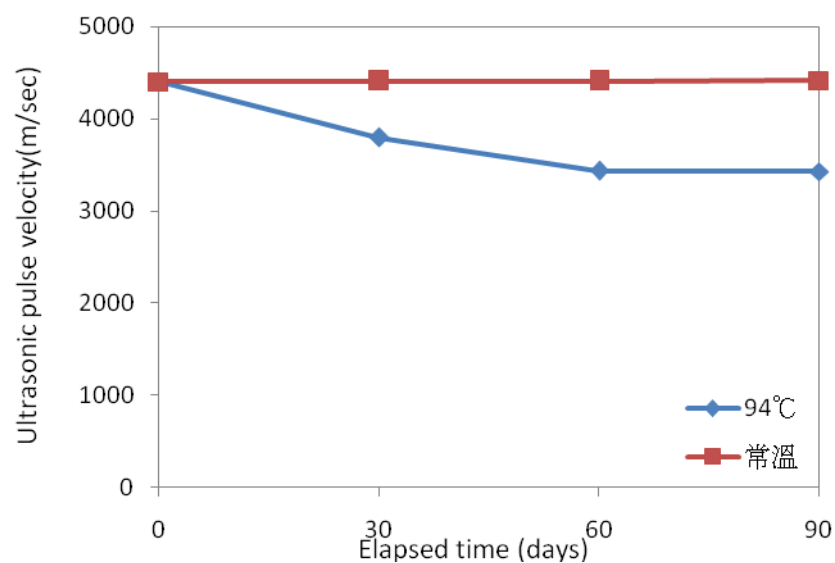


圖 4.19 使用 50% 爐石之混凝土在各環境溫度下之脈波波速變化

綜合上述試驗結果發現，不論何種配比之混凝土試體皆以在常溫環境下，可獲得較高的脈波波速值，但波速隨著歷時時間增加並無明顯差異。而混凝土長期置於 94°C 環境下，其脈波波速明顯低於常溫環境下。因此，可研判環境溫度會對混凝土脈波波速產生影響。

Ravindrarajah et al. (2002) 及 沈得縣等 (1994) 研究中指出，混凝土受高溫作用後，其脈波波速值隨著溫度增加而呈現衰減現象。這是由於混凝土受高溫作用後，其混凝土內部水分散失，且骨材與水泥漿體熱脹縮產生不諧和，使得此界面微裂縫增加，而溫度愈高時，此脹縮不均現象愈嚴重，因而加速微裂縫的產生，導致混凝土脈波波速嚴重折減。

4.3.2 不同混凝土配比之脈波波速變化

本節在討論不同添加量之卜作嵐材料製成之混凝土，對於混凝土長期在乾式貯存設施在常溫及 94°C 環境溫度狀況下，混凝土所承受熱負荷，比較各配比混凝土對超音波波速變化之影響。

1. 在常溫環境下之脈波波速比較

五種混凝土試驗配比在常溫環境下，其脈波波速變化情形如圖 4.20 所示。由圖 4.20 中可看出，在常溫環境下，此五種配比混凝土，其脈波波速均甚為接近，並隨著歷時時間增加而呈現穩定的波速。

2. 在溫度 94°C 環境下之脈波波速比較

五種混凝土試驗配比長期在溫度 94°C 環境下，其脈波波速變化情形如圖 4.21 所示。由圖 4.21 中可看出，混凝土長期在 94°C 溫度環境下，以純水泥 OPC 混凝土呈現出最高的波速，其次為取代 10% 飛灰、20% 飛灰及 30% 爐石水泥之混凝土，而以取代 50% 水泥之爐石混凝土的脈波波速最低，且受環境溫度作用所產生之波速降幅也較大。

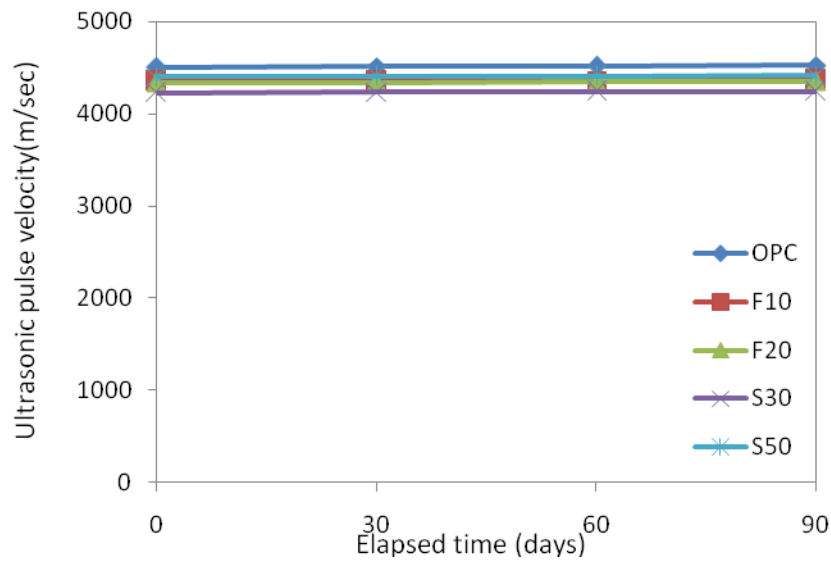


圖 4.20 各種混凝土配比在常溫環境下之脈波波速

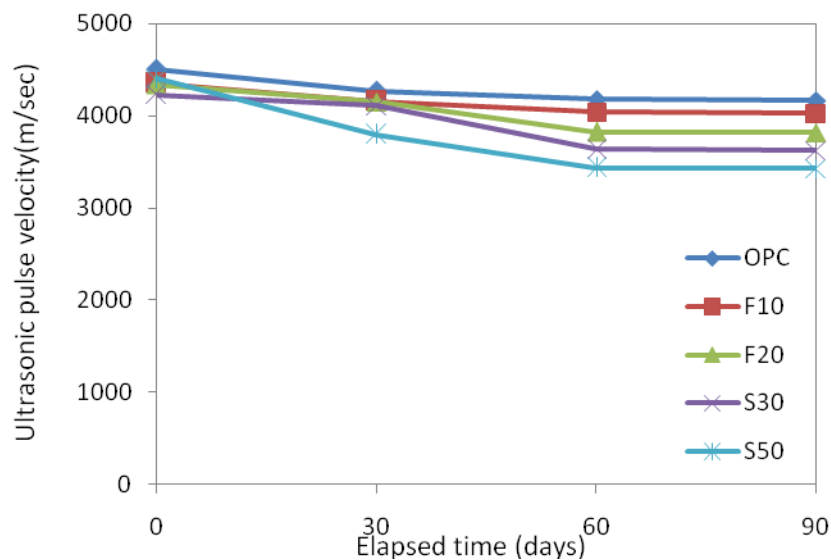


圖 4.21 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之脈波波速

綜合上述試驗結果得知，混凝土在乾式貯存設施不論在常溫及 94°C 溫度環境下，其脈波波速皆以純水泥 OPC 之混凝土呈現出最大波速。五種混凝土在 94°C 環境下，不論卜作嵐材料種類，當取代水泥比例愈多，則混凝土脈波波速將折損愈嚴重。其原因可歸於下列兩個因素。第一是由於混凝土中添加卜作嵐材料愈多，降低其水化熱，水化反應進行愈慢早期強度較

低，而當卜作嵐材料尚未達得較佳強度時，受到高溫作用，導致混凝土內部水份迅速蒸發，造成膠結材料失水無法繼續進行水化作用，使得骨材與水泥漿體鍵結能力降低；第二則是混凝土受高溫作用後，骨材與水泥漿體產生變形不諧合，因而增加微裂縫的產生，導致混凝土脈波波速降低。

4.4 動彈性模數

4.4.1 環境溫度對混凝土動彈性模數之影響

動彈性模數之量測原理主要利用混凝土試體的自然振動頻率以測得其值，而一般動彈性模數大小與骨材水泥漿體間之鍵結力有很大的關係，因此，目前動彈性模數主要用於評估混凝土耐久性或混凝土品質之評估。

1. 環境溫度對純水泥 OPC 混凝土動彈性模數之影響

純水泥 OPC 混凝土在不同環境溫度與歷時時間下，其混凝土動彈模數之變化如圖 4.22 所示。由圖 4.22 中可明顯看出，混凝土在常溫環境下，其動彈性模數值呈現較高，並隨著歷時時間增加呈現穩定狀態。而受 94℃環境溫度作用之混凝土，其動彈性模數值明顯低於常溫環境下之混凝土。

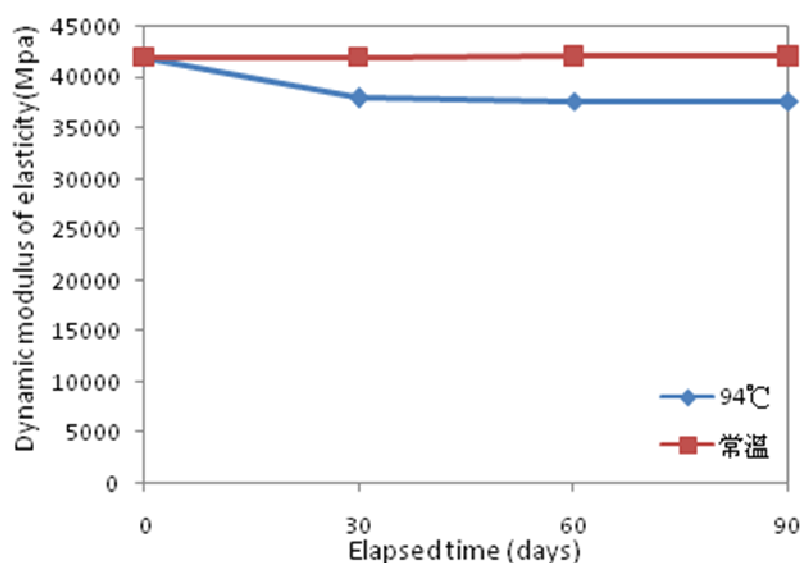


圖 4.22 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數

2. 環境溫度對飛灰取代水泥之混凝土動彈性模數影響

飛灰取代部份水泥製成之混凝土，取代比例分別為 10% 及 20%，在不同環境溫度與歷時時間下，其動彈模數之變化情形如圖 4.23 及 4.24 所示。由圖 4.23 中可看出，取代 10% 水泥之飛灰混凝土，在常溫環境下動彈性模數值隨著歷時時間增加呈現穩定狀態。而混凝土長期暴露於 94°C 環境時，在歷時 30、60 天有較明顯的折減而歷時 90 天則逐漸趨於平緩。

另外，由圖 4.24 中顯示，取代 20% 水泥之飛灰混凝土與取代 10% 水泥之飛灰混凝土呈現相似的趨勢，皆以常溫環境下之混凝土動彈性模值較為穩定，且明顯優於暴露在 94°C 溫度環境下之混凝土，但其值並無隨著歷時時間增加呈現明顯變化。當混凝土暴露於 94°C 環境下，則在歷時初期呈現明顯折減，歷時 90 天則逐漸趨於平緩。

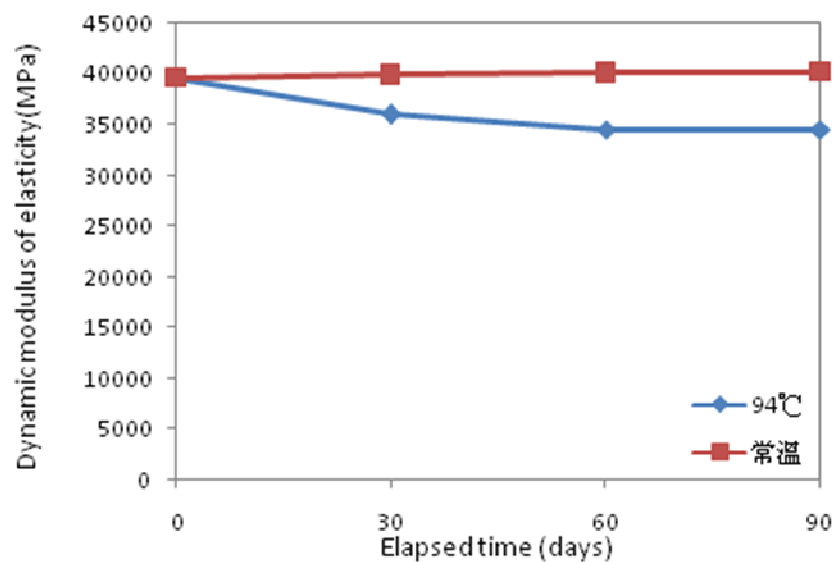


圖 4.23 使用 10% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數

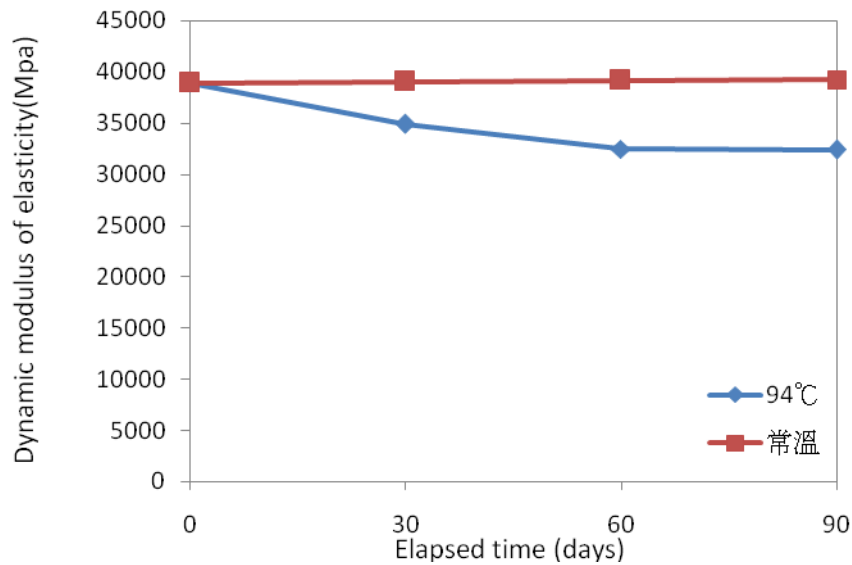


圖 4.24 使用 20% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數

3. 環境溫度對爐石取代水泥之混凝土動彈性模數影響

爐石取代水泥量製成之混凝土，取代比例分別為 30% 及 50%，且在不同環境溫度與歷時時間下，其動彈模數之變化情形如圖 4.25 及 4.26 所示。由圖 4.25 及 4.26 中可明顯看出，在常溫環境下之混凝土，其動彈性模數值在歷時時間初期略微成長，但隨著歷時時間增加呈現穩定狀態。混凝土長期暴露於 94°C 環境中，其動彈性模數明顯低於常溫環境之混凝土，且以使用 50% 爐石取代水泥之混凝土試體受高溫作用產生之動彈模數降幅最為明顯，研判應與此配比試體之卜作嵐取代量高，使其初期強度較低，晚期強度又因受高溫環境作用而使卜作嵐反應無法持續進行有關。

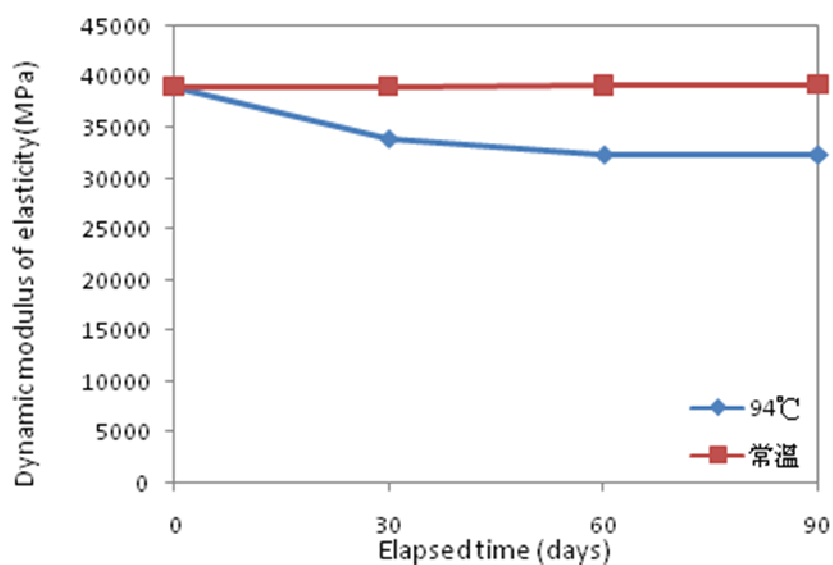


圖 4.25 使用 30%爐石之混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數

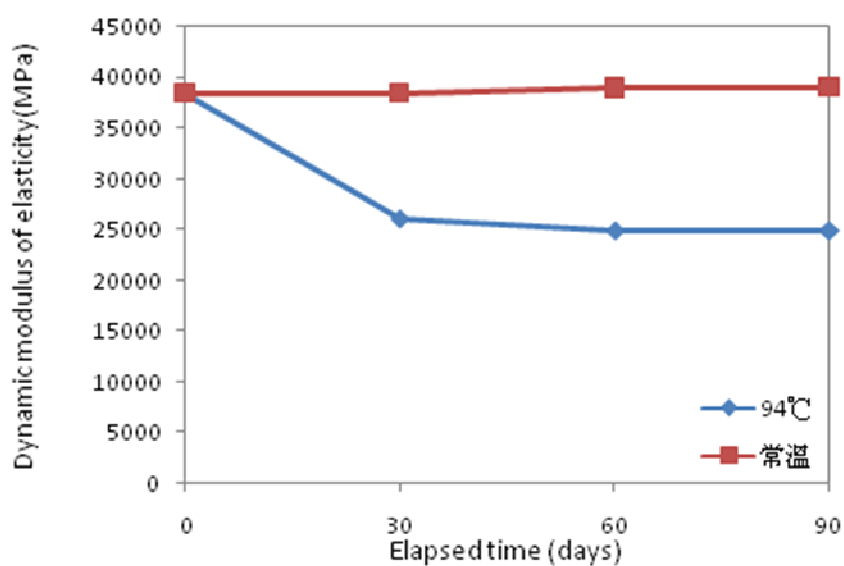


圖 4.26 使用 50%爐石之混凝土在兩種環境溫度下之動彈性模數

綜合上述討論結果得知，不論何種混凝土配比，皆以常溫環境下之混凝土能獲得最佳的動彈性模數值，且在歷時時間初期其值略微成長，但隨歷時時間增加呈現穩定狀態。當混凝土暴露於 94°C 環境時，其動彈性模數值明顯低於常溫環境，尤其在歷時時間初期折減趨勢最為顯著，但折減現象隨著歷時時間增加而有逐漸緩和現象。此外，由結果亦可發現，歷時時

間對於混凝土不論在常溫及 94℃ 環境中，歷時條件影響動彈性模數值較溫度影響不顯著。因此，可知溫度為影響混凝土動彈性模數值之主要因素。

Malhotra (2004) 認為影響混凝土動彈性模數的因素為強度及密度，但影響的主要參數則為密度。當混凝土受高溫作用後，動、靜彈性模數值降低現象，其因混凝土受熱後，試體表面收縮而與未收縮的內部產生差異變形而造成裂縫增加，且導致試體產生較大的變形量，使得動、靜彈性模數下降 (Young, 2002；黃兆龍，1999)。

Castillo et al. (1990) 研究中指出，混凝土受高溫作用下，混凝土內部的水份逐漸散失，而溫度愈高其水化產物將愈快被分解且產生裂縫，因此，導致混凝土的密度降低及孔隙、微裂縫增加，使得動、靜彈性模數值降低。另外，Dias et al. (1990) 也認為微裂縫的增加對於混凝土彈性模數及撓曲強度造成之損失較其對抗壓強度來的敏感，且亦隨著受熱溫度升高呈現衰減現象。

4.4.2 不同混凝土配比之動彈性模數變化

1. 在常溫環境下之動彈性模數比較

五種混凝土試驗配比在常溫環境下，其動彈性模數變化情形如圖 4.27 所示。由圖 4.27 中可看出，在混凝土在常溫環境下，其動彈性模數值以純水泥 OPC 混凝土及取代 10% 水泥之飛灰混凝土呈現最高值。其餘三種配比之動彈性模數值相近，且略低於前兩者配比之混凝土。而此五種配比混凝土，皆隨著歷時時間增加呈現穩定的動彈性模數值。

2. 在溫度 94℃ 環境下之動彈性模數比較

五種混凝土試驗配比在溫度 94℃ 環境下，其動彈性模數變化情形如圖 4.28 所示。由圖中可看出，混凝土在 94℃ 溫度環境下，以純水泥 OPC 混

凝土展現出最高的動彈性模數值，其次分別為使用 10% 飛灰、20% 飛灰及 30% 爐石之混凝土，而以使用 50% 爐石混凝土之動彈性模數值呈現最低值。此外，五種配比混凝土在溫度 94°C 環境下，在歷時時間 30 天動彈性模數呈現下滑現象，尤其添加卜作嵐材料愈多時，此現象愈顯著，但隨著歷時時間增加而下滑現象逐漸趨於緩和。

綜合上述試驗結果得知，乾式貯存設施之混凝土材料在溫度 94°C 環境中，其動彈性模數值皆較常溫環境下之混凝土動彈性模數來的低。其中，混凝土在 94°C 環境中，以純水泥 OPC 混凝土具有最高的動彈性模數值，而取代 50% 水泥之爐石混凝土則最低。而不論添加何種卜作嵐材料之混凝土，當在溫度 94°C 環境下，若取代水泥比例愈多，則混凝土動彈性模數將折減愈嚴重。

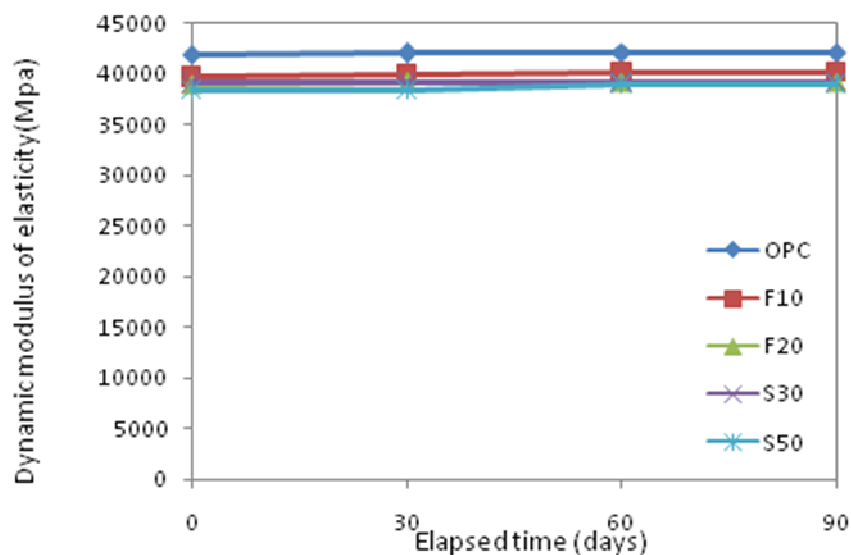


圖 4.27 各種混凝土配比在常溫環境下之動彈性模數

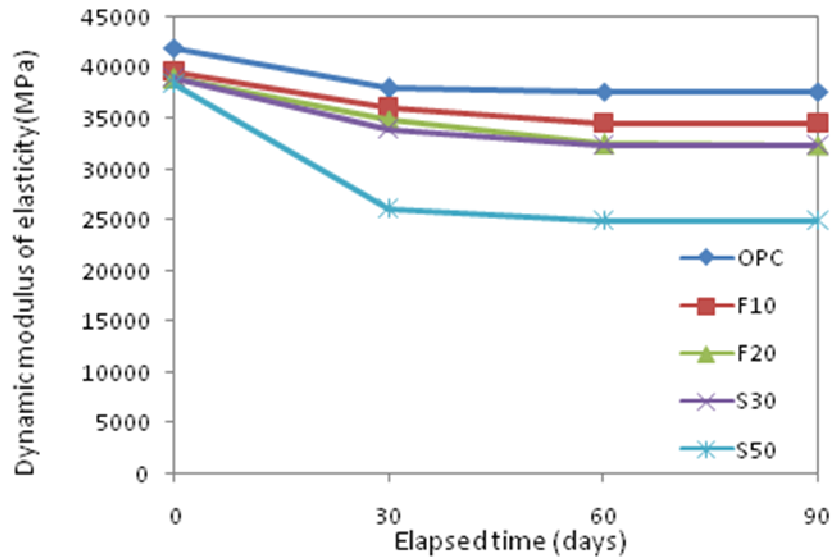


圖 4.28 各種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之動彈性模數

由 4.4.1 節中所述，混凝土中影響動彈性模數的主要因素為密度。而由於混凝土配比中添加卜作嵐材料，水化反應較慢，使得混凝土內部結構強度未發展完全，當在此狀況下混凝土受高溫作用後，其內部水份散失呈現無水狀態，造成混凝土無法進行水化，導致內部結構較不緻密。除此之外，混凝土內部結構尚未發展完全，且受高溫作用後，造成孔隙及縫裂增加，因而降低混凝土密度，使得混凝土動彈性模數降低。

4.5 反彈鎚試驗

4.5.1 環境溫度對混凝土反彈數之影響

反彈數試驗乃是利用反彈鎚，撞擊硬固混凝土表面，以測定其反彈數值之試驗法，所測定之反彈數，可利用於評估混凝土的均勻性及其概略之強度。本研究係依據 CNS 10732 之規定進行試驗。使用不同卜作嵐材料製成混凝土，經 42 天養護成熟後，將試體放置模擬環境溫度(常溫及 94°C)，依不同齡期進行反彈數之試驗，探討各配比混凝土受不同環境溫度影響下，其反彈數變化情形。

1. 環境溫度對純水泥 OPC 混凝土反彈數之變化

純水泥 OPC 混凝土在不同環境溫度與歷時時間下，混凝土反彈數如圖 4.29 所示。由圖 4.29 可看出，混凝土在常溫下之反彈數並不隨歷時時間增加而有明顯的變化，但受 94°C 環境作用下，反彈數則出現下降情形，且隨受高溫歷時時間增加而持續下降。

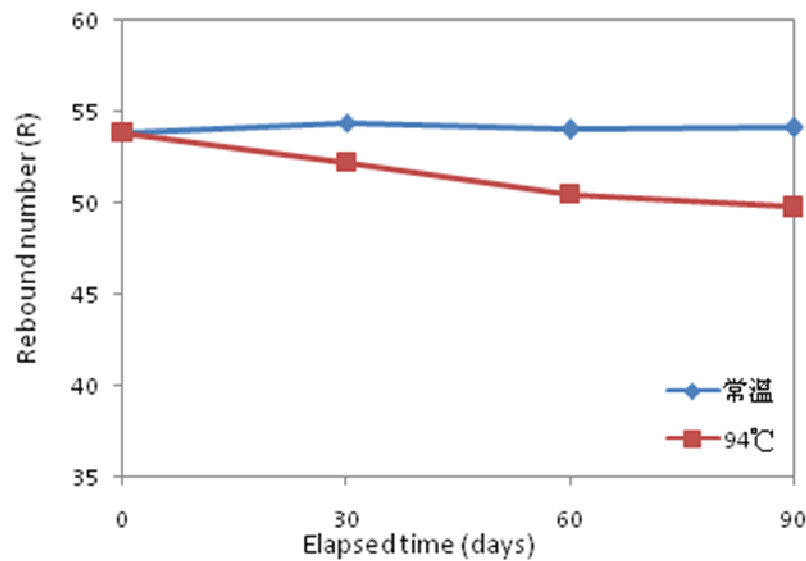


圖 4.29 OPC 混凝土在兩種環境溫度下之反彈數

2. 環境溫度對飛灰取代水泥之混凝土反彈數之變化

飛灰取代部份水泥製成之混凝土，取代比例分別為 10%、20%，在不同環境溫度與歷時時間下，其反彈數之變化情形如圖 4.30 及圖 4.31 所示。由圖 4.30 及圖 4.31 可以看出飛灰取代部份水泥之混凝土在常溫環境下得到較佳之反彈數，且隨時間增加有小幅的增大。當混凝土在 94°C 環境作用下可以看出反彈數有明顯的折減趨勢，且隨歷時時間增加，反彈數持續降低。

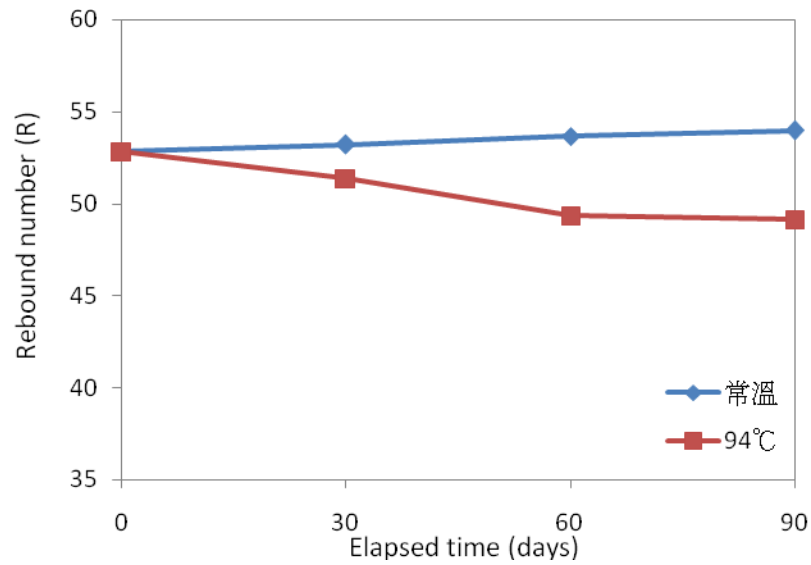


圖 4.30 使用 10% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之反彈數

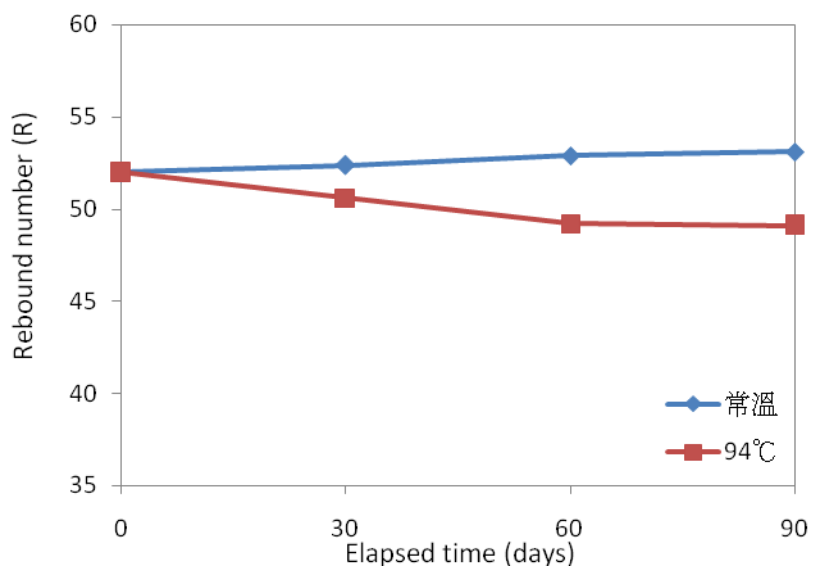


圖 4.31 使用 20% 飛灰之混凝土在兩種環境溫度下之反彈數

3. 環境溫度對爐石取代水泥之混凝土反彈數之變化

爐石取代水泥製成之混凝土，取代比例為 30% 及 50%，且在不同溫度及歷時時間下，其反彈數的變化情形如圖 4.32、圖 4.33 所示。由圖 4.32 及圖 4.33 可以明顯看出與飛灰取代水泥所製成之混凝土有相同的趨勢。在

常溫環境下反彈數會隨歷時時間增加而有小幅增大。但在 94℃ 溫度環境下反彈數有隨歷時時間增加有折減現象產生。

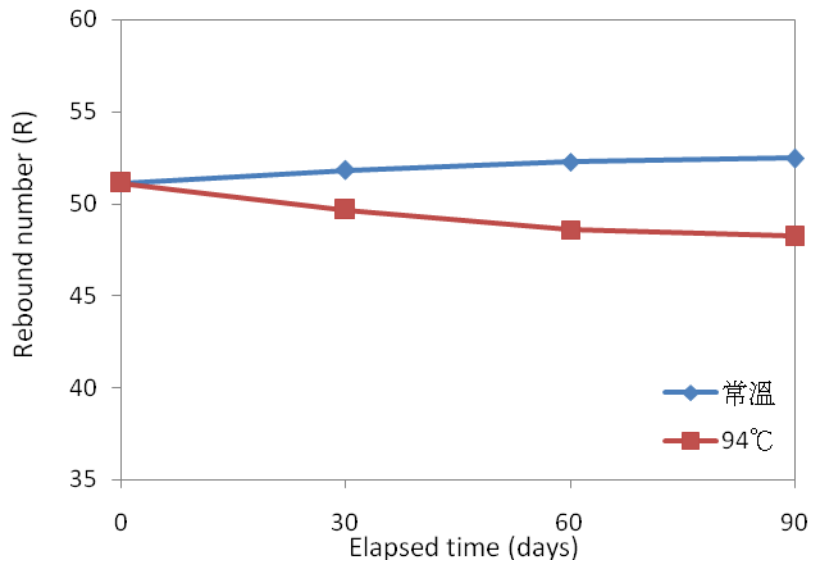


圖 4.32 使用 30% 爐石之混凝土在兩種環境溫度下之反彈數

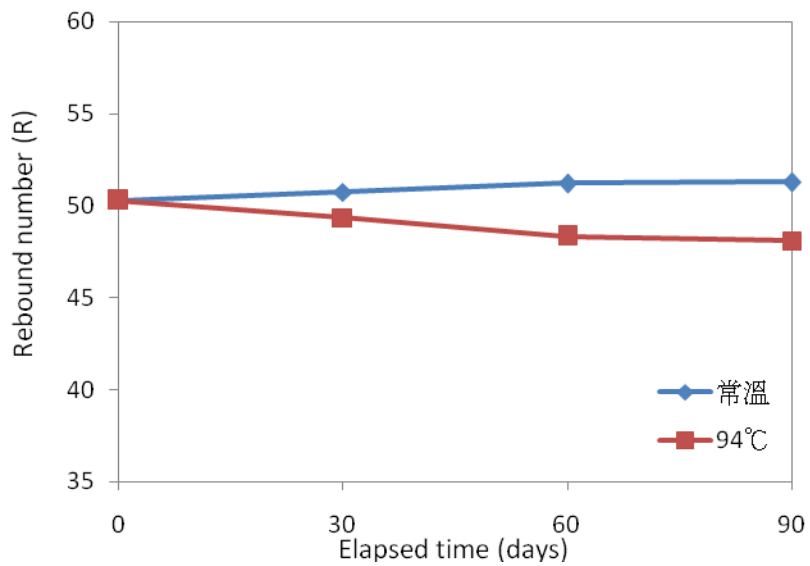


圖 4.33 使用 50% 爐石之混凝土在兩種環境溫度下之反彈數

4.5.2 不同混凝土配比下之反彈數變化

1. 在常溫環境下之反彈數比較

五種混凝土試驗配比在常溫環境下，其反彈數情形如圖 4.34 所示。可以由圖 4.34 看出，混凝土在常溫環境下，其反彈數以純水泥 OPC 混凝土最高，其次為使用 10% 飛灰、20% 飛灰及使用 30% 爐石，而使用 50% 爐石之混凝土最低。但五種配比混凝土，隨歷時時間增加其反彈數有小幅上升現象。

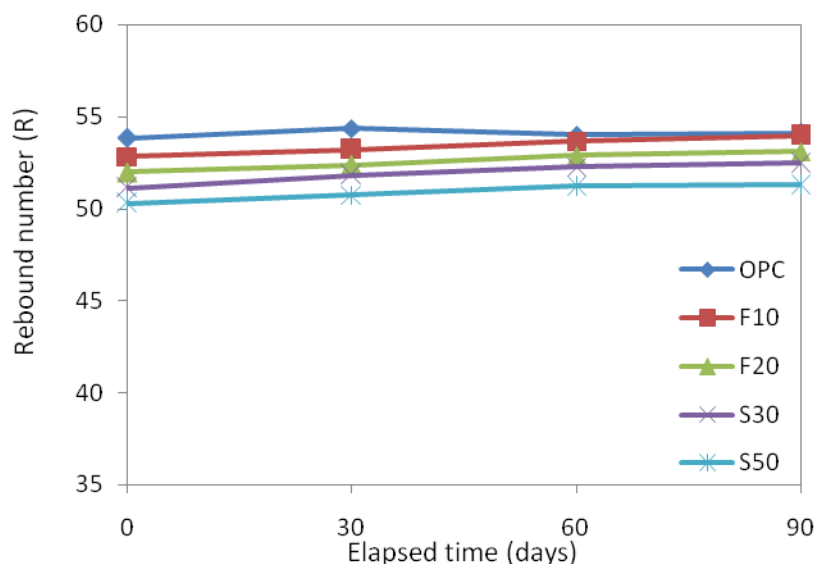


圖 4.34 五種混凝土配比在常溫環境下之反彈數

2. 在溫度 94°C 環境下之反彈數比較

五種混凝土試驗配比在溫度 94°C 環境下，其反彈數變化情形如圖 4.35 所示。以純水泥 OPC 混凝土展現出最高的反彈數，其次分別為使用 10% 飛灰、20% 飛灰及 30% 爐石之混凝土，而以使用 50% 爐石混凝土之反彈數呈現最低值。此外，五種配比混凝土在溫度 94°C 環境下，隨歷時時間增加反彈數呈現下滑現象，尤其添加卜作嵐材料愈多時，此現象愈顯著，但隨著歷時時間增加而下滑現象持續止進行，直至歷時 90 天其反彈數下降

現象有趨於緩和狀態。更長歷時時間混凝土反彈數的變化情形，將繼續進行量測，以掌握更長期的高溫環境對混凝土反彈數的影響效應。

綜合上述試驗結果得知綜合上述試驗結果得知，乾式貯存設施之混凝土材料在 94°C 環境中，其反彈數值皆較常溫環境下之混凝土反彈數來的低。其中，混凝土在 94°C 環境中，以純水泥 OPC 混凝土具有最高的反彈數值，而取代 50% 水泥之爐石混凝土則最低。由於混凝土配比中添加卜作嵐材料，水化反應較慢，使得混凝土內部結構強度未發展完全，當在此狀況下混凝土受高溫作用後，其內部水份散失呈現無水狀態，造成混凝土無法進行水化，導致內部結構較不緻密。除此之外，混凝土內部結構尚未發展完全，且受高溫作用後，造成孔隙及微縫裂增加，因而降低混凝土密度，使得混凝土反彈數降低。

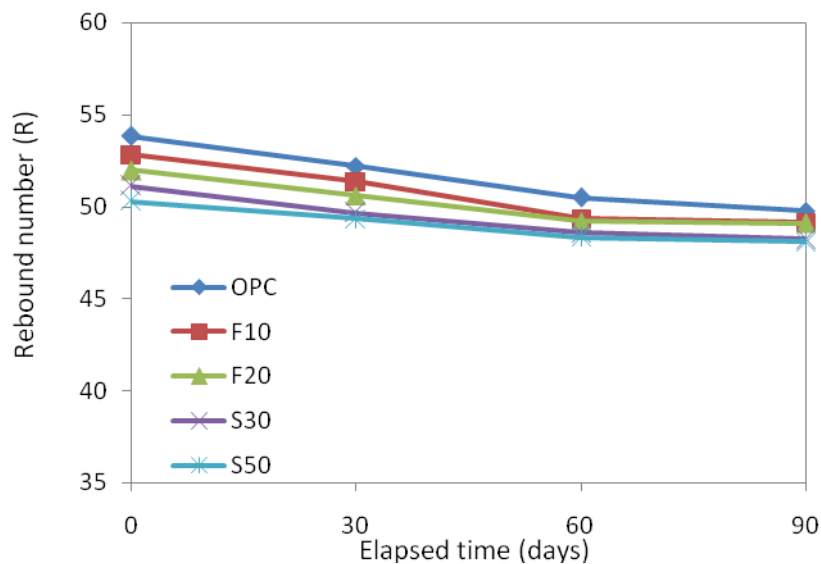


圖 4.35 五種混凝土配比在溫度 94°C 環境下之反彈數

4.6 混凝土配比受高溫作用之綜合評估

本研究為了模擬乾式貯存設施混凝土護箱受高溫環境作用，將各試驗配比混凝土置於模擬溫度環境中，再經由力學及非破壞、試驗分析後，評

估長期抵抗高溫環境混凝土的反應，如表 4.2 中所示，在抗壓強度方面影響甚微，體積變化、超音波波速、動彈性模數略有降低，反彈數則是到歷時 60 天止則有明顯降低，但歷時 90 天其反彈數下降現象有趨於緩和狀態。後續將持續觀察量測，往後以作為檢測混凝土護箱品質之依據。

針對不同混凝土試驗配比，包括未添加礦物摻料純水泥混凝土（OPC）、取代 10%、20% 水泥之飛灰混凝土（F10、F20）及取代 30%、50% 水泥之爐石混凝土（S30、S50）等五種，並以純水泥 OPC 混凝土組與其它配比進行比較，而各配比混凝土在不同試驗比較之結果詳列於表 4.3 中進行詳細之比較，表中標示“+”表示具正面改善效果；“-”表示具負面效果；“○”表示所獲結果與控制組相近。

表 4.2 高溫(94°C)作用下對混凝土性質產生之變化反應

混凝土性質	歷時 30 天	歷時 60 天	歷時 90 天
抗壓強度	影響甚微	影響甚微	影響甚微
體積變化	略為收縮	略為收縮	略為收縮
超音波波速	略有降低	略有降低	略有降低
動彈性模數	略有降低	略有降低	略有降低
反彈數	降低	降低	略有降低

表 4.3 各配比混凝土高溫(94℃)作用下試驗結果之綜合比較

試驗項目		配比種類	
		飛灰組	爐石組
力學性質	抗壓強度	○ (0.67%~ - 6.01%)	— (12.92%~23.16%)
	體積變化	— (0.67%~3.55%)	— (3.22%~9.32%)
非破壞檢測	超音波波速	— (3.38%~8.45%)	— (13.03%~17.78%)
	動彈性模數	— (8.50%~14.09%)	— (14.29%~34.02%)
	反彈數	— (0.25%~1.87%)	— (3.07%~5.26%)

註 1：+具正面改善效果；—具負面改善效果；○所獲結果與控制組相近。

註 2：以歷時 90 天結果作綜合比較。

伍、混凝土劣化分析模式評估與劣化試驗評估方法建立

混凝土之劣化機制通常可歸因於外在環境因素以及混凝土本身的內在因素。外在環境因素包括物理、化學及力學因素等；而內在因素造成的劣化則包括鹼質-粒料反應、粒料與水泥漿熱性質不同所造成之體積變化、及混凝土滲透性。就混凝土材料而言，由於其微結構直接影響到侵蝕物質(如硫酸鹽、氯鹽)在混凝土中的質量傳輸及中性化，因此被認為是影響其耐久性的最主要因素。以下就影響混凝土之劣化分析模式及劣化試驗評估方法作一說明。

5.1 混凝土劣化分析模式評估

針對乾式貯存混凝土護箱受高溫及濱海環境作用，探討硫酸鹽侵蝕、氯離子侵蝕及中性化等劣化機制對混凝土長期耐久性影響。針對各劣化分析模式整理，並評估各模式於乾式貯存設施混凝土之適用性。

混凝土劣化原因大多藉由離子傳輸運動侵入混凝土，而離子在混凝土中有著許多的傳輸方法，學者依照可能的傳輸機制，提出下列幾種傳輸行為：

(1)擴散傳輸：混凝土中離子擴散是一種由高濃度往低濃度移動之現象。在混凝土中離子擴散有幾種方式，如由毛細吸附和濃度梯度所引起之普通擴散（ordinary diffusion），另外則有因壓力、溫差、外力所引起之壓力擴散（pressure diffusion）、因溫度而加速離子移動的熱擴散（thermal diffusion）及利用電流等強制力移動的強制擴散（forced diffusion）等擴散機制（王茂齡, 1987）。

(2)因毛細作用移動：含有離子之水分子，因為混凝土的表面毛細作用而運動傳輸，以此方式移動的離子，大多分佈在未飽和混凝土的表面（Young, 2002）。

(3)因凡得瓦爾力而移動：凡得瓦爾力（Van der Waals force）是由於離子因相同極性，離子和離子或離子和介質間因同極電磁波而互相影響，混凝土中離子會因不同的化合物或不等向的顆粒影響，使離子因凡得瓦力互相排斥而移動（Young, 2002）。

(4)因吸附作用而產生移動現象：吸附作用是結合了前述第1點與第2點的移動方式，混凝土中離子因水產生了吸收作用而移動，乾燥的混凝土接觸水份產生了結合毛細作用和蒸發擴散的吸附運動進而使離子移動（Zibara et al., 2000）。

以下就混凝土劣化機制主要劣化模式整理如下：

1. 硫酸鹽侵蝕劣化模式(Model of Sulfate Attack)

硫酸鹽侵蝕是由於硫酸鹽與水泥中的含鋁、鈣成分，或者水泥水化所產生的單硫型水化硫鋁酸鈣（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ）反應，產生膨脹性的硫鋁酸鈣即鈣礬石（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ）。混凝土中的微孔隙、微裂縫的存在易使低溶解度的結晶生成，當結晶逐漸累積時，所產生的結晶壓力會使混凝土脹裂而造成破壞。當水中含有硫酸鹽時，會提高水泥中某些成份的溶解度，將使部份的水泥水化產物溶解引起混凝土的破壞。當 SO_4^{2-} 的含量大於2100 mg/L時，容易形成二水石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。石膏可能以溶液形式存在，當它與水化硫鋁酸鹽起作用時，則形成

30~32個結晶水的水化硫鋁酸鈣（即鈣礬石），造成體積膨脹，進而導致混凝土開裂破壞，示意圖如圖5.1所示。



圖5.1 硫酸鹽侵蝕示意圖

Rasmuson et al. (1987) 所提出的Shrinking Core Model，對於流體與固體接觸時之反應情形，以收縮核描述其反應模式，即流體與固體相接鋒面逐漸向固體內部進行反應。混凝土受硫酸鹽侵蝕是由於孔隙溶液中的硫酸根離子與水泥中鋁酸三鈣之水化產物反應，生成鈣礬石，其反應式簡化如(5.1)式所示。



根據費克定律(Fick's law)，硫酸根離子入侵混凝土的通量(flux)可以表示如式(5.2)。

$$N = -D_i \frac{C_0}{x} \quad (5.2)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{N}{C_s} = \frac{D_i C_0}{C_s x} \quad (5.3)$$

$$x = \left(\frac{2D_i C_0}{C_s} t \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

其中 x : distance (cm)

C_0 : concentration of sulfate in the bulk solution (mol/cm³)

C_s : concentration of tricalcium aluminate in the solid (mol/cm³)

D_i : intrinsic diffusion coefficient (cm²/s)

N : molar flux [mol/(cm²s)]

t : time (s)

範例試算(Example calculation)

利用式(5.4)所示之劣化模式，將相關的條件代入，即可推估硫酸鹽侵蝕時間與入侵深度的關係圖。根據吳清哲(2006)以混凝土試體浸泡硫酸鈉溶液推估所得，歷時180天純水泥OPC混凝土之硫酸鹽擴散係數為 5.47×10^{-12} cm²/s，假設 $C_s = 7.4\%$ ， $C_0 = 40, 100, 200$ ppm，代入式(5.4)即可利用式(5.4)預測硫酸鹽侵蝕剖面，如圖5.2 所示。

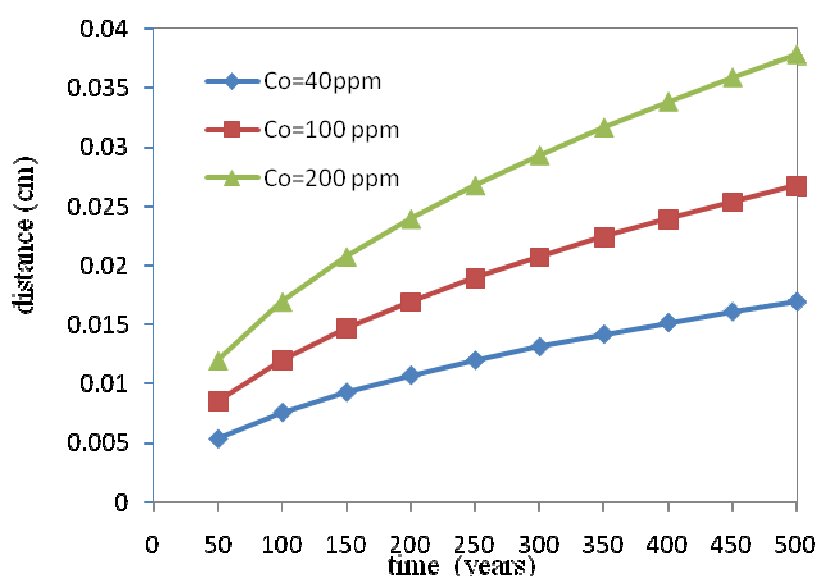


圖5.2 硫酸鹽侵蝕劣化深度與時間關係圖

2. 氯離子侵蝕劣化模式(Model of Chloride Attack)

根據移流-延散方程式解析解，多孔介質中溶質傳輸理論模式的應用除了原有基本方程式，尚須配合起始及邊界條件，才可求得解析解或利用數值方法，以得知溶質濃度之空間分佈或對時間之變化。

一維移流-延散方程式

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5.5)$$

D_x ：水力延散係數(coefficient of hydrodynamic dispersion)

v_x ：平均孔隙流速(average seepage velocity)

C ：溶質濃度

若考慮吸附效應(adsorption effects)

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (5.6)$$

$$S = K_d C^b \quad (5.7)$$

ρ_b ：容積密度； n ：孔隙率(porosity)

K_d ：吸附係數； b ：經驗常數(experimentally derived coefficient)

b 為1，則式(5.6)可表示為

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_b}{n} K_d \frac{\partial C}{\partial t} = \left(1 + \frac{\rho_b}{n} K_d\right) \frac{\partial C}{\partial t} = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5.8)$$

亦可表示為

$$\frac{D_x}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v_x}{R} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5.9)$$

R：遲滯係數(retardation factor)

針對半無限系統而言，將邊界條件

$C(x, t=0) = 0$; $C(x=0, t) = C_0$; $C(x \rightarrow \infty, t) = 0$ 代入，可求出式(5.9)解析解如式(5.10)所示。

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rx - v_x t}{2\sqrt{RD_x t}} \right) + \exp \left(\frac{v_x x}{D_x} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx + v_x t}{2\sqrt{RD_x t}} \right) \right] \quad (5.10)$$

若式(5.10)只考慮擴散項不考慮延散項，也就是說 v_x 趨近於零，則式(5.10)將改寫成如式(5.11)所示。

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx}{2\sqrt{RD_x t}} \right) = \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{\left(\frac{4D_x t}{R} \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (5.11)$$

$$\frac{C - C_{ini}}{C_{gw} - C_{ini}} = \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{\left(\frac{4D_x t}{R} \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (5.12)$$

其中

C：開始腐蝕氯離子臨界濃度

C_{ini} ：混凝土孔隙水氯離子初始濃度

C_{gw} ：混凝土周圍氯離子濃度

x：保護層厚度

範例試算(Example calculation)

採用盧秉璋(2006) 以加速氯離子擴散試驗推估所得，齡期180天純水泥OPC混凝土中氯離子之擴散係數為 $3.46 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，遲滯係數(R)採1.2，預估10年、100年、1000年時，保護層厚度5、10、15 cm，氯離子相對濃度剖面之變化如圖5.3所示。

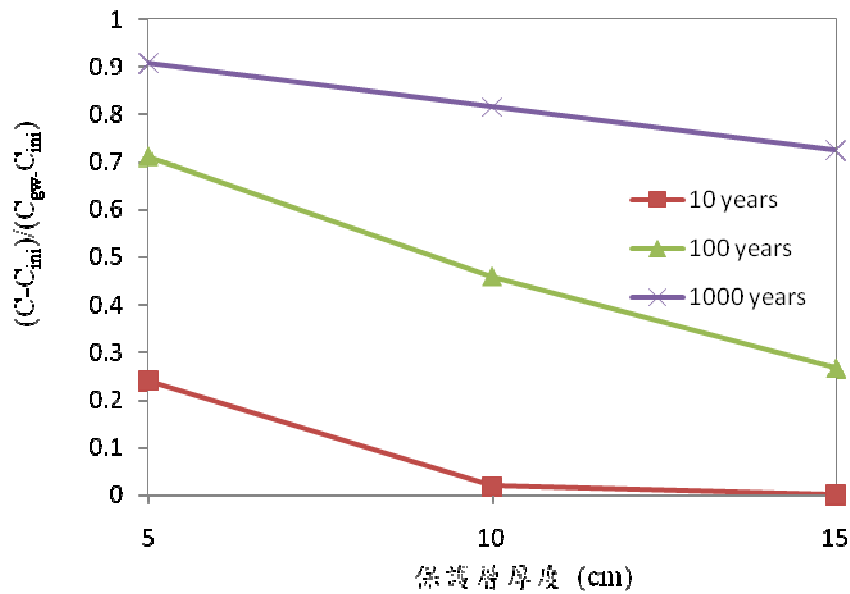
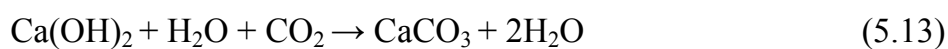


圖5.3 氯離子相對濃度與侵入深度關係圖

3. 中性化劣化模式(Model of Carbonation Attack)

鋼筋在混凝土中受到保護，主要在於混凝土內部孔隙水溶液能維持一個高鹼度之環境 ($\text{pH}=12\sim13$)。然而，當二氧化碳 (CO_2) 經由混凝土孔隙進入混凝土內與水泥水化產物氫氧化鈣形成化學反應，生成碳酸鈣 (CaCO_3)，進而使混凝土內之孔隙水的 pH 值下降。反應式如(5.13)所示。



此時，鋼筋表面之鈍態保護膜（Fe₂O₃）可能被破壞，使鋼筋產生銹蝕及體積膨脹，導致混凝土產生裂縫，保護層剝落，將危害混凝土結構物安全性 (Young, 2002; Mehta, 1986)。



根據費克定律(Fick's law)，碳酸入侵混凝土的通量(flux)可以表示如式 (5.15)。

$$N = -D_i \frac{C_{gw}}{x} \quad (5.15)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{N}{C_s} = \frac{D_i C_{gw}}{C_s x} \quad (5.16)$$

$$x = \left(\frac{2D_i C_{gw}}{C_s} t \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.17)$$

其中

C_s : bulk concentration of Ca(OH)₂ in concrete solid (mol/cm³)

D_i : intrinsic diffusion coefficient of Ca²⁺ in concrete (cm²/s)

C_{gw} : concentration of total inorganic carbon in groundwater or soil moisture
(mol/cm³)

x : distance (cm)

t : time (s)

範例試算(Example calculation)

利用式(5.17)的劣化模式將相關的條件代入，即可推估硫酸鹽侵蝕時間與入侵深度的關係圖。假定混凝土擴散係數為 $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ ， C_s 採 0.02 mol/cm^3 ， C_{gw} 為2, 20, 200 ppm，代入式(5.17)即可利用式(5.17)預測中性化劣化深度，如圖5.4所示。

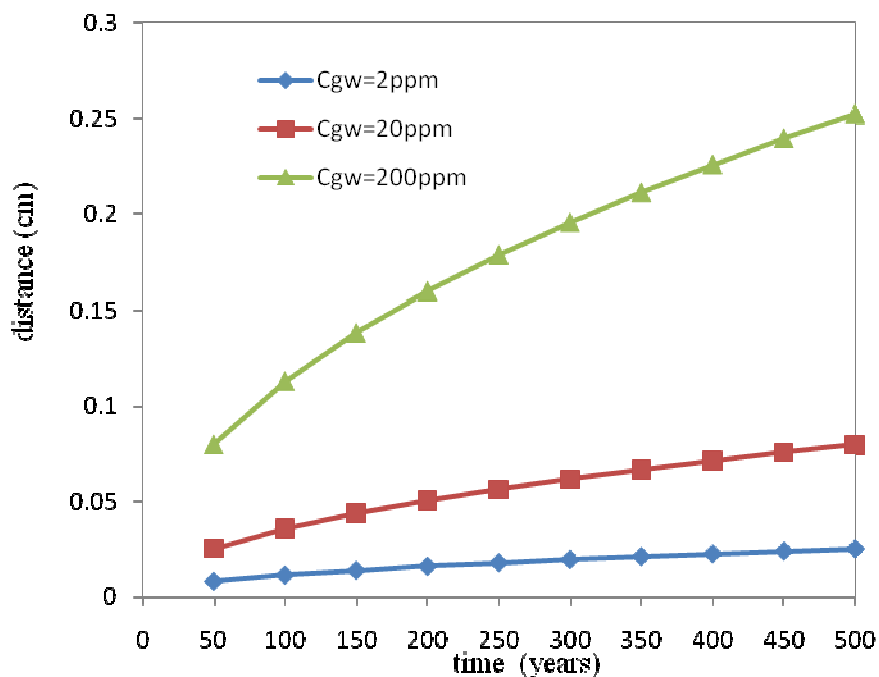


圖5.4 中性化劣化深度與時間關係圖

從上述三個主要侵蝕混凝土造成其劣化之模式，可以得知擴散係數(D)以及環境中離子濃度(C)是主要影響混凝土劣化的參數，所以如何取得劣化影響參數則須建立實驗室標準試驗評估方法。

5.2 混凝土劣化試驗評估方法建立

本研究針對用過核子燃料乾式中期貯存設施混凝土材料可能發生的劣化機制，包括氯離子入侵及硫酸鹽侵蝕試驗，於進行劣化分析模擬時所

需求取之傳輸參數，建立實驗室試驗評估方法，供混凝土劣化分析模式中進行運跑及成效評估。

由 5.1 節模式分析可知，離子在混凝土中之傳輸，混凝土擴散係數(D)及邊界濃度(C)為影響離子傳輸的主要因素。其中硫酸根離子及氯離子邊界濃度可由所在場址現地調查資料取得，而擴散係數則需針對預定採用之混凝土進行實際量測。

但由於混凝土常用的之規範檢驗項目並不包含對擴散係數的量測，因此需要建立求取擴散係數的標準方法，以為評估劣化行為之依據。

5.2.1 氯離子入侵試驗

混凝土是一種高鹼性材料，此特性提供一個惰性的環境，且因鋼筋表面有一氧化層，也會保障鋼筋不至於鏽蝕，但在某些情況下，這些保護層會產生變化。一般而言氯離子在混凝土中常會分解成兩種型式，一種是處於游離的狀態即我們所稱的游離性氯離子 (Free chloride)；另一種則是由物理吸附或化學的型式，以水泥水化作用的自然力來鍵結之氯離子即所謂的鍵結氯離子或非水溶性氯離子 (Bound chloride)。但學者普遍認為，在此兩種氯離子型式中，僅有游離性氯離子才會穿透混凝土表面保護層後，加速內部鋼筋產生腐蝕。

中期貯存設施所使用之混凝土，其組成材料應能符合規範中對粒料之可溶性氯離子濃度要求，因此，主要需要考量之氯離子入侵劣化，來自外在部環境所提供之氯離子。針對氯離子在混凝土中之擴散行為模擬，須透過實驗室擴散試驗，求取氯離子在混凝土中之擴散參數，以進行模擬。

氯離子擴散試驗分為自然擴散和加速擴散試驗，自然擴散試驗是採用 AASHTO T259-90 試驗改良之浸泡試驗，而加速擴散試驗則是參照 ASTM C1202 規範方法改良之加速試驗。

1. 加速氯離子擴散試驗

本試驗依據氯離子快速滲透 ASTM C1202 (CNS 14795) 規範方法加以改良而成。以 20 伏特電壓直流電使氯離子通過混凝土試體中，每隔 12 小時取樣並利用離子層析儀量測陽極槽中的氯離子濃度，隨著時間增加畫出氯離子濃度隨時間變化的累積圖，並取濃度開始顯著上升至穩定狀態後的濃度值進行線性迴歸。經由換算代入 Andrade (1993) 所推出氯離子擴散係數理論式，其擴散公式如式 (5.18)，擴散試驗配置如圖 5.5 所示。詳細試驗程序如附錄 A。本試驗從濃度開始顯著上升至穩定狀態後的濃度值所須試驗實時間約兩星期。

$$D_{eff} = \frac{JRTL}{zFC_{cl}\Delta E} \quad (5.18)$$

其中 D_{eff} ：混凝土試體之氯離子擴散係數 (cm^2/sec)

R ：氣體常數 ($8.31 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}/\text{K}$)

J ：氯離子通量 ($\text{mol}/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$)

T ：絕對溫度 (K)

L ：混凝土厚度 (cm)

z ：離子價數 (Cl 為 1)

F ：法拉第 (Faraday) 常數 ($96500 \text{ Coulombs}/\text{mol}$)

C_{cl} ：擴散陰極槽的氯離子濃度 (mol/cm^3)

ΔE ：兩電極間所施加之電壓 (Volt)

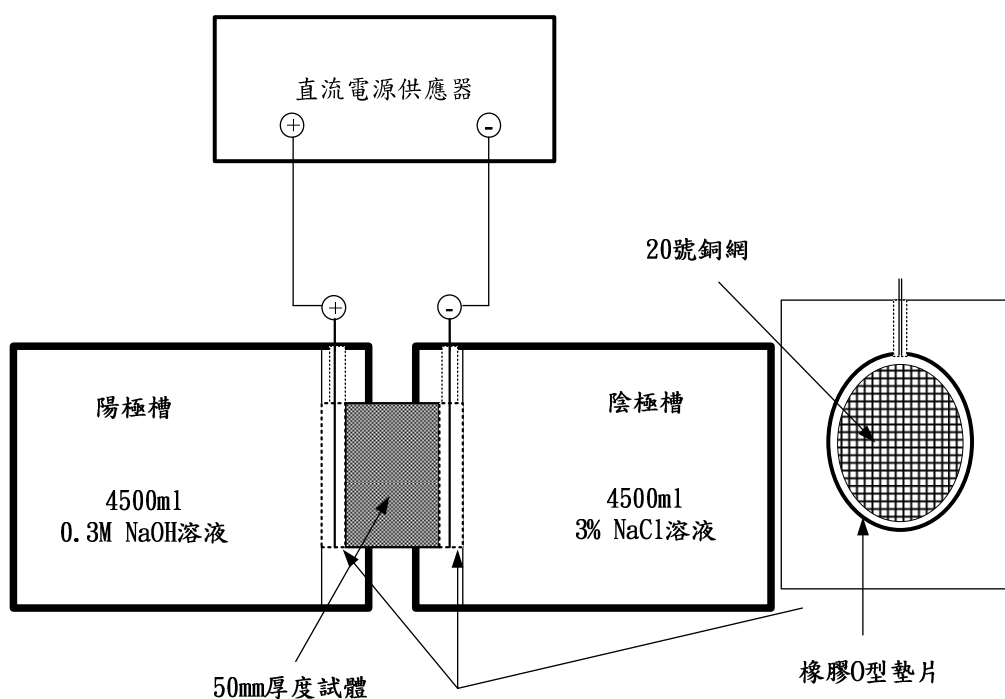


圖 5.5 擴散試驗裝置示意圖

盧秉璋(2006)添加不同卜作嵐摻料進行加速氯離子擴散試驗，在歷時時間 180 天，純水泥 OPC 混凝土擴散係數為 $3.96 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；添加飛灰 20% 取代水泥混凝土(F20) 擴散係數 $1.53 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；添加爐石 40% 取代水泥混凝土(S40) 擴散係數 $1.44 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。可知當混凝土添加適當卜作嵐摻料，則氯離子擴散係數明顯愈低，表示抵抗氯離子穿透能力較佳。

2. 氯離子浸泡試驗(ponding test)

本試驗係參照 AASHTO T259-90 試驗改良，將原本需要 $30.5\text{cm} \times 30.5\text{cm} \times 7.6\text{cm}$ 大小之試體，更改為直徑 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 的混凝土圓柱試體。將養護完成之混凝土圓柱試體切成 $\phi 10 \times 5 \text{ cm}$ ，利用壓克力環套於試體約 2cm 處並使其與試體緊密結合，塗上 epoxy 為防止其漏水，如圖 5.6

所示。在壓克力環內加入 3% NaCl 溶液，為使溶液保持一定濃度，每 2 至 3 星期將溶液更換一次，達試驗天數，將試體切取試片磨粉，再參照 AASHTO T260 之酸洗法，用數位電位計滴定，當電位變化差值最大時，表示已達滴定終點，計算 AgNO_3 正確滴定消耗量，最後利用式(5.19)求取氯離子濃度，再推算出氯離子擴散係數(D)。詳細試驗程序如附錄 A。本浸泡試驗所需時間約 90 天。

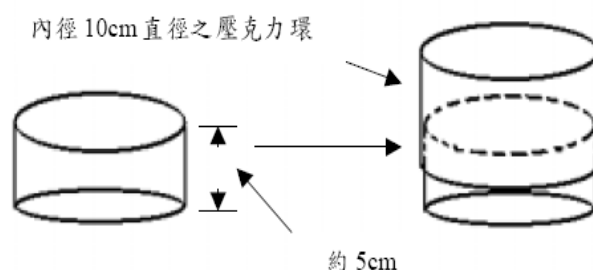


圖 5.6 試體加壓克力環之示意圖

$$Cl^{-}(\%) = \frac{3.5453(N_1V_1 - N_2V_2)}{W} \quad (5.19)$$

其中 N_1V_1 ：係指 AgNO_3 滴定溶液之當量濃度與耗用量之乘積

N_2V_2 ：係指外加 NaCl 溶液之當量濃度與所加量之乘積

W ：試樣重量

盧秉瑋(2006)添加不同卜作嵐摻料進行氯離子浸泡試驗，在歷時時間 180 天，純水泥 OPC 混凝土擴散係數為 $3.46 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；添加飛灰 20% 取代水泥混凝土(F20) 擴散係數 $1.27 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；添加爐石 40% 取代水泥混凝土(S40) 擴散係數 $1.13 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。結果顯示混凝土浸泡在氯化鈉溶液中，因浸泡歷時的增加會造成混凝土中不同離子的變化，例如吸附氯離子反應

產生佛萊第鹽類等結晶，這些結晶能填充孔隙使混凝土內部結構更緻密，另外就是水化持續進行，如 C-S-H 膠體也繼續填充孔隙，使各配比混凝土內部孔隙結構有不同程度的減少，進而降低氯離子擴散係數。

3. 試驗比較

根據氯離子浸泡試驗與加速氯離子擴散試驗，可得到不同試驗法氯離子擴散係數。氯離子浸泡試驗是模擬自然條件下之擴散，但因未進行加速故實驗非常耗時，約需 90 天才可得到氯離子擴散係數。反之，加速擴散試驗則利用電壓加速氯離子擴散，可以快速得到氯離子擴散係數。以加速氯離子擴散試驗所迅速求得之擴散係數，可利用浸泡試驗驗證所得之氯離子擴散係數趨勢是否合理，以應用於氯離子劣化分析模式中，預測氯離子入侵行為。

5.2.2 硫酸鹽侵蝕試驗

硫酸鹽侵蝕乃是依據 ASTM C1012 (CNS 14794) 規範進行試驗，試驗前必須準備每立方公尺含有 352mol 之硫酸鈉 Na_2SO_4 (50g/L) 溶液，並將經過養護完成的試體浸泡於調配好之硫酸鈉溶液中進行試驗，並定期量測其硫酸鈉溶液之 pH 值，若溶液 pH 值增加至 12 時並立即更換溶液。此試驗主要模擬混凝土材料承受的硫酸鹽環境受侵蝕的程度。

將達歷時時間試體，利用鑽石切割機切成 5mm 薄片，放進低溫烘箱 (40°C) 中進行乾燥處理。利用研磨機將水泥砂漿磨成粉狀，並取顆粒通過 200 號篩之粉末，依據 ASTM C114 (CNS 1708) 規範進行試驗，將磨好之取粉末 1g 重，加入 25 mL 蒸餾水混和攪拌，加入 5 mL 之 HCl 混和後，在溶液稀釋至 50 mL，並在低於沸點溫度下浸置 15 分鐘，用濾紙過濾並以熱水沖洗殘渣，再將溶液稀釋至 250 mL 並加熱至沸騰，將 10 mL 之 BaCl_2

(每 L 100g) 溶液逐滴加入溶液中，繼續煮沸至沈澱充分形成，再將此溶液置於低於沸點溫度下保持 12~24 小時，溶液體積需保持在 225~260 mL 之間，過濾並用熱水沖洗，將含沈澱之濾紙放置於已秤重的瓷坩鍋中加熱至 800~900℃ 燒灼，冷卻後所秤之重量即為 BaSO₄ 之重量，將此重量乘上 41.14% 即為 SO₄ 之含量。最後利用試驗所得之硫酸鹽侵蝕濃度剖面推算出硫酸鹽擴散係數(D)。

吳清哲(2006)利用硫酸鹽侵蝕濃度剖面推算出硫酸鹽擴散係數(D)如表 5.1 所示。純水泥 OPC 混凝土擴散係數 $5.47 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；添加飛灰 20% 取代水泥混凝土(F20) 擴散係數 $1.8 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ ；添加爐石 40% 取代水泥混凝土(S40) 擴散係數 $3.37 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。可知添加適當卜作嵐摻料有提高混凝土抗硫酸鹽侵蝕，增加混凝土耐久性的功能。

表 5.1 各配比混凝土歷時 180 天之材質擴散係數

混凝土配比編號	擴散係數 (cm^2/s)
OPC	5.47×10^{-12}
F20	1.80×10^{-12}
S40	3.37×10^{-12}

5.3 美國國家標準署混凝土劣化預測模式

美國國家標準署(NIST)所建立的混凝土劣化模式主要是針對混凝土受氯離子入侵、硫酸鹽侵蝕等劣化現象所建立的協合模擬模式。此模式將三種劣化模式對混凝土耐久性的損壞狀況一起討論，是少見對混凝土劣化協合作用(synergism)的預測模式。

美國國家標準署混凝土劣化預測模式 4SIGHT 是利用程式語言 C⁺⁺所建立的模式，此模式的流程圖如圖 5.7 所示。所有劣化機制不論氯離子侵蝕、硫酸鹽侵蝕以及溶出失鈣等都是藉由離子的傳輸，還有混凝土材質本身的滲透性、孔隙率等因素在控制混凝土的劣化狀態。

模式在建立時針對(1)劣化相關有效的文獻進行整理分析，(2)離子傳輸方程式的建立，(3)確認離子傳輸方程式與實驗室數據相關性，(4)混凝土乾縮及彎曲裂縫的預測。本模式用 C⁺⁺所撰寫，將本模式利用視窗化讓使用者將所需參數輸入即可方便使用此一模式。

本模式在視窗化下，輸入的參數包括：

- (1) 混凝土性質參數：混凝土孔隙率、滲透係數。
- (2) 水泥性質參數：氧化鉀、氧化鈉重量百分比。
- (3) 混凝土尺寸參數：混凝土厚度、鋼筋埋入深度、裂縫寬度及深度。
- (4) 離子濃度邊界條件：輸入各所需離子莫耳濃度。
- (5) 時間參數：欲預測年限。

即可利用此模式在所需條件範圍內預測混凝土的劣化狀況，供使用者參考設計之依據，視窗化介面如圖 5.8 所示。

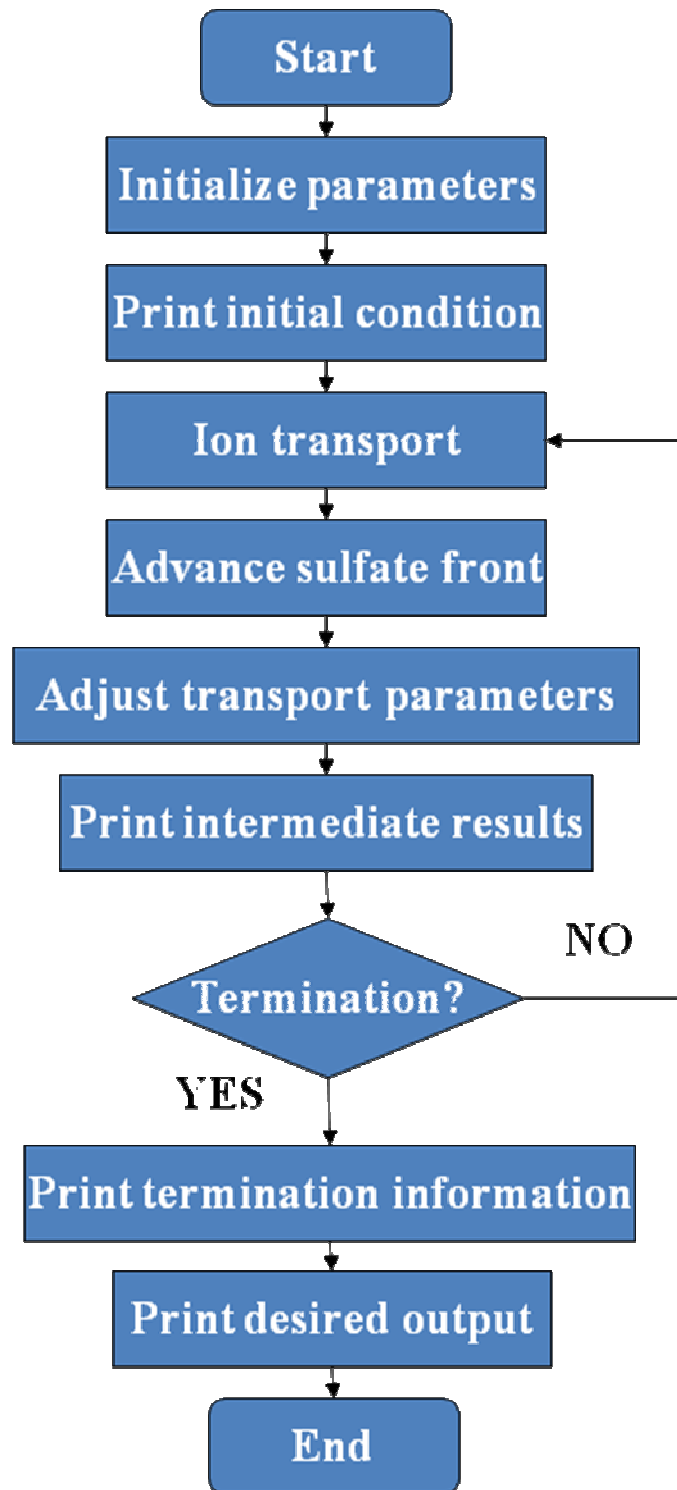


圖 5.7 運算流程圖

Comment		Problem Description		
Concrete Properties	Units	x_0	s_0	Distribution
Formation Factor		2000	0	Delta
Porosity		0.06	0	Delta
Permeability	cm/s	1.0E-9	0	Delta
w/c		0.45	0	Delta
Cement Properties				
K ₂ O	Mass %	1.2		
Na ₂ O	Mass %	0.4		
Geometry				
Concrete Thickness	m	1.0	0	Delta
Reinforcement Depth	m	0.8	0	Delta
Crack Spacing	m	10.0	0	Delta
Crack Width	m	0.000100	0	Delta
Crack Depth	[0-1]	0.2	0	Delta
Boundary Conditions		External Surface	Internal Surface	
Concentrations				λ
☐ OH ⁻	mol/L	0.0	0.0	0.0
☐ K ⁺	mol/L	0.0	0.0	0.0
☐ Na ⁺	mol/L	0.0	0.0	0.0
☐ Cl ⁻	mol/L	0.0	0.0	0.0
☐ SO ₄ ²⁻	mol/L	0.0	0.0	0.0
☐ Mg ²⁺	mol/L	0.0	0.0	0.0
Hydraulic Pressure	m (head)	0	0	
Monte Carlo				
Random Seed		48275		
Iterations		1		
Termination				
Time Limit	years	100		

圖 5.8 模式視窗化輸入介面

5.3.1 模擬程式環境參數

本節利用 4SIGHT 模擬程式針對混凝土受硫酸鹽侵蝕及氯離子入侵混凝土行為個別進行劣化情形預測。所需之邊界條件，由於缺乏大氣環境中硫酸鹽或氯離子濃度資料，蒐集國內降雨之化學成份分析資料，以及國內、日本及瑞士等文獻之地下水分析資料為參考依據。

降雨資料來自環保署台灣酸雨資訊網，其中包含台北、宜蘭、台中、恆春、台東成功等站 2006 年 1~10 月降雨之化學離子成份，如表 5.2。由表中可見臺灣地區降雨中，硫酸根離子濃度約在 0.01~0.10 ppm 範圍內，而氯離子濃度則在 0.01~0.08 ppm 範圍內，降雨中兩種離子濃度均成份相當微量。此外，再針對地下水體的連續採樣資料加以蒐集，包括國內經濟部中央地質調查所 2004 年報告對台灣南部、西部、北部和東北部等各地

區，對於溫泉水、冷泉水和地下水等水體的陰、陽離子含量長時間監測資料(經濟部中央地調所，2004)；日本方面則參考 Tono 研究場址的地下水調查資料(NRC, 1996b)；以及瑞士 NAGRA 的地下水調查資料。將各國地下水體化性資料加以整理如表 5.3。由表中可見，各地區地下水中硫酸根離子濃度在 12~296 ppm 間，而氯離子濃度在 4.7~28 ppm 間。

表 5.2 降雨之化學離子成份

單位：ppm

	SO_4^{2-}	Cl^-	pH
台北	0.024~0.098	0.030~0.045	4.54~5.23
宜蘭	0.030~0.143	0.007~0.0355	4.73~5.37
台中	0.012~0.290	0.014~0.0777	4.76~5.73
恆春	0.060~0.134	0.0135~0.0395	5.07~5.60
台東成功	0.068~0.346	0.013~0.062	4.35~5.22

資料來源：台灣酸雨資訊網

表 5.3 各國地下水化學成份

國家	SO_4^{2-}	Cl^-
台灣地區 (經濟部中央地質調查所，2004)	80.8±17.3 ppm	13.6±2.5 ppm
日本 Tono 研究場址 (from JNC, 1999b)	12 ppm	4.7 ppm
瑞士 (from NAGRA TB-93-22)	296 ppm	128 ppm
本計劃選取之分析範圍	0.1~1.0 mol/L (9600~96000ppm)	0.1~1.0 mol/L (3550~35500ppm)

考慮乾式貯存設施混凝土護箱為曝露於室外大氣中之結構物，即使處於濱海環境，其曝露環境中之硫酸根離子與氯離子主要來源應來自於降

雨。由於降雨係間歇發生，故混凝土護箱實際環境濃度應低於表 5.2 中所列數值。

另一方面，擴散係數為影響各離子在混凝土中傳輸行為之主要因素，前節所述有關氯離子或硫酸根離子濃度剖面之求取方法，皆採用高濃度之浸泡或加速方式，其與極低濃度下混凝土的傳輸行為是否有所差異，目前並無數據可加以證明。但應用此種加速試驗方法，求取模擬分析所需之參數，為工程與學術界普遍使用之方法，在合乎所假設傳輸行為模式的情況下，以較高濃度之環境條件進行模擬或預估，應可含蓋(envelop)更低濃度下之實際傳輸情形。

5.3.2 模擬程式參數敏感度分析

由於降雨中化學離子成份相當微量，模擬分析時難以顯示曝露環境的效應，故進行參數敏感度分析時，考量地下水體中之離子濃度，將分析範圍訂在 0.1 ~ 1.0 mol/L。因此，以下所進行的敏感度分析，其分析下限濃度環境可視為乾式貯存設施可能遭遇之最糟狀況(worst case)，針對硫酸鹽侵蝕及氯離子侵蝕進行混凝土劣化剖面進行預測評估，供乾式貯存設施混凝土護箱劣化分析參考之用。

1. 硫酸鹽侵蝕預測

本研究利用不同硫酸根離子濃度及預測年限為變數，模式中其餘之參數值則採用如表 5.4 所示之內定值，利用此模式進行混凝土硫酸鹽侵蝕預測，與 5.1 節所提到之硫酸鹽侵蝕劣化模式進行比較。模擬結果如圖 5.9~圖 5.11 所示。

表 5.4 硫酸根離子侵蝕模擬變數

程式設定數值	
- Concrete Properties - Formation Factor 2000 - Porosity 0.06 - Permeability 1.0×10^{-9} cm/s - w/c 0.45 - Cement Properties - K₂O Mass 1.2% - Na₂O Mass 0.4% - Geometry - Concrete Thickness 1 m - Reinforcement Depth 0.8 m - Crack Spacing 10 m - Crack Width 0.000100 m - Crack Depth 0.2 m	改變的參數 - Boundary Conditions - SO₄²⁻ (External Surface Concentrations) - 代入 0.1, 0.5, 1.0 mol/L - Termination - Time Limit - 代入 1, 5, 10, 20, 50, 100 years

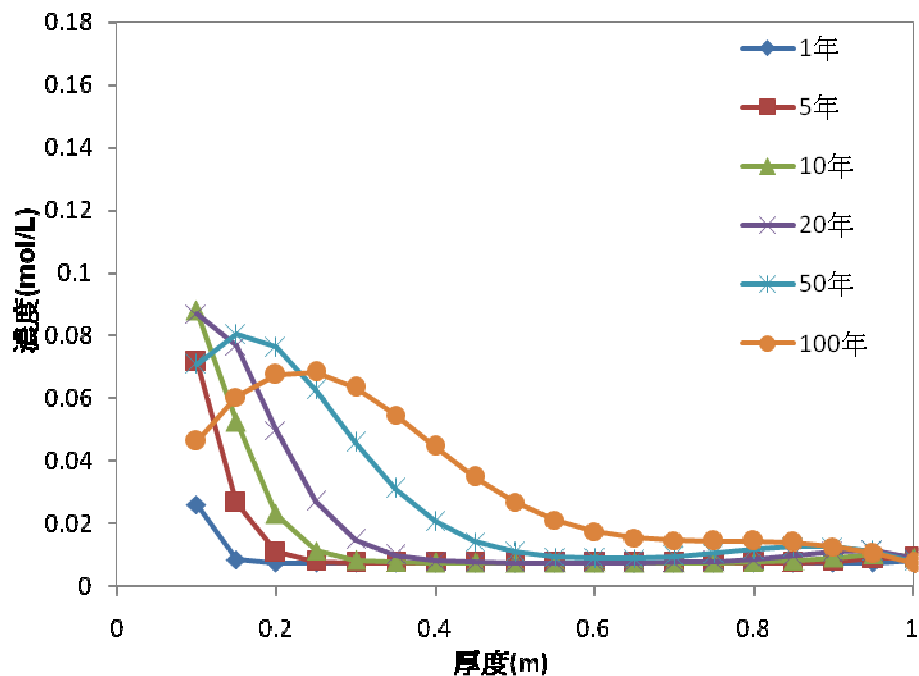


圖 5.9 硫酸根離子外在濃度 0.1 mol/L 各預測年限硫酸根離子入侵剖面

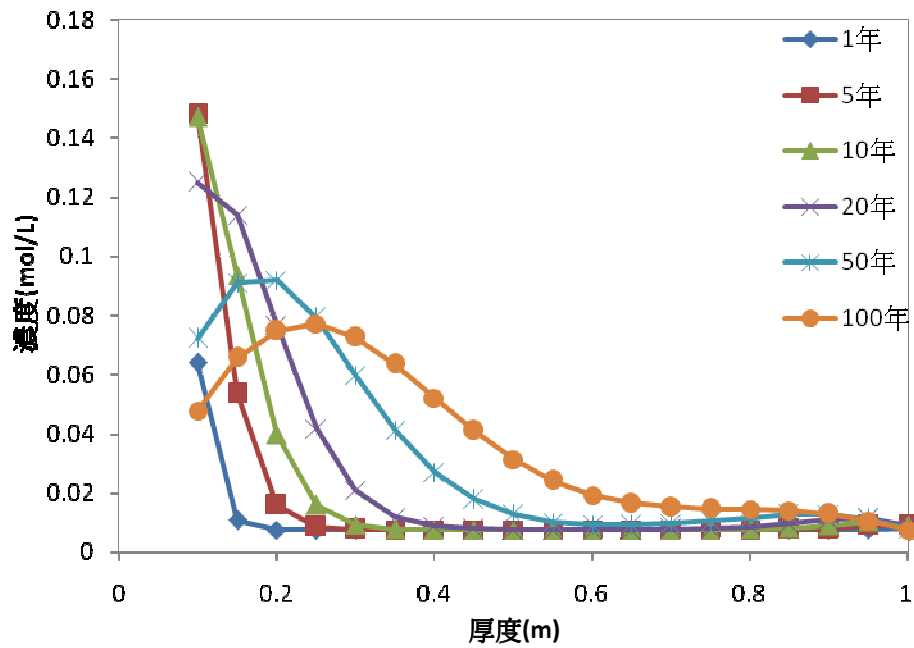


圖 5.10 硫酸根離子外在濃度 0.5 mol/L 各預測年限硫酸根離子入侵剖面

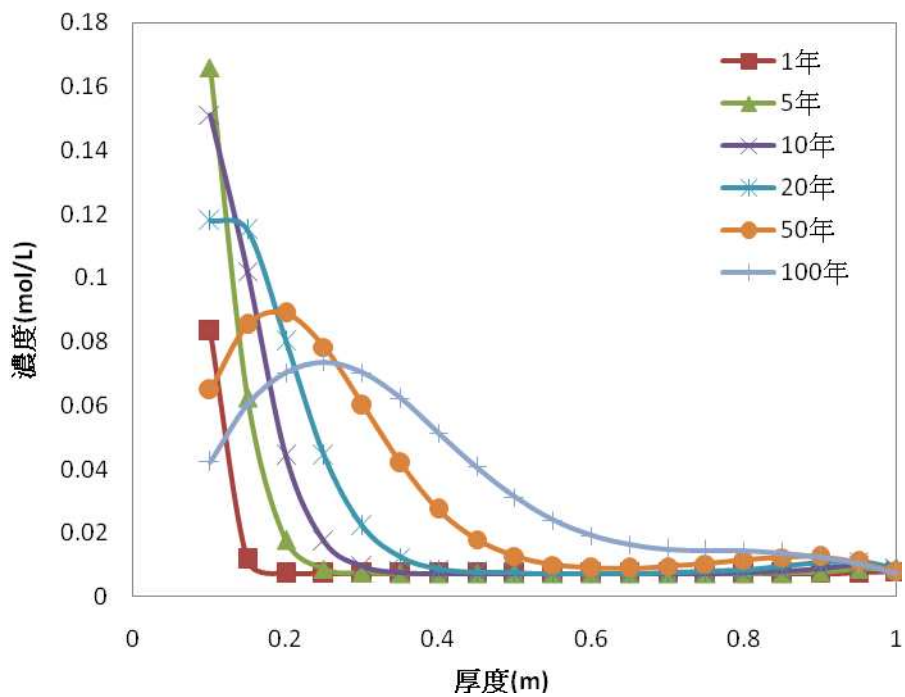


圖 5.11 硫酸根離子外在濃度 1 mol/L 各預測年限硫酸根離子入侵剖面

2. 氯離子侵蝕預測

本研究利用不同氯離子濃度及預測年限為變數，不改變模式中其餘之

內定值，如表 5.5 所示。利用此模式進行氯離子侵蝕預測，與 5.1 節所提到之氯離子侵蝕劣化模式進行比較。模擬結果如圖 5.12 ~圖 5.14 所示。

綜合上述所模擬的結果，圖 5.9~圖 5.11 利用不同外在硫酸根離子濃度與歷時年限作為模擬變數，隨著外在濃度及歷時時間增大，入侵混凝土的深度也隨之增大。但可以發現外在濃度越大但入侵深度硫酸根離子的濃度有下降的趨勢，可能是因為同離子效應(Common-ion effects)所產生的結果。而在歷時 20、50 及 100 年的趨勢濃度隨侵入深度由低轉高再降低，由於前段硫酸根離子與混凝土中水化產物生成鈣礬石結晶，所以硫酸根離子濃度因而降低

表 5.5 氯離子侵蝕模擬變數

程式設定數值	
- Concrete Properties - Formation Factor 2000 - Porosity 0.06 - Permeability 1.0×10^{-9} cm/s - w/c 0.45 - Cement Properties - K₂O Mass 1.2% - Na₂O Mass 0.4% - Geometry - Concrete Thickness 1 m - Reinforcement Depth 0.8 m - Crack Spacing 10 m - Crack Width 0.000100 m - Crack Depth 0.2 m	改變的參數 - Boundary Conditions - Cl⁻ (External Surface Concentrations) - 代入 0.1, 0.5, 1.0 mol/L - Termination - Time Limit - 代入 1, 5, 10, 20, 50, 100 years

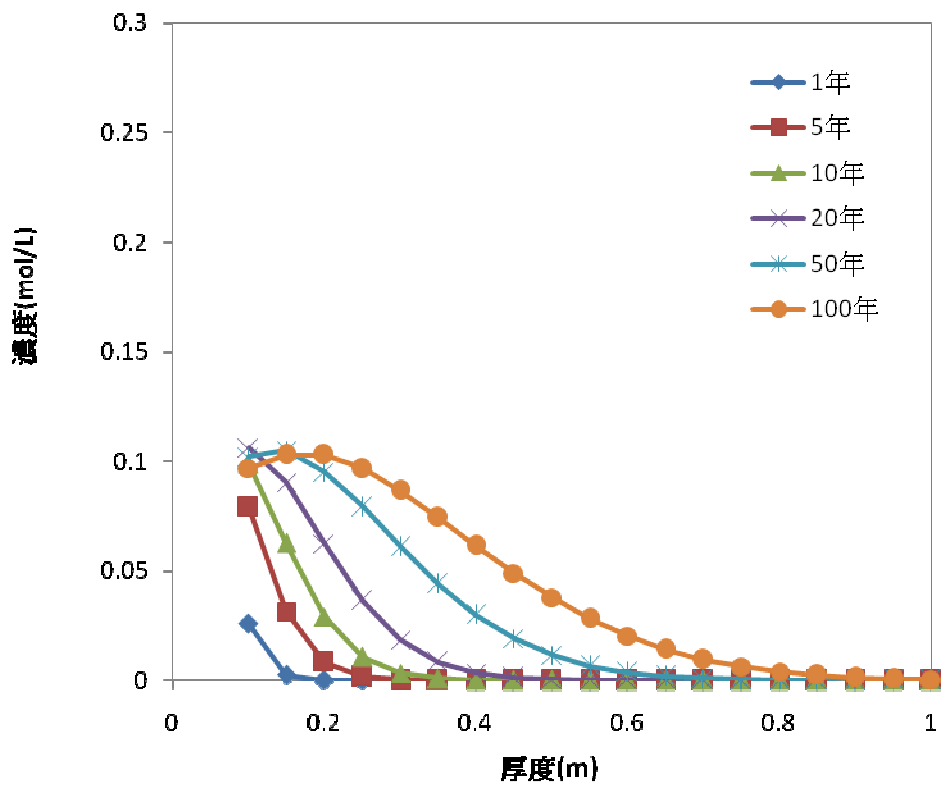


圖 5.12 氯離子外在濃度 0.1 mol/L 各預測年限氯離子入侵剖面

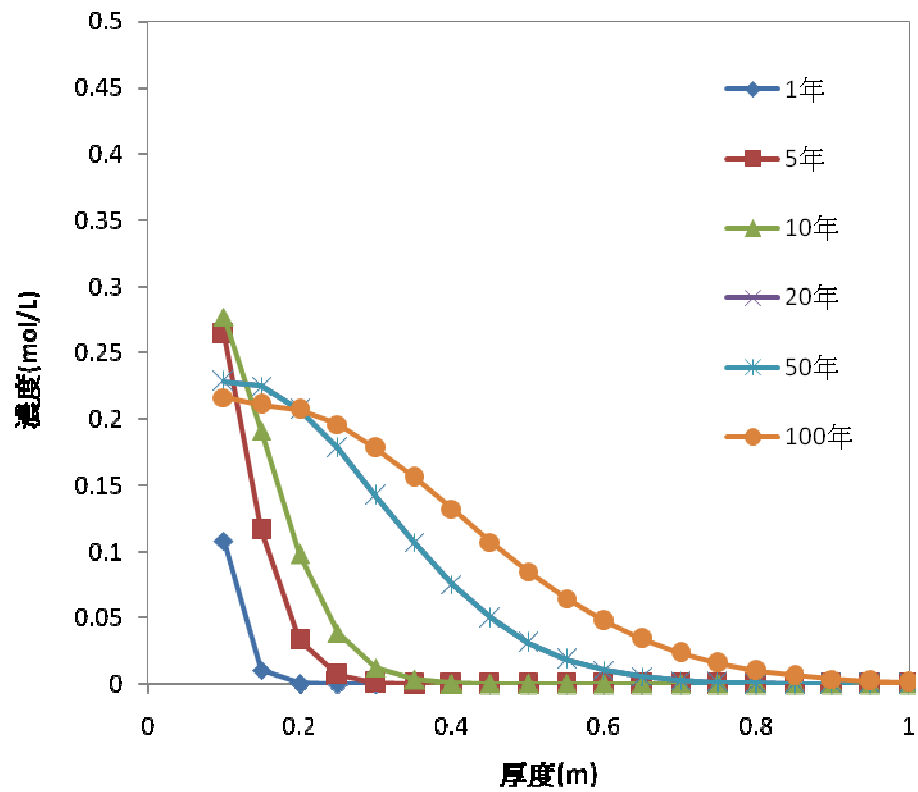


圖 5.13 氯離子外在濃度 0.5 mol/L 各預測年限氯離子入侵剖面

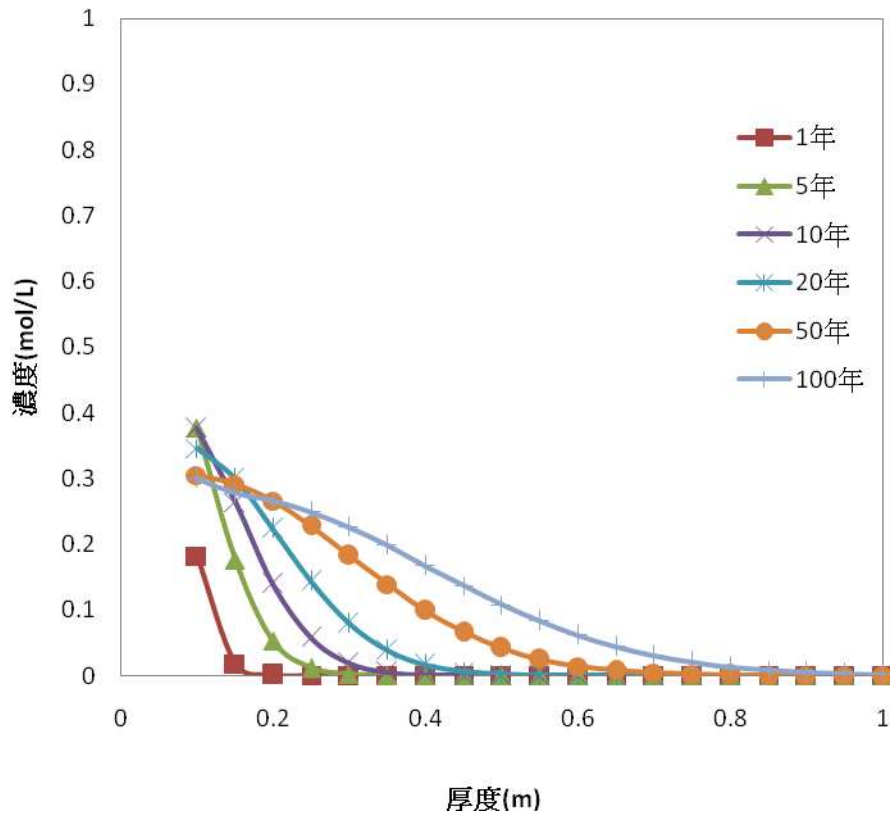


圖 5.14 氯離子外在濃度 1 mol/L 各預測年限氯離子入侵剖面

圖 5.12~圖 5.14 利用不同外在氯離子濃度與歷時年限作為模擬變數，隨著外在濃度及歷時時間增大，入侵混凝土的深度也隨之增大。根據卓世偉(2002)指出利用純混凝土進行氯離子試驗後，利用試驗完試體再進行抗壓強度試驗得知抗壓強度與氯離子的入侵無相關性，即氯離子的入侵僅對鋼筋有影響，能使鋼筋產生腐蝕，而對純混凝土本身的影響甚微。所以利用此模式即可預測氯離子侵入混凝土內部的濃度剖面，據以進行鋼筋混凝土護箱服務年限的推估，作為鋼筋埋設深度的依據。

3. 多種劣化機制之協合作用

模擬多種離子在混凝土中之傳輸行為，係利用已建立的各種單一劣化傳輸方程式，以有限差分法撰寫成為電腦程式，模擬時將一連續之物理區間，以有限個形狀規則的網格填滿。亦即將時間分割成離散的區間，代入

控制方程式中，並配合起始條件及邊界條件，計算一時間與下一時間區間的關係。其方式為於每一時間區格計算水化產物及電荷間之化學平衡，且每一時間區間內，孔隙間固體鹽類的變化量會影響混凝土孔隙率，因此改變其傳輸係數，使得以模擬各種劣化機理之協合作用。

本案例中由於硫酸鹽及氯離子濃度極微，考慮協合作用分析所得結果，與分別考慮單一劣化分析模擬所得結果並無差異。

陸、結論與建議

本研究目的係針對乾式貯存設施之混凝土材料長期受持續高溫效應及濱海區域特有環境下，以實驗室條件模擬混凝土受到內部用過核子燃料持續散發的衰變熱及外部環境因子作用下，是否會造成混凝土屏蔽的劣化或受損，同時利用非破壞檢測測試混凝土材料在長期受持續高溫效應下，其劣化情形以非破壞方法進行檢測之成效加以評估，以提供國內興建乾式貯存設施依據及參考，提昇用過核子燃料貯存的安全性。本研究製作混凝土之試驗配比，包括未添加任何礦物摻料之純水泥OPC混凝土、取代10%、20%水泥之飛灰混凝土（F10、F20）及取代30%、50%水泥之爐石混凝土（S30、S50）等五種，模擬之高溫環境則採用貯存設施異常狀況下的最高溫度(94℃)經試驗分析評估其影響，獲致下列結論與建議。

6.1 結論

力學性質試驗

1. 本研究利用五種混凝土配比，在養護 42 天成熟後，將混凝土試體分別置於常溫及模擬高溫(94℃)環境進行抗壓強度試驗。混凝土材料在受到高溫環境持續作用下，其抗壓強度所受影響甚微，僅略低於常溫下之混凝土。
2. 混凝土受高溫作用時，由於混凝土內部的孔隙水及層間水蒸發消散，造成混凝土體積產生之收縮現象，較常溫環境下為高。

非破壞試驗

1. 利用超音波量測混凝土受熱後之脈波波速得知，混凝土在高溫環境作用下，混凝土脈波波速會降低，但歷時時間延長則不再有顯著損失，而逐

漸趨於穩定。

2. 利用共振儀量測混凝土自然共振頻率，進而求得混凝土動彈性模數值得知，混凝土動彈性模數受高溫作用之影響與脈波波速之變化趨勢相近，即受熱環境作用後動彈性模數略有降低，但隨歷時時間增加並無持續下降情形而趨於穩定。
3. 以反彈鎚對混凝土量測反彈數結果顯示，受熱環境作用混凝土反彈數在初期有下降情形，但隨受熱時間增長即趨於穩定。
4. 根據前述三點，以各非破壞檢測方法對混凝土受高溫環境作用所測得之反應趨勢已可掌握。故針對乾氏貯存混凝土護箱所進行之非破壞檢測，可於護箱製作完成及用過核子燃料置入後分別加以量測，掌握非破壞檢測基準數據，以為後續定期檢測護箱時，判斷混凝土品質狀況之依據。

劣化模式分析

1. 混凝土劣化機制解析解模式分析，針對離子擴散現象，利用解析解將各劣化機制以理論方程式表現，可獲知離子入侵混凝土的行為趨勢。
2. 材料試驗評估方法之建立，可以此方法取得劣化模式必要之材料參數，並進行必要的驗證，以作為評估混凝土劣化行為的依據。
3. 美國國家標準署所建議的劣化模擬程式比較各劣化機制解析解模式，分析考慮因素完善，如混凝土性質參數、水泥性質參數及混凝土尺寸參數等，較能針對預測年限有完整的評估，可以供相關設計時之參考。

6.2 建議

1. 乾式貯存設施不同於一般混凝土結構物之用途，乾式貯存設施貯存一束用過核子燃料的期限長達五十年，甚至考量重複使用。本研究針對核一廠預定採用之Ⅱ型水泥及設計強度製作試體，結果可與先前的研究成果加以比對。
2. 針對混凝土之非破壞檢測方法，其中超音波速度及反彈鎚試驗能於實際結構物上進行量測，故較適用於貯存護箱之品質檢測。

3. 針對混凝土劣化行為加速試驗與實際環境條件的差異性，可考慮對未來預定設置乾式貯存設施場址附近之老舊混凝土結構物進行鑽心取樣，並利用實際測得之濃度剖面，反算(back-calculate) 該場址所在地之合理擴散係數，並驗證傳輸理論於極低濃度條件下之適用性。
4. 本研究針對混凝土劣化機制進行解析解模式及美國國家標準署所建議之模式在硫酸鹽侵蝕及氯離子侵蝕部份進行參數分析，對混凝土劣化評估提出初步的做法，未來對於多種機制協合作用下的評估，則有待後續研究持續推動進行。

參考文獻

- 王茂齡,「輸送現象」,高立圖書有限公司 (1987)。
- 王信偉,「混凝土材料用於用過核子燃料乾式中期貯存設施之穩定性研究」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢 (2004)。
- 李明君,李釗,「使用飛灰等摻料製作高強度混凝土之探討」,應用礦物摻料提昇混凝土品質,台灣營建研究院 (1999)。
- 沈得縣,沈進發,「添加化學摻料對混凝土耐火性能影響之探討」,計畫研究報告,內政部建築研究所 (1994)。
- 卓世偉,「加速氯離子動試驗探討氯離子於水泥基複合材料中之傳輸行為」,博士論文,國立台灣海洋大學材料工程研究所,基隆 (2002)。
- 吳清哲,「低放射性廢棄物處置場障壁受硫酸鹽侵蝕之劣化模式評估」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢 (2006)。
- 陳勇智,「基本頻率試驗法及超音波量測混凝土動態彈性模數之比較」,碩士論文,國立屏東科技大學土木工程研究所,屏東(2004)。
- 陳柏忠,「用過核子燃料乾式中期貯存設施之混凝土耐久性研究」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢 (2005)。
- 黃兆龍,「混凝土性質及行為」,詹氏書局 (1999)。
- 張維麟、金鵬、施義舜,「利用非破壞測試法及破壞試驗研究混凝土受高溫後強度之變化」,計畫研究報告,台灣營建研究中心(1987)。
- 張奇偉,「應用四種不同超音波儀器於混凝土波速與裂縫之研究」,碩士論文,私立中華大學土木工程研究所,新竹(2004)。
- 盧秉璋,「混凝土工程障壁之氯離子及失鈣劣化行為」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢 (2006)。
- Andrade, C. (1993), "Calculation of chloride coefficients in concrete from ionic migration measurements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 724-742.

- Castillo, C. and Durrani, A. J. (1990), "Effect of transient high temperature on high-strength concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 1, pp. 47-53.
- Dias, W. P. S., Khoury, G. A., and Sullivan, P. J. E. (1990), "Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700 °C," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 2, pp. 160-166.
- Khoury, G. A. (1992), "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 44, No. 161, pp. 291-309.
- Malhotra, V. M., and Carino, N. J. (2004), *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC Press LLC , U.S.A.
- Mehta, P. K. (1986), *Concrete Structure Properties and Materials*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.
- Papayianni, I. and Valliasis, T. (2005), "Heat deformations of fly ash concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, 249-254.
- Rasmuson, A., Neretenieks, I., and Zhu M. (1987), "Calculations of the degradation of concrete in a final repository for nuclear waste," *Proceedings of an NEA Workshop on Near-Field Assessment of Repositories for Low and Medium Level Radioactive Waste*, Baden, Switzerland.
- Ravindrarajah, R. S., Lopez, R. and Reslan, H. (2002), "Effect of Elevated Temperature on the Properties of High-Strength Concrete containing Cement Supplementary Materials," 9th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Brisbane, Australia.
- Young, J. F., Mindess, S. and Darwin, D. (2002), *Concrete*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.
- Zibara, H. R., Pérezfki, B., Hooton, D. M., Thomas, D. A. (2000), "A study of the effect of chloride binding on service life predictions", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1215-1223.

附錄 A

1. 加速氯離子擴散試驗

本試驗依據氯離子快速滲透 ASTM C1202 (CNS14795) 規範方法加以改良而成。試驗方法主要分為兩部份，分別為試體試驗前處理與試驗兩部份。其試驗方法與設備配置如下所述：

試體試驗前處理部份：

- (1) 待混凝土圓柱試體達試驗齡期時將試體取出，使用快速切割機切取試體中間部份，切割成直徑 $\phi 10 \times 5$ cm 之圓柱試片並加以清洗。
- (2) 將切割完成之試片放置在室溫氣乾 1 小時，再將試片套上 2 個壓克力 O 型環，並以快速凝結的矽利康，塗刷試片側面上進行塗封。
- (3) 靜待矽利康乾燥後，進行試片抽真空及浸水飽和的程序（如圖 A.1），依規範要求抽真空時必須達 133Pa (1mm Hg) 之真空度，且真空室內須維持真空狀態 3 小時。
- (4) 當真空狀態 3 小時後，將蒸餾水利用漏斗流入真空室內，直至水面淹沒試體，然後繼續抽真空 1 小時。
- (5) 關閉真空裝置後，將試片浸水於真空室內 18 ± 2 小時，即為前處理完成。



圖 A.1 抽真空飽和設備

試驗部份：

- (1) 將達飽和的試片取出，並將試片擦乾，試片兩端各安裝於壓克力電解槽上（如圖 A.2 所示），且確定試驗系統無漏水。
- (2) 陽極槽加入 0.3M 的氫氧化鈉溶液（4.5 公升），陰極槽加入 3% 的氯化鈉溶液（4.5 公升），並在兩極之間以黃銅網作為正負電極片，施加 20 伏特電壓進行加速擴散試驗。
- (3) 試驗期間，以每隔 12 小時取樣並利用離子層析儀量測陽極槽中的氯離子濃度。
- (4) 每 12 小時量測由陽極槽通過之氯離子濃度，隨著時間增加畫出氯離子濃度隨時間變化的累積圖，並取濃度開始顯著上升至穩定狀態後的濃度值進行線性迴歸。
- (5) 經由換算代入 Andrade (1993) 所推出氯離子擴散係數理論式，其擴散公式如式 (A.1)，在擴散公式中， J 為氯離子通量，其計算方式為莫耳濃度乘以陽極槽氫氧化鈉的公升數，再除以混凝土試片的面積乘以時間所得到擴散曲線斜率（卓世偉，2002）。

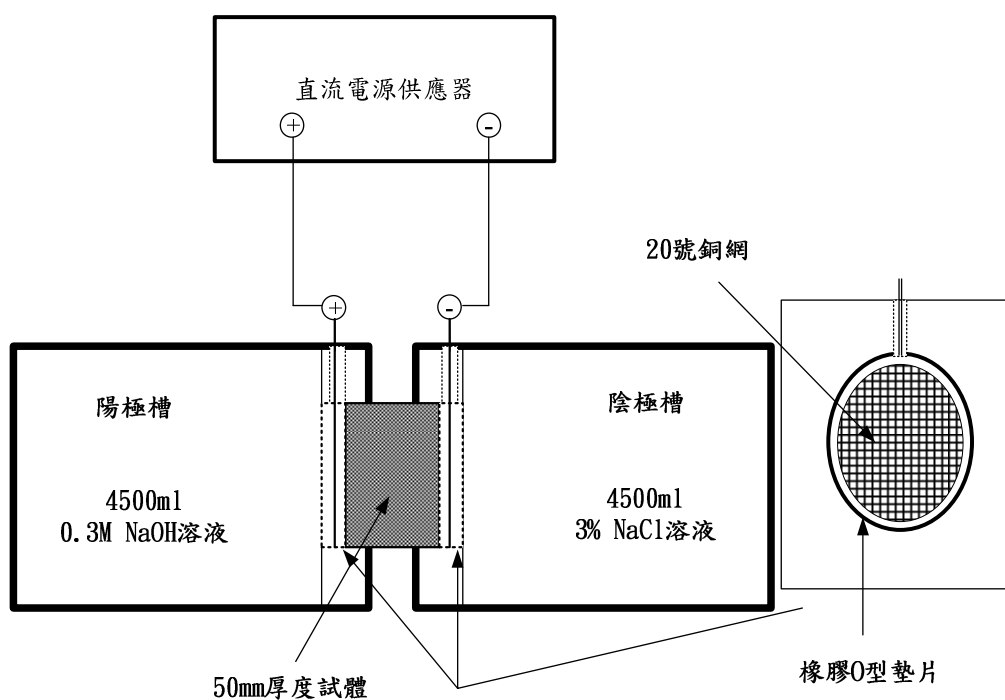


圖 A.2 擴散試驗裝置示意圖

$$D_{eff} = \frac{JRTL}{zFC_{cl}\Delta E} \quad (A.1)$$

其中 D_{eff} ：混凝土試體之氯離子擴散係數 (cm^2/sec)

R ：氣體常數 ($8.31 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}/\text{K}$)

J ：氯離子通量 ($\text{mol}/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$)

T ：絕對溫度 (K)

L ：混凝土厚度 (cm)

z ：離子價數 (Cl^- 為 1)

F ：法拉第 (Faraday) 常數 ($96500 \text{ Coulombs}/\text{mol}$)

C_{cl} ：擴散陰極槽的氯離子濃度 (mol/cm^3)

ΔE ：兩電極間所施加之電壓 (Volt)

2. 氯離子浸泡試驗(ponding test)

試驗方法如下所述

- (1) 將達到養護齡期以上的混凝土試體，用水冷式鑽石鋸片將試體橫向切成平均三等份（高約 5cm）。
- (2) 將試體置於室溫下一小時後，將內徑 10cm 高 5cm 之壓克力環套於試體約 2cm 處並使其與試體緊密結合，為防止其漏水，在與試體之接縫處再塗上 epoxy，待其乾燥緊密結合。如圖 A.3 所示。

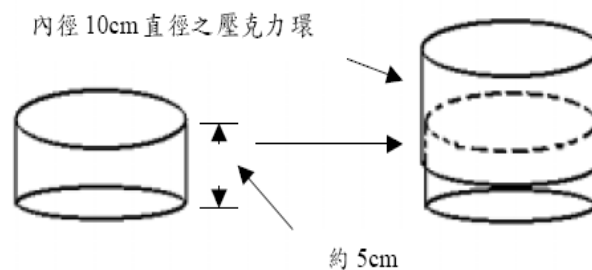


圖 A.3 試體加壓克力環之示意圖

- (3) 待試體乾燥後，於其上倒入 3% NaCl 溶液 2cm 刻劃高度時使用保鮮膜將其封住，使溶液不易蒸發。
- (4) 為使溶液保持一定濃度，每 2 至 3 星期將溶液採步驟 3 更換一次，等達到實驗天數後，將試體上的壓克力環除去，並使用沖孔機在其垂直面鑽出直徑為 1cm 的圓柱體。如圖 A.4 所示。

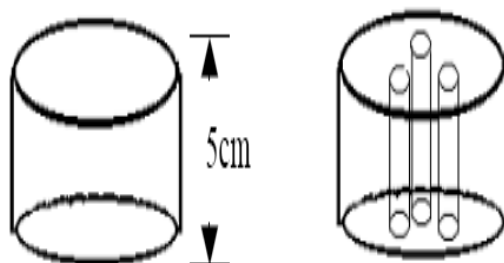


圖 A.4 鑽取圓柱體示意圖

- (5) 完成步驟 4 後，使用鑽石切割機將直徑 1cm 的圓柱體切成 0.5cm 高之試片，如圖 A.5 所示。每片試片計量上採其平均深度 0.25cm 表示，以方便試驗計算。

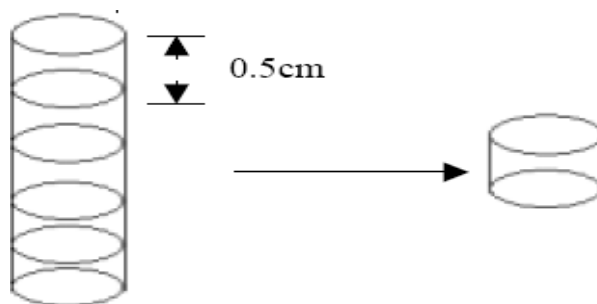


圖 A.5 切取試片示意圖

- (6) 再將直徑 1cm 高度 0.5cm 大小之試片，利用球磨機將其磨成粉狀，再取 3g 的粉末以利後續酸洗法使用。
- (7) 參照 AASHTO T260 之酸洗法，先將 3g 的粉末試樣置於 250mL 燒杯內，加入 75mL 蒸餾水，攪拌分散之，接著將試液燒杯加蓋表玻璃，置於加熱板上加熱沸騰 5 分鐘後靜置 24 小時，依正常過濾程序，將試液過濾之。
- (8) 再於濾液中加入 1-2 滴甲基橙指示劑後，加入濃硝酸並攪拌之，直至試液呈現粉紅-紅色不消失為止（表示試液充分酸化）。
- (9) 如試液中含有高爐石或其他硫化物成分，加入 3mL H_2O_2 (30%)以除去干擾。
- (10) 若試液量不到 125mL~150mL 時，以蒸餾水補足之。
- (11) 用數位電位計滴定，在濾液燒杯中添加 4mL 0.01N NaCl 標準溶液，將燒杯置於電磁攪拌器上，插入電極，以磁子緩慢攪拌溶液。

- (12) 以每次 0.2mL 增量之 0.01N AgNO₃(硝酸銀)滴定，並記錄電位變化量。
- (13) 當電位變化差值最大時，表示已達滴定終點，計算 AgNO₃ 正確滴定消耗量。
- (14) 利用式(A.2)求取氯離子濃度

$$Cl^{-}(\%) = \frac{3.5453(N_1V_1 - N_2V_2)}{W} \quad (A.2)$$

其中 N_1V_1 ：係指 AgNO₃ 滴定溶液之當量濃度與耗用量之乘積

N_2V_2 ：係指外加 NaCl 溶液之當量濃度與所加量之乘積

W ：試樣重量

附錄 B

混凝土非破壞檢測標準之作業程序

一、基本頻率試驗(動彈性模數試驗)

依據 ASTM C215 量測混凝土試體之基本頻率，分為驅動共振法(Forced Resonance Method)及敲擊共振法(Impact Resonance Method)兩種量方法，其設備基本配置分別如圖 B.1 及圖 B.2 所示。

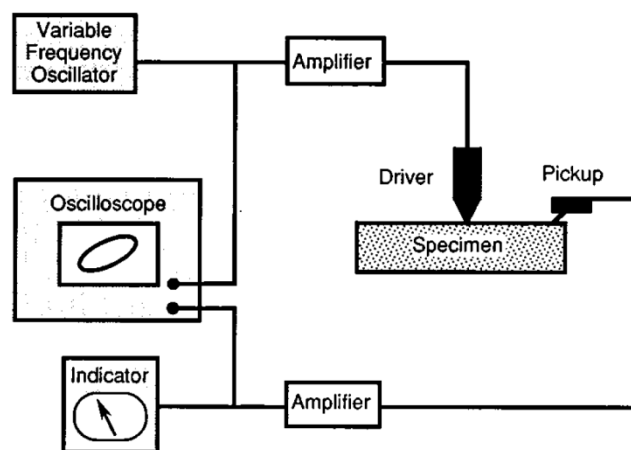


圖 B.1 驅動共振法配置示意圖

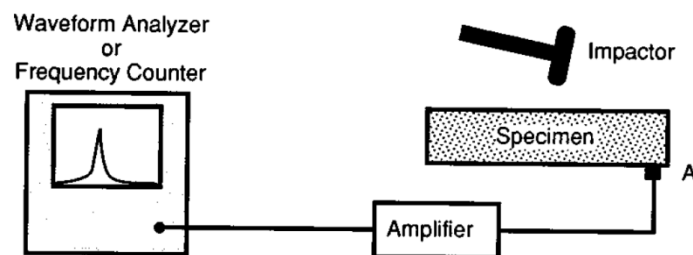


圖 B.2 敲擊共振法配置示意圖

本研究中混凝土動彈性模數之量測，則是以驅動共振試驗法求得，以下針對此試驗法之 ASTM 規範，分別對試體及儀器部份之規定及要求進行說明。

試體部份

混凝土試體長度對橫斷面中最大寬度之比過大或過小，均不易使試體激起基本振態，其比值介於 3 至 5 之間，可得到最佳效果，而其比值至少須大於 2。

當試驗過程中，為不妨礙試體能自由的振盪，必須將試體置於支承上，其支承可為刀口型支承或為厚海棉狀之橡皮墊。

儀器部份

儀器量測系統主要分為驅振及收振裝置，分別敘述如下：

(1) 驅振裝置

驅動法主要是由振盪器接觸混凝土表面，使試體自由振盪，由訊號的解析測得試體基本頻率。根據 ASTM C215 之規定，振盪器在使用之前應予校正，而使用範圍為 100 至 10000 Hz，其讀數應在正確頻率之 $\pm 2\%$ 內。振盪器和放大器所產生之電壓，在使用頻率範圍內，其變化應在 $\pm 20\%$ 內。

(2) 收振裝置

收振器為接收振盪後試體產生的振動反應訊號，且不得妨礙試體自由振盪行為，所以收振器之質量與試體質量比值應相當小。而收振器之反應依所選擇接收器形式的特性，應與試體之運動成正比，且在正常操作範圍下，應無不正常共振。

混凝土試體基本頻率之量測

混凝土試體基本頻率之量測因振動配置方式不同，可分別求得混凝土

試體的橫向、縱向及扭曲之基本頻率，本研究乃針對縱向基本頻率之測定。

混凝土試體縱向基本頻率量測係將試體放置於支承上，且使試體自由縱向振態之振動，試體之安置須使驅振器垂直作用於試體一端表面中央，再將收振器附著於試體另一端表面上，配置如圖 B.3 所示。利用驅動器使試體振盪，進而以示波器分析，將可得到混凝土縱向基本頻率，再經由混凝土試體的縱向基本頻率及試體質量計算出動彈性模數，其公式如式 B.1：

$$E_D = Dwn'^2 \quad (B.1)$$

其中 E_D ：混凝土彈性模數值 (kgf/cm^2)

矩形試體... $D = 0.00408 \, l/bt \, (\text{s}^2/\text{cm}^2)$

圓柱試體... $D = 0.00519 \, l/d^2 \, (\text{s}^2/\text{cm}^2)$

l ：混凝土試體長度 (cm)

d ：混凝土圓柱試體直徑 (cm)

t ：矩形試體橫斷面，沿振動方向之尺度 (cm)

b ：矩形試體橫斷面之另一尺度 (cm)

w ：試體質量 (kg)

n' ：縱向基本頻率 (Hz)

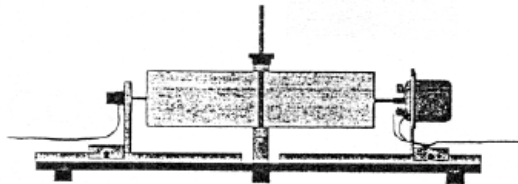


圖 B.3 混凝土試體縱向基本頻率量測配置圖

二、超音波速

依據 ASTM C597 規定量測超音波速，其量測儀器基本配置如圖 B.4 所示，探討混凝土試體於不同齡期及不同環境之超音波波速變化。主要包括發波器、發射器、接收器。

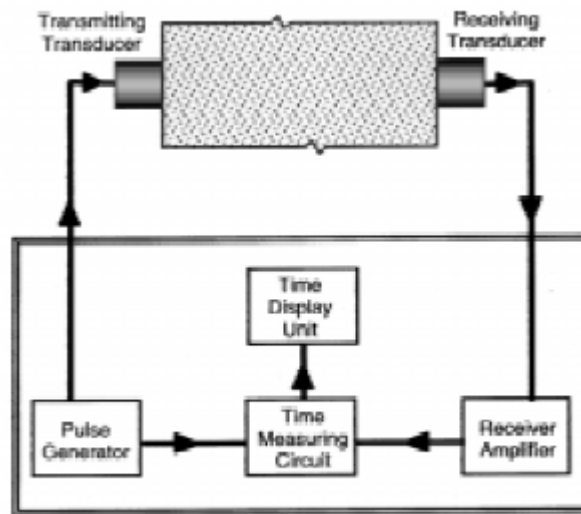


圖 B.4 混凝土試體超音波波速量測配置圖

混凝土試體超音波波之量測

以超音波檢測混凝土波速時，由發射器及接收器之探頭配置方式不同，可分為直接傳遞法、半直接傳遞法及間接或表面傳遞法。本研究乃針對直接傳遞法測定超音波波速。量測程序如下：

- (1) 混凝土試體兩試驗端磨平。
- (2) 試體處於面乾內飽和。
- (3) 兩試驗端塗上耦合劑。
- (4) 將超音波發射端與接收端探頭與試驗端緊密接觸，進行量測。
- (5) 記錄數據。

超音波量測混凝土波速之原理，乃利用發波器經發射端之探頭，置於混凝土表面觸發波源，傳遞於混凝土中，經一段距離，由置於混凝土另一端之接收端探頭接收，經儀器內的時間迴路計算，可得波在混凝土內傳遞的時間 t (s)，若兩探頭距離為 L (m)，則波速 V (m/s) 為

$$V = \frac{L}{t}$$

三、反彈鎚試驗

依據 CNS 10732 規定，量測混凝土試體之反彈數。本標準規定以彈簧驅動鋼鎚，撞擊硬固混凝土表面，以測定其反彈數值之試驗方法。所測定之反彈數，可用於評估混凝土之均勻性，及其概略強度。但本試驗法不得作為評定混凝土強度之替代法。

試體部份

所測試混凝土構材厚度至少需要有 10 cm 厚。所測試之表面，應避免蜂巢、剝落、粗糙或高孔隙之缺陷。為便於比較其反彈數，各混凝土之齡期及潮濕狀況應大致相同。

欲測試之混凝土表面，如過份粗糙或柔軟或表面層水泥鬆散，應用所規定之磨石，研磨光滑。

儀器部份

主要為反彈鎚及磨石，分別敘述如下：

(1) 反彈鎚

具有一彈簧加力鋼鎚，如將彈簧卡鬆釋時，彈簧力將推動撞頭，撞擊混凝土表面，此種撞鎚應能重複使用並保持固定之速度。鋼鎚反彈數值，可由附設於外殼之等分測尺顯示。

(2) 磨石

主要係由碳化矽(即金剛砂)所製成。用以研磨混凝土表面使光滑。

試驗步驟

- (1) 將試鎚持牢，於試驗位置，使其撞頭能垂直試驗表面，緩緩增加壓力，直至撞頭撞擊混凝土表面。撞擊後記錄其反彈鎚至二位有效數字。
- (2) 每次試驗面積，採取 10 次試驗讀數，任兩點撞擊點，均應相距 25mm 以上，撞擊後，檢視其撞痕，若撞擊時發現撞擊點表面有破碎現象，其讀數作廢不計。
- (3) 計算：剔除與 10 次讀數平均數相差 7 以上的數據，再求其剩下之各讀數之平均值。若有 2 個讀數以上被上述方法剔除時，則全組之讀數應作廢。