

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

(成果報告)

放射性廢棄物設施混凝土結構長期安全規範之研究

The research on the long-term security specifications of concretes  
facility structure for radioactive waste

計畫編號:97FCMA008

受委託機關(構):國立臺灣科技大學

計畫主持人:黃兆龍教授

聯絡電話:(02)27376575

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

## 中文摘要

本計畫，主要探討放射性廢棄物設施混凝土結構長期安全規範之研究評估。由蒐集國內外有關混凝土耐久性之相關文獻及本研究初步之驗證結果，要確保混凝土之耐久性，配比設計應以耐久性考量為主；設計強度為輔，且組成材料必須落實品質管制。而材料之配比由相關文獻及驗證結果顯示，混凝土的用水量及水泥用量應儘量減少，服務壽命 100 年水膠比(W/B)應 $\leq 0.32$ ；服務壽命 300 年水膠比(W/B)應 $\leq 0.26$ ，而水灰比均需大於 0.5。在低用水量及水泥用量的要求下，須適量使用卜作嵐材料（奈米級矽灰、微米級飛灰及爐石粉）及減水摻料。循此配比原則，由驗證結果顯示：混凝土除能符合設計強度外，更具有高體積穩定性、高阻抗性、低滲透性、耐硫酸鹽侵蝕及低氯離子滲透性。由氯離子滲透係數來評估混凝土工程障壁之耐久性，在施工良好及足夠鋼筋保護層的前提下，透過計畫-執行-檢核-修正(PDCA)程序，建立標準作業程序(SOP)，應可滿足低放射性廢棄物管制年限的要求。

## **Abstract**

In Taiwan, the radioactive waste is classified into high level waste (HLW) and low level waste (LLW). HLW is referred to the spent nuclear fuel (SNF). LLW is produced from medical, agricultural, industrial, education and research organizations and nuclear power plant, etc., and the major waste from nuclear power plants due to daily operation and maintenance is approximately 90% of LLW. The low level radioactive waste output through reducing the production and the volume of radioactive waste is significantly reduced. However, it is the best solution to dispose the waste in a final repository. To construct a safe final disposal facility for such large amount of low level radioactive waste, it is needed to systematically study the durability of shield concrete and the evaluation measure for final repository. It will be able to establish a reliable appraisal pattern to match general requirement for 300-year or 100-year lifetime. However, the durability of the concrete structure is affected by so many factors, including chemical and physical ones from concrete materials, mixture proportion, concrete practice, exposure environment condition as well as the possibility of the radionuclide leakage. The concrete shield structure is needed to be strong and tight enough to conquer the environment attack and to prevent radionuclide leakage diffuse through concrete body. Hence the measure of the durability of the concrete facility should be considered on all aforementioned points, and a reasonable appraisal method can be derived. This study, the present stage mainly to collect international experience of appraisal the durability of low level radioactive waste disposal concretes facility and the related research works carry on the analysis feasibility appraisal. Plans to begin appraisal of the concrete

material related durable factor, from mixture design to the construction phase. Therefore it is first to begin with appraising the concrete material durability. Further discusses the hinder performance of main nuclear plants as it is exposure to the radiant as  $Cs^{-137}$  and  $Sr^{-90}$  and its effect on the concrete material nature and the influence of the splendid attire vessel radiation leakage. Finally provides the reliable durable appraisal control pattern by processing P-D-C-A cycle, to build up a SOP, so as to guarantee the long-term security of concrete facility, suitable concrete container and concrete structure.

## 目 錄

摘要.....	I
目 錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
壹、計畫緣起.....	1
貳、我國低放射性廢棄物來源與相關處置研究.....	4
2-1 低放射性廢棄物來源.....	4
2-2 放射性廢棄物處理及儲存方式.....	4
2-3 我國放射性廢棄物處置現況.....	6
2-4 水泥混凝土材料在放射性廢棄物處置之相關研究.....	8
參、混凝土結構的耐久性設計與指標.....	19
3-1 結構耐久性的重要性.....	19
3-2 混凝土與環境的互動.....	24
3-3 混凝土耐久性的主要源頭－水.....	32
3-4 混凝土施工養護對耐久性的影響.....	66
3-5 混凝土耐久性評估方法.....	89
肆、混凝土結構耐久性設計及導則.....	100
4-1 耐久性設計考量事項.....	100
4-2 提高混凝土結構耐久性的設計原則.....	102

4-3 耐久性混凝土的材料選擇 .....	103
4-4 放射性混凝土結構耐久性評估 .....	105
4-5 放射性廢棄物設施混凝土結構長期安全規範.....	110
4-6 放射性廢棄物多種年限混凝土容器設計案例之建立.....	112
伍、混凝土工程設施結構應力軟體評析.....	114
陸、結論與建議.....	124
6-1 結論.....	124
6-2 建議 .....	125
參考文獻.....	126
附件一.....	136
附件二.....	140
附件三.....	151
審查意見表.....	162

## 表目錄

表 2-1 水泥材料對於核種阻制之相關機理研究	11
表 3-1 台灣地區氣候分區特徵	26
表 3-2 台灣省各地區環境與 ISO 腐蝕分類之對照表	27
表 3-3 混凝土物理與化學性劣化種類、基因、控制變數及劣化機理	36
表 3-4 水泥漿體齡期對滲透係數的影響	43
表 3-5 水泥漿體產生不連續毛細管孔所需之養護時間	44
表 3-6 大壩的滲透係數	45
表 3-7 氯離子電滲電量	46
表 3-8 減低拌和用水量的好處	61
表 3-9 混凝土防蝕保護最大氯離子含量	62
表 3-10 熱天混凝土施工品質對新拌及硬固狀態可能傷害及防止策略	86
表 3-11 混凝土碳化深度預測模式	90
表 3-12 氯離子滲透與預測相關研究	97
表 4-1 加拿大跨峽大橋設計需求	108
表 4-2 耐久性指標比較	109
表 4-3 本研究配比與加拿大跨峽大橋服務年限預測	109
表 4-4 混凝土容器年限設計表	113

## 圖目錄

圖1-1 中放廢棄物最終處置概念	2
圖1-2 放射性廢棄物最終處置多重障壁系統	3
圖1-3 日本Rokkasho低放射性廢棄物最終處置多重障壁系統	3
圖2-1 放射性腐蝕產物行為與廢棄物產生的關係	13
圖2-2 固體廢棄物處理流程圖	13
圖2-3 (a)廢棄物桶固化灌漿	14
圖2-3 (b)廢棄物桶固化灌漿	14
圖2-4 (a)廢棄物桶固化運送至貯存庫	15
圖2-4 (b)廢棄物桶固化運送至貯存庫	15
圖2-5 (a)廢棄物貯存庫	16
圖2-5 (b)廢棄物貯存庫	16
圖2-6 B類廢棄物處置概念	17
圖2-7 預壘骨材灌漿—隧道	17
圖2-8 預壘骨材灌漿—豎井	18
圖2-9 比較在半衰期放射性同位素和歷史混凝土之間的壽命	18
圖3-1 台灣地區氣候分區位置圖	25
圖3-2 台灣各地區之鹽份附著量最高值分佈圖	27
圖3-3 台灣地區空氣污染物概況	30
圖3-4 台灣平均降雨量及平均氣溫分佈	31

圖3-5 台灣地區雨水酸鹼度 (pH值) .....	31
圖3-6 混凝土劣化之物理基因示意圖 .....	33
圖3-7 混凝土劣化之化學基因示意圖 .....	34
圖3-8 水泥漿W/C與混凝土材料比重之關係 .....	39
圖3-9 SCC中骨材沉澱的問題 .....	41
圖3-10 混凝土骨材與水泥漿之弱界面 .....	42
圖3-11 水灰比對滲透率之影響(1)水泥漿體(2)混凝土 .....	44
圖3-12 水泥漿量及拌和水量對電阻係數之影響 .....	47
圖3-13 W/C、W/B及W/S對電阻係數之影響 .....	47
圖3-14 用水量、W/C、W/B及W/S與電阻之關係 .....	48
圖3-15 W/C、W/B、W/S對水泥漿體及混凝土之影響 .....	50
圖3-16 電阻與氯離子滲透之關係 .....	51
圖3-17 毛細孔隙體積和電阻係數之成長關係 .....	52
圖3-18 卜作嵐材料對毛細孔隙體積與電阻之影響 .....	53
圖3-19 調整級配達到緻密的效果 .....	55
圖3-20 水泥漿量對流變性質的影響 .....	56
圖3-21 W/B對流變性質的影響 .....	56
圖3-22 同一坍度及同一強度下強塑劑與拌和水量關係 .....	57
圖3-23 降低水膠比增進鍵結力 .....	58
圖3-24 淺層放射性廢棄物地下處置倉型式 .....	59

圖3-25 水泥漿量對超音波速之影響	60
圖3-26 混凝土電阻與鋼筋腐蝕性	63
圖3-27 不同最大骨材粒徑及坍度條件下混凝土建議用水量及輸氣量	65
圖3-28 有裂縫混凝土內鋼筋腐蝕狀況示意圖	67
圖3-29 混凝土養護時間對抗壓強度的影響	69
圖3-30 混凝土養護濕度對混凝土強度的影響	71
圖3-31 混凝土養護濕度及時間對混凝土強度的影響	72
圖3-32 預先濕養護對水泥漿體(1)吸水率之影響(2)裂縫之形成(60%相對濕度)	73
圖3-33 混凝土暴露濕度下養護之強度比率成長曲線	74
圖3-34 預先濕養護7天水泥漿體相對濕度與飽和石灰水中養護試體之強度比率曲線	75
圖3-35 預先濕養護28天水泥漿體相對濕度與飽和石灰水中養護試體之強度比率曲線	75
圖3-36 常溫下各相對濕度對水泥漿體中氫氧化鈣X光繞射峰成長率之影響	76
圖3-37 水泥漿體濕度條件下之裂縫狀況觀測圖	76
圖3-38 養護方法對膨脹效果之影響	78
圖3-39 混凝土裂縫產生要因	79

圖3-40 減少乾縮的方法 .....	79
圖3-41 利用降低水泥量達到降低混凝土水化熱的效果 .....	82
圖3-42 混凝土溫度和大氣狀況混凝土表面水份蒸發量估計圖 .....	85
圖3-43 混凝土之塑性收縮裂縫 .....	87
圖3-44 不同水泥種類混凝土不同水膠比與裂縫指數之關係 .....	88
圖3-45 不同水膠比不同水泥種類混凝土與裂縫指數之關係 .....	89
圖3-46 混凝土內鋼筋腐蝕活化齡期建議圖 .....	97
圖3-47 混凝土極化電阻與水膠比關係圖 .....	98
圖3-48 不同配比混凝土其強度與服務壽命關係圖 .....	98
圖3-49 混凝土強度與擴散係數關係圖 .....	99
圖3-50 不同等級混凝土其內鋼筋保護層厚度與服務壽命關係圖 .....	99
圖3-51 不同種類水泥混凝土在不同pH值之滲出圖 .....	100
圖4-1 不同保護層厚度與EC服務年限之關係 .....	110
圖5-1 ANSY 分析中央軌枕彎矩 .....	122
圖5-2 ANSYS分析中央軌枕剪力 .....	122
圖5-3 LS-DYNA操作流程 .....	123
圖5-4 AMPS軟體分析高完整性承裝容器墜落測試之應力分佈 .....	123
圖5-5 Slab2應用於箱型梁之斷面分析與配筋設計 .....	123

## 壹、計畫緣起

放射性廢棄物最終處置，是國內外最頭痛的環保問題，而低放射性廢棄物又佔放射性廢棄物的 90%以上，且有常態性的產量。因此，最終處置場的設置是未來須面對並解決的問題，國內外對於最終處置場設置的相關研究已累積豐富寶貴的經驗。至 1981 年，IAEA 安全叢書第 216 號建議中、低放射性廢棄物可淺埋處置和岩洞處置，也可考慮水力壓裂、深井注入及深地層處置[1]。近年來普遍的做法是採近地表處置，近地表處置是在具有幾公尺厚的防護覆蓋層的地表上或地表下，或者再地表下幾十公尺的岩洞中，具工程屏障或不具工程屏障置之處置方式[2]。放射性廢棄物最終處置場多重障壁系統其項目，包括從廢物固化體、包裝容器、廢棄物安放、回填、密封或覆蓋等工程，如圖 1-1 所示是中放廢棄物的處置概念[52]。而陸地淺埋處置是應用最早最廣泛的一種處置方式。陸地淺埋依其與地表關係可分為全地下式、半地下式和全地上式三種；按其工程要求可分為有工程構造物（如圖 1-2~3 所示）與無工程構造物（即裸埋）等兩種形式[3]。而工程構造物，主要係指鋼筋混凝土構造物，其材料性質參數涉及未來處置場設計準則，也是安全評估時的重要參數。因此，有必要針對混凝土材料建立其耐久性的評估方法，作為日後處置場混凝土結構設施設計施工之參考依據。本研究，主要先針對國外放射性廢棄物最終處置混凝土工程，所採用的混凝土組

成材料進行配比評估。從材料科學著手探討與耐久性有關之影響因子（如裂縫敏感性、體積穩定性、強度參數、鹼骨材反應、電阻性能、氯離子電滲、二氧化碳滲透及硫酸鹽侵蝕等性質）[4-11]。藉由國外的相關工程經驗及耐久性文獻之研析，期能建立適合國內進行相關工程時的量化的評估模式，回饋供設計及施工管制之參考依據。並進行混凝土盛裝容器、結構性能與服務年限評估，並透過不斷的 PDCA 使混凝土結構安全規範更可靠而實用。

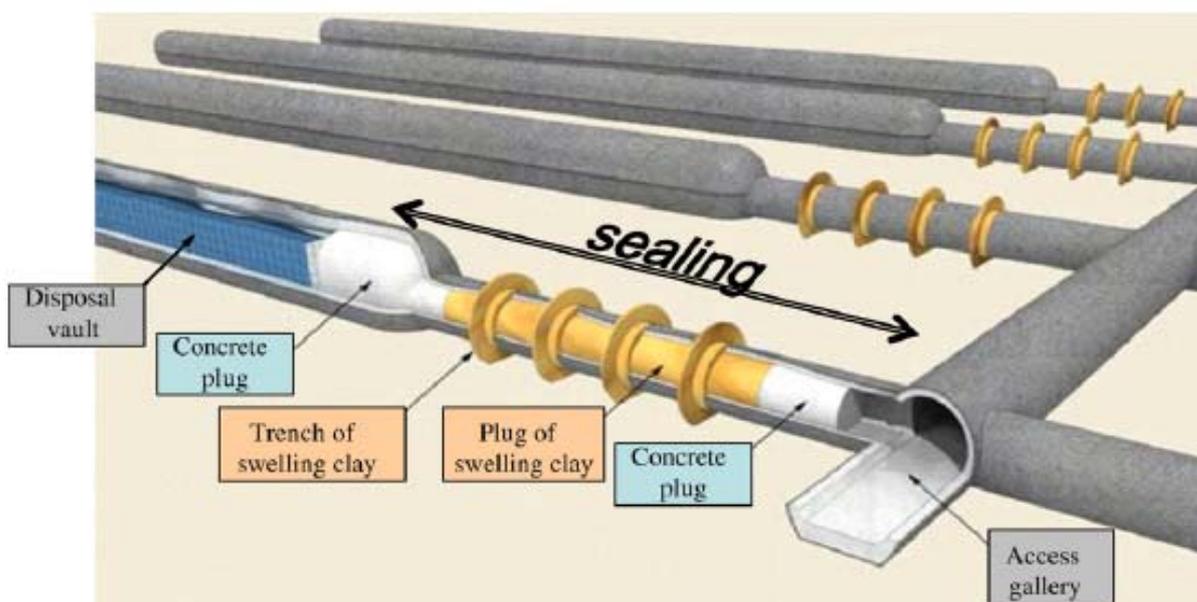


圖 1-1 中放廢棄物最終處置概念[52]

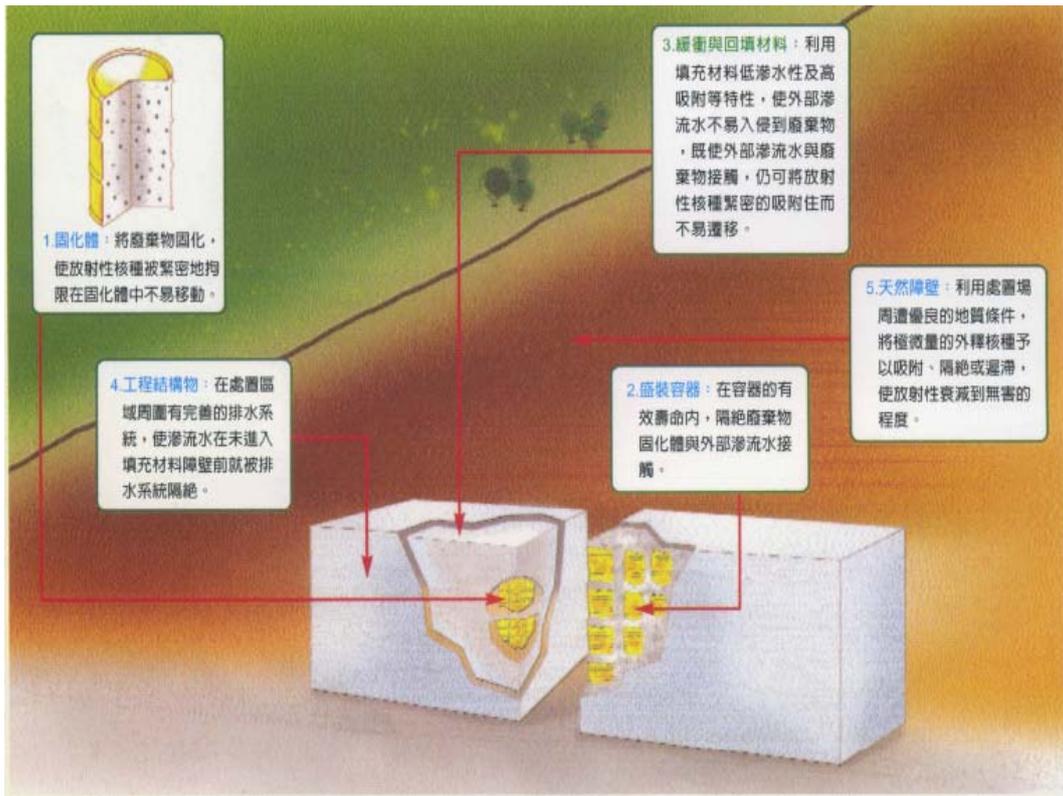


圖 1-2 放射性廢棄物最終處置多重障壁系統[3]

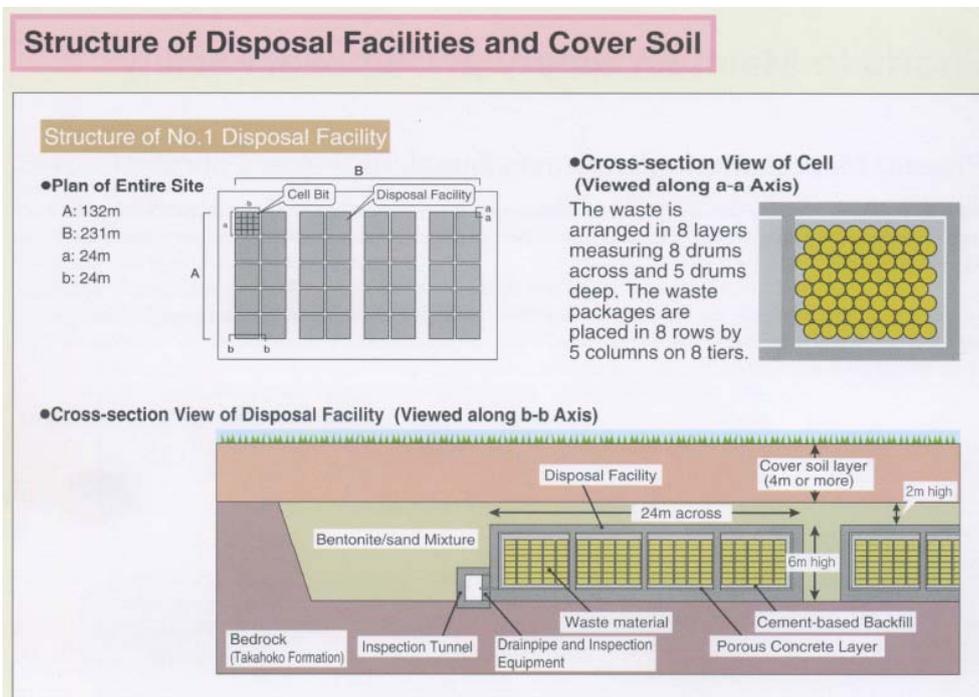


圖 1-3 日本 Rokkasho 低放射性廢棄物最終處置多重障壁系統[3]

## 貳、我國低放射性廢棄物來源與相關處置研究

### 2-1 低放射性廢棄物來源

一般核能電廠之低放射性廢棄物的來源，可粗分為溼性廢棄物與乾性廢棄物，溼性廢棄物主要包括廢樹脂、濃縮廢液、及反應爐淨化水系統所產生的過濾殘渣等。乾性廢棄物包括污染泥土、保溫材、爐灰、水泥塊、防護衣物、手套、工具及廢金屬等，乾性廢棄物又大致可以分為可燃性廢棄物及不可燃性廢棄物兩類，而其產生方式可由圖2-1及圖2-2所示。以下列舉有關廢棄物之來源：

1. 核能電廠在維護或運轉過程中所產生受放射性物質污染的廢樹脂、濃縮廢液、防護衣物、手套、工具及廢棄的零組件、設備或是反應爐淨化水系統所產生的殘渣等。
2. 核能電廠運轉壽命終了時，各項廢棄核設施拆除過程中，所產生之廢棄物。
3. 醫療院所、農業、工業及學術研究單位使用放射性同位素過程中，所產生的廢棄物與使用過但乃具相當輻射強度之輻射源。

### 2-2 放射性廢棄物處理及儲存方式

為了防止，低放射性廢棄物中的放射性核種，污染環境及對生物造成傷害，處理低放射性廢棄物時，需將放射性廢棄物轉變為較

穩定的形態，其中經過焚化、壓縮或固化處理後，再以鍍鋅鋼桶盛裝，如圖2-3 (a) 及圖2-3 (b) 所示。使其所含的放射性核種，無法自廢棄物中釋出，再將包裝處理後的放射性廢棄物暫存於核能電廠之廢棄物貯存庫內，嚴格管制，如圖2-4 (a) 及圖2-4 (b) 所示。最後，再送往最終處置場處置如圖2-5 (a) 及圖2-5 (b) 所示與人類生活環境，永久隔離。

低放射性廢棄物的處理流程包括：

- 1.廢棄物體積的縮小（減容）
- 2.廢棄物的固化
- 3.廢棄物的運輸
- 4.廢棄物的最終處置

在低放射性廢棄物最終處置場尚未興建完成之前，國際上普遍一致的作法是將廢棄物貯存在核能設施之內，我國亦遵循歐美先進國家的處理方式，將廢棄物暫時貯存在核能電廠，並嚴格執行安全管理及環境輻射偵測，保護周邊環境及民眾之健康。因此，為了解決核廢棄物貯存所產生之問題，國內外的混凝土技術開始進行研究與討論，針對其研發更具耐久性及抗輻射老化之高性能材料 [5~11]，以保障核廢棄物的安全儲存。並對於纖維加強混凝土技術之應用方面，提出一系列的研究與討論，纖維加強混凝土不但可提升混凝土的強度、韌性及耐久性等，且可以解決核廢棄物盛裝的問

題，在核廢棄物貯存容器上之應用有極正面的助益。

### 2-3 我國放射性廢棄物處置現況

放射性廢棄物的放射性強度會隨著時間增長而遞減，以鈷<sup>-60</sup>核種為例，它的半衰期約為 5.3 年，也就是經過 5.3 年，它的活度會減為原來的一半；經過 50 年後約已衰減至原來的千分之一；若再經過 50 年，則其放射性活度將降為原來的百萬分之一，可以說它的放射性幾乎衰變殆盡。低放射性廢棄物內所含的放射性核種以鈷<sup>-60</sup>最多，以及少量的銫<sup>-137</sup>，所以經過 300 年後，放射性就會隨著時間而自然衰減至無害的程度。

放射性廢棄物最終處置就是利用這種特性，並以多重障壁--包括固化體、廢棄物容器、填充材料、排水設施與天然障壁等，可將放射性廢棄物與人類生活環境完全隔離，讓放射性自然衰減，以保障大眾安全及維護環境品質。現將多重障壁的特性分述如下：

1. 固化體障壁：將廢棄物與固化劑混合固化，使放射性核種被緊密地拘限在固化劑中不易移動。
2. 廢棄物容器障壁：在容器的有效壽命內，具有隔絕廢棄物固化體與外部滲流水接觸的功能。
3. 填充材料障壁：填充材料具備低滲水性及高吸附等特性，可使外部滲流水不易入侵到廢棄物體中，即使外部滲流水與廢棄物體接觸，放射性核種乃會被填充材料緊密的吸附住，而不易遷移。

4.排水設施障壁：在處置區域周圍有完善的排水系統，使滲流水在未進入填充材料障壁前就被排水系統隔絕。

5.天然障壁：利用處置場附近優良的地質條件，可吸附極微量的外釋核種，使放射性衰減到無害的程度。

國內台電公司過去十多年推動處置設施選址工作，由於缺乏作業的法律依據，以致無法選定場址。有鑒於此，原能會擬具「低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例」草案，並於2006年5月順利完成立法，經總統公布施行。該場址條例公布施行後，經濟部已依規定於2006年8月，邀集13位學者專家及5位機關代表，成立「選址小組」；另會商原能會後指定台電公司為選址作業者，協助選址小組進行選址工作。預定於民國2008年底，以地方公投方式決定候選場址。

目前選址小組已依場址條例規定，研擬完成選址計畫草案，於2007年3月辦理公告，將徵詢各界意見後，據以執行選址作業。原能會依場址條例規定，已於2006年11月發布實施「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區的範圍及認定標準」，台電公司應依該標準的規定，進行有關地質、水文、地球化學等場址調查作業。調查期間，原能會將派員檢查該調查作業的合適性及完整性。

原能會為了嚴密管制低放射性廢棄物最終處置的安全，已規定最終處置場址不得位於下列地區：

- 1.活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全的地區。
- 2.地球化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並足以影響處置設施安全的地區。
- 3.地表或地下水文條件足以影響處置設施安全的地區。
- 4.高人口密度的地區。
- 5.其他依法不得開發的地區，如生態保護地區、史蹟保存地區、重要天然資源地區等。

依場址條例規定的選址作業時程，選定候選場址約需 2 年；另依環境影響評估法規定，處置設施須進行二階段環評，其所需環境調查、報告撰寫及環保署審查的時程約需 3 年。因此，目前台電公司規劃於 2011 年中，選定處置設施場址，提報行政院核定。台電公司於完成場址特性調查、設施設計及安全評估後，應依「放射性物料管理法」規定，向原能會申請建造執照。原能會除了進行安全審查外，須將申請案公告展示 120 日，以廣泛收集各界意見，並舉行聽證。台電公司規劃處置設施的工程包括碼頭、道路、接收處理與處置區等設施的興建及申請運轉執照送審所需的作業時間約 5 年，預定於 2016 年底前展開處置作業[12]。本計畫之目的，即在建立低放處置相關混凝土結構設施之安全規範，以供相關單位設計之參考。

#### 2-4 水泥混凝土材料在放射性廢棄物處置之相關研究

水泥礦物中如  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ，對於放射性廢棄物元素中

如 Cs, Sr, Ba, U, La 及 Nd 沒有阻滯效應，但經水化及加入適量 CO<sub>2</sub> 懸浮汽泡後則有不錯的阻滯效應[13]；最近有關水泥水化對於核種的阻滯機理如，表 2-1 所示[53]。在花崗岩或黏土的貯置地質，其自然水在平衡條件下對於水泥漿體中 C-S-H 膠體的溶出，就長期來說是微乎其微[14]。另有研究指出，以氰亞鐵酸鹽溶液拌製水泥容器，檢測阻隔放射性廢棄物滲出效果顯示，就 Cs 及 Co 而言分別是一般水泥容器的四及十倍[15]。對於卜作嵐材料，如飛灰、爐石的添加，經世界多國的研究顯示能有效改善水泥砂漿的孔隙結構提高材料的緻密性，進而改善氣體滲透與氯離子滲透的性能[4]。對於放射性廢棄物，混凝土應具有優良的圍阻效果，有正面而積極效益[16]。在法國「B 類」放射性廢棄物的處置方式如圖 2-6 所示[17]。「富鹽基」水泥，應用在背填水泥砂漿，對於放射性的圍阻，驗證有良好的效果；使用良好粒徑與級配的砂，可減少背填水泥砂漿的收縮與裂縫[17]。另有研究顯示，在水泥中添加 7.5% 的高嶺土，雖然較一般水泥強度稍低，但可減少 <sup>137</sup>Cs 及 <sup>60</sup>Co 的滲出[18]。在南斯拉夫有一 10 年研究計畫，進行水泥中添加水泥廢棄物拌製水泥漿及水泥砂漿，對於 <sup>137</sup>Cs 的阻滯研究，成果顯示適當的配比可有效降低 <sup>137</sup>Cs 的滲出。由滲出率預估可滿足 300 年的服務年限，未來可供工程溝

槽設計之參考[19]。另一方面，在混凝土相關研究中，使用碎裂蒸發岩作為骨材，模擬處置放射性廢棄物的地質狀況。並選用五種骨材作為模擬挖掘背填、一般混凝土或預壘混凝土，在配比適當的情況下有適當的強度與低滲透性[20]。在日本研究用金屬貯置桶及混凝土材料製作混凝土桶，來處置廢燃料兩者間的性能差異，而混凝土桶有較佳的經濟性[21]。另有研究，將貯存放射性廢棄物混凝土桶，放置於緻密預壘骨材中，再灌漿如圖 2-7 及 2-8 所示。這樣的處置方式，水化熱引發的裂縫、收縮及潛變均較少。這樣的處置方式與中、高放射性廢棄物半衰期加以驗證，永久處置應該是可達成。如圖 2-9 顯示，鈷<sup>60</sup>、銫<sup>137</sup>約 300 年可衰減至不須管制，而 Pu<sup>239</sup>則需 24000 年之久。而已知年代最久遠的混凝土材料已有 7000 多年齡期[22]。因此，對於放射性的處置，處置設施長期服務壽命是基本的需求；由存在最久遠混凝土材料而言，處置結構在妥善的設計考量下，應可滿足中低放廢棄物的處置安全需求。混凝土孔隙結構影響其滲透性，而混凝土品質受環境因素，進而影響核能發電廠之安全[54]；有研究以 28 天及 91 天齡期；水灰比 0.45、0.6 及 0.8 的試體，比較其氣透性與透水係數。結果顯示，水灰比 0.6 及 0.8 與齡期關係不大；而水灰比 0.45

則以 28 天齡期試體水密性能最佳[22]。另有研究顯示，對於設置於地底下之混凝土放射性處置結構以低鹼、低熱水泥所拌製之混凝土較適合，而低鹼、低熱水泥，則可由普通水泥調配適量的飛灰、爐石及矽灰，降低混凝土中總鹼的供應量而獲得需求的性能[55,56]。

表 2-1 水泥材料對於核種阻制之相關機理研究[53]

Element	Solid studied	Mechanism	Reference
Group 1	CSH	Electrostatic sorption <sup>a</sup>	[3]
Group 1	CSH	Electrostatic sorption to silanol <sup>a</sup>	[4]
Al	CSH	Substitution for Si	[87]
Am	Concrete	Mineralogical control	[13]
Am	Concrete	Surface area control	[13]
Am	OPC	Via hydroxide species	[19]
As	OPC	Sorption onto CSH	[32]
As	OPC	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> substitution in ettringite	[32,30]
As	OPC	Ca-As compound formation	[32,33]
Ba	CSH	Substitution for Ca	[52]
C (Org)	Mortar	Electrostatic sorption <sup>a</sup>	[34]
Cd	CSH	Immobilisation within CSH structure	[81]
Cl <sup>-</sup>	HCP	Formation of CaO-CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	[44]
Cl <sup>-</sup>	Concrete	Chemisorbed layer on the surface of CSH	[46]
Cl <sup>-</sup>	CSH	Chemisorbed on hydrated C <sub>3</sub> S surface	[47]
Cl <sup>-</sup>	(Synthetic) CSH	Freidel's salt formation	[37-39]
Cm <sup>3+</sup>	CSH	Incorporation in CSH	[21,22]
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCP	Precipitation <sup>b</sup>	[15]
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cement	Adsorption on colloids	[36]
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCP	Electrostatic adsorption onto a positive site <sup>a</sup>	[37]
Cr(III)	Hydrogarnet	Incorporation by hydrogarnet	[53]
Cr(III)	CSH	Si substitution in CSH	[81]
Cr(III)	CSH	Al substitution in Ca aluminate hydrate	[81]
Cr(VI)	Aluminate	Ion-exchange with OH <sup>-</sup>	[82-84]
Cr(VI)	OPC	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> substitution in ettringite	[30]
Cs	CSH Aluminate		[5]
Cs	CSH	Electrostatic sorption <sup>a</sup>	[15]
Cs	CSH		[6]
Cs	CSH	Breakage of silicate chain	[3]
Cs	Cement	Inside agglomerated silica particles	[16]
Cu	CCF	Precipitation <sup>c</sup>	[56,57]
Eu	CSH	Adsorption	[25]
Eu	CSH	Surface complexation or precipitation <sup>d</sup>	[102,22]

表 2-1 水泥材料對於核種阻制之相關機理研究-續[53]

Element	Solid studied	Mechanism	Reference
Hg	Etringite		[88]
$\Gamma^-$	Ahamina cement	Replacement of $\text{OH}^-$	[50]
$\Gamma^-$	CSH	Electrostatic sorption <sup>a</sup>	[15]
$\Gamma^-$	OPC	Electrostatic sorption <sup>a</sup>	[49]
$\Gamma^-$	OPC	Incorporation	[49]
Mo(VI)	HCP	$\text{CaMoO}_4$ and Mo-substituted $\text{AF}_m$ phase	[2]
Na	CSH	Substitution	[17]
Na	CSH	Ion exchange	[18]
Ni	CSH		[15]
Ni	CSH	Coprecipitation or surface complexation	[90]
Ni	HCP	Coprecipitation or surface complexation	[56,91]
Ni	HCP	Formation of LDH	[92]
Np	OPC	Sorption followed by reduction	[23]
Pb	CSH	Linked to silica tetrahedra in ferrite	[53]
Pb	CSH	Formation of Si-O-Pb bonds	[54,55]
Pb	CCF	Precipitation <sup>d</sup>	[56]
Pb	OPC	Precipitation <sup>d</sup>	[58,59]
Pb	CSH	Sorption of $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$	[63,64]
Pb	CCF	Substitution for Ca	[57]
Pu	Concrete	Preferential on cement paste over aggregates	[13]
$\text{SeO}_3^{2-}$	Etringite	Formation of $\text{CaSeO}_3$	[68]
$\text{SeO}_3^{2-}$	Etringite	Electrostatic sorption <sup>a</sup>	[68]
$\text{SeO}_4^{2-}$	Etringite	Substitution for $\text{SO}_4^{2-}$ in ettringite and monosulphate	[69,71]
Sn	CSH	Ca-stannate formation <sup>b</sup> sorption at lower concentrations	[27]
$\text{SO}_4^{2-}$	CSH	Surface sorption	[76]
Sr	$\text{C}_3\text{AH}_6$	Substitution for Ca	[104]
U(VI)		Formation of solubility-limiting phases with Ca and Si <sup>f</sup>	[26]
U(VI)	OPC	Inner sphere interactions	[23]
U(VI)	OPC	Formation of oligomeric surface complexes or precipitates <sup>b</sup>	[23]
U(VI)	HCP/CSH	Calcium uranate precipitate <sup>b</sup>	[27]
U(VI)	CSH	Sorption	[28]
$\text{VO}_3^-$	OPC	$\text{SO}_4^{2-}$ substitution in ettringite	[30]
Zn	CSH	Linked to Si tetrahedra in CSH	[53,54,82]
Zn	CCF	Precipitation <sup>d</sup>	[56]
Zn	Ferrite	Formation of Fe-O-Zn bonds in ferrite	[94]
Zn	CSH	Precipitation of zincate phases <sup>b</sup>	[96]

<sup>a</sup>Electrostatic mechanism implies opposite charge on the sorbate.

<sup>b</sup>No indication of concentration at which precipitation began.

<sup>c</sup> $[\text{Cu}(\text{ac})]$  after precipitation=1 ppm.

<sup>d</sup>Solubility limit  $\sim 10^{-16} \text{ mol dm}^{-3}$  [99].

<sup>e</sup> $[\text{Pb}(\text{ac})]$  after precipitation=9.4 ppm.

<sup>f</sup> $[\text{U}(\text{VI})(\text{aq})]$  after precipitation= $10^{-8}$ - $10^{-9} \text{ mol dm}^{-3}$ .

<sup>g</sup> $[\text{Zn}(\text{ac})]$  after precipitation=27.5 ppm.

註：表所列之參考文獻請參閱本文所引文獻[53]

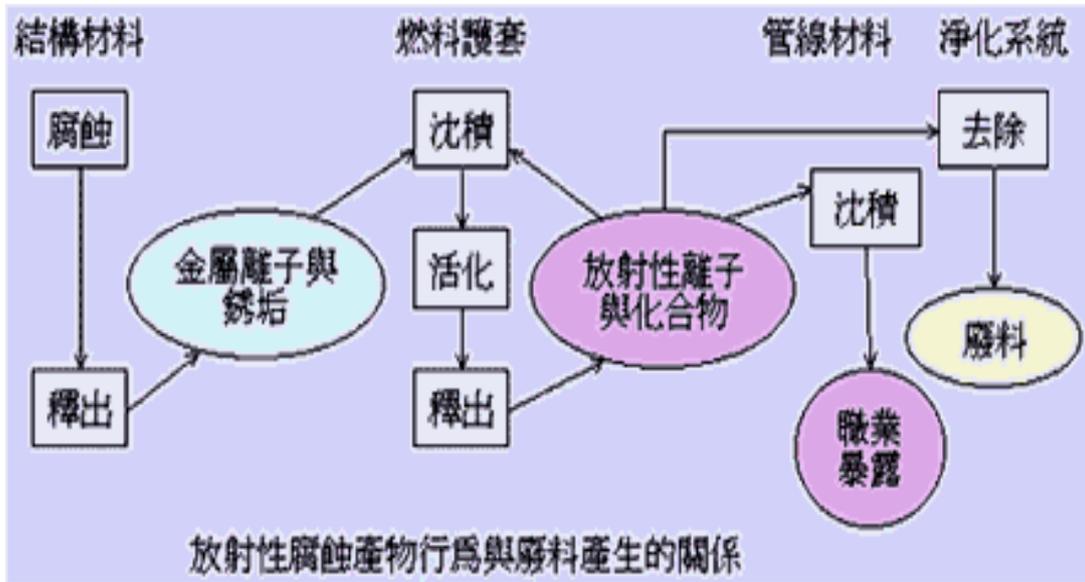


圖 2-1 放射性腐蝕產物行為與廢棄物產生的關係[91]

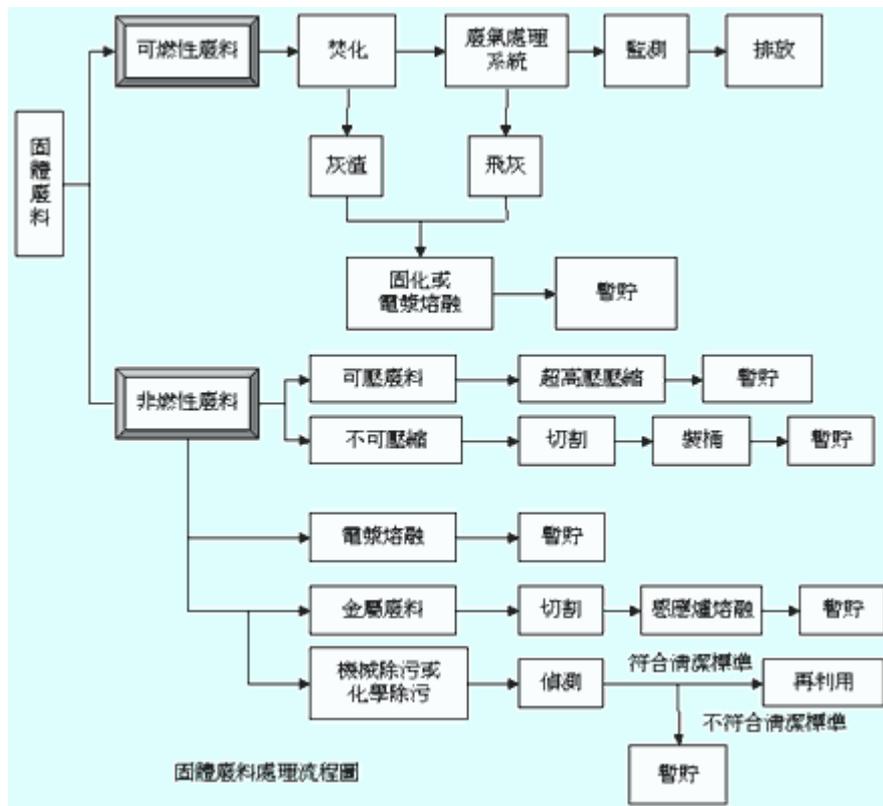


圖 2-2 固體廢棄物處理流程圖[91]



圖 2-3(a) 廢棄物桶固化灌漿[91]



圖 2-3(b) 廢棄物桶固化灌漿[91]



圖 2-4(a) 廢棄物桶固化運送至貯存庫[91]



圖 2-4(b) 廢棄物桶固化運送至貯存庫[91]



圖 2-5(a) 廢棄物貯存庫[91]

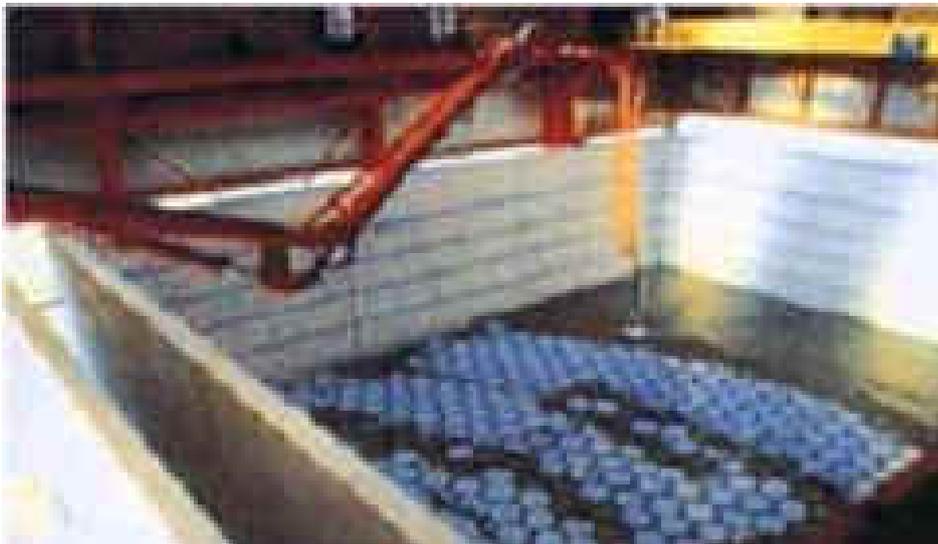


圖 2-5(b) 廢棄物貯存庫[91]

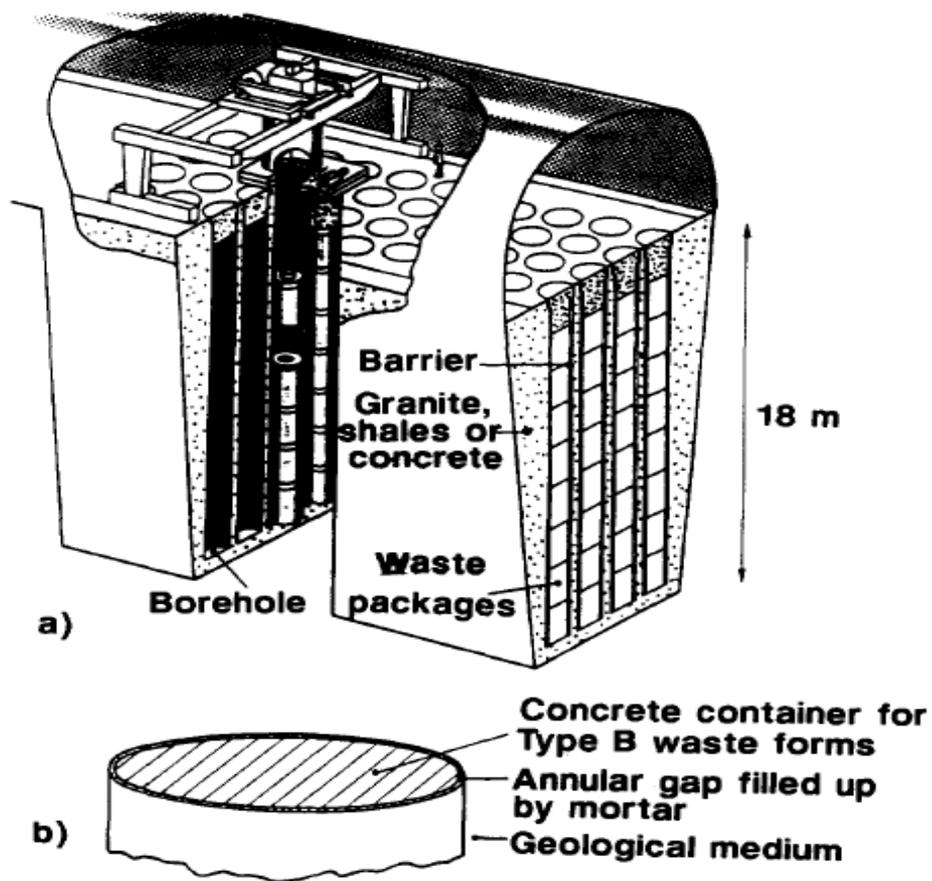


圖 2-6 B 類廢棄物處置概念[17]

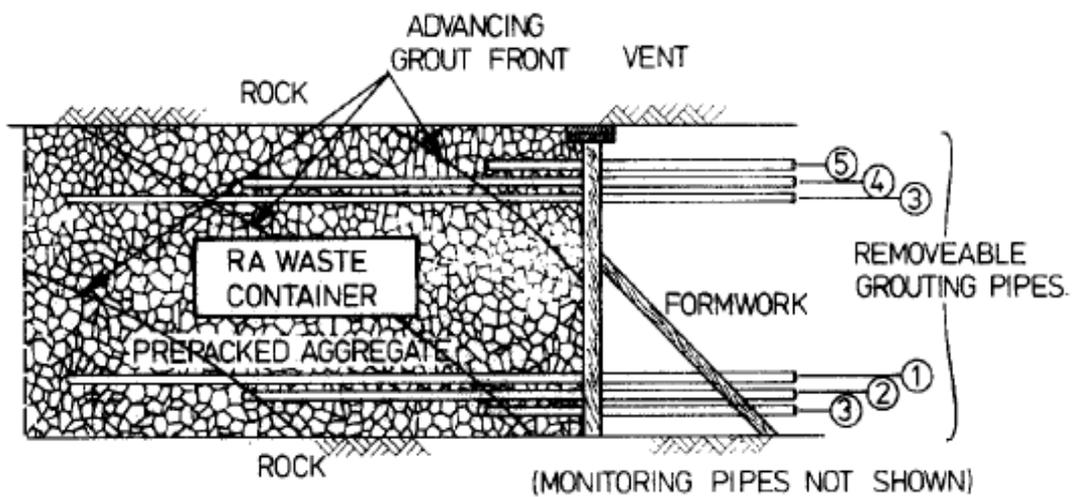


圖 2-7 預壘骨材灌漿—隧道[22]

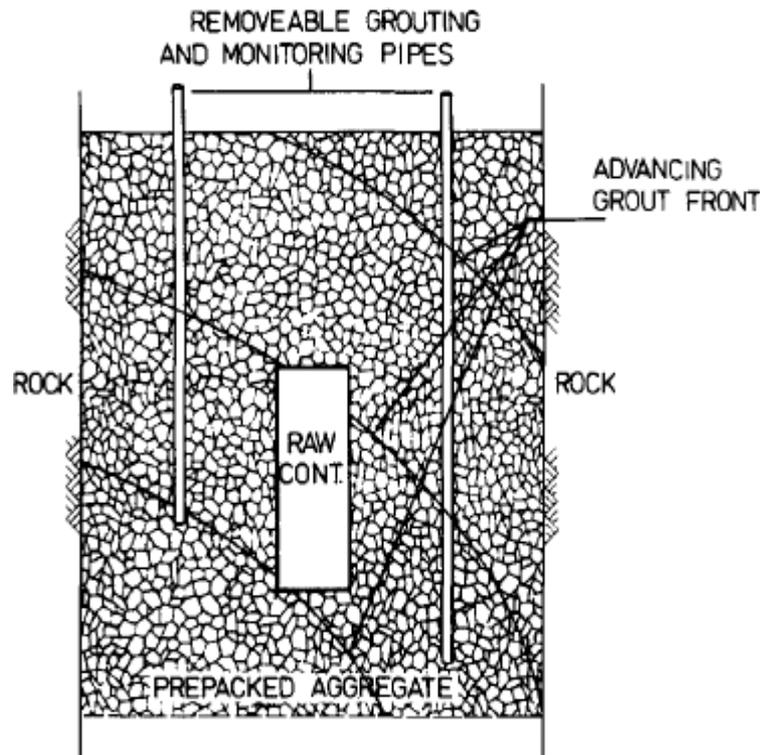


圖 2-8 預壘骨材灌漿—豎井[22]

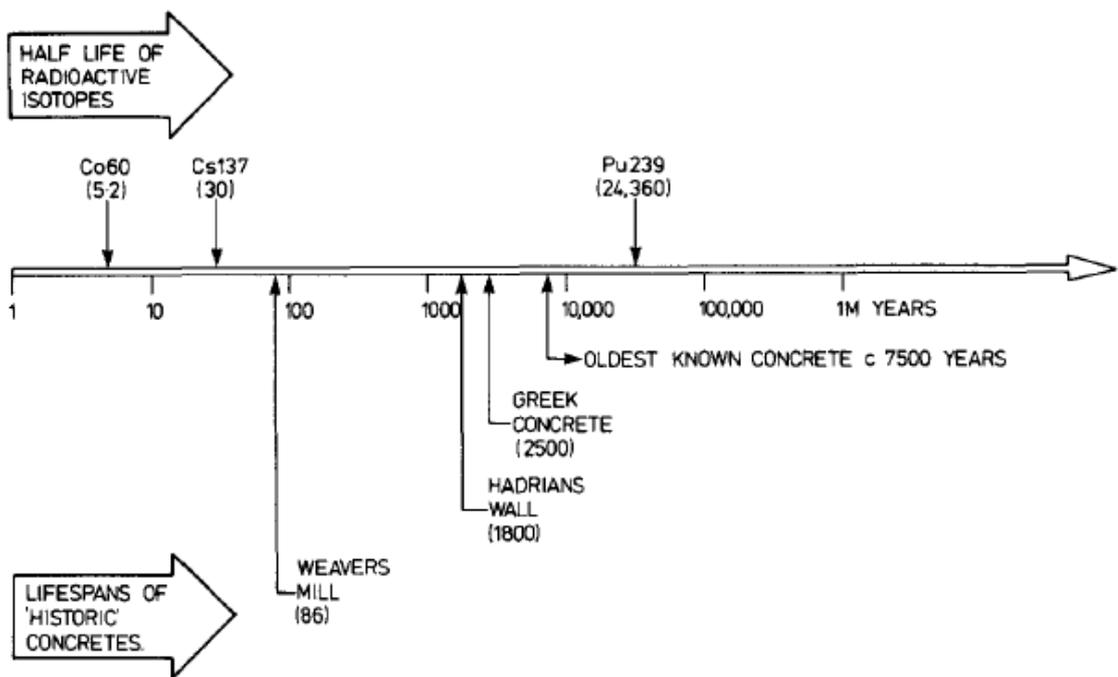


圖 2-9 比較在半衰期放射性同位素和歷史混凝土之間的壽命[22]

## 參、混凝土結構的耐久性設計與指標

### 3-1 結構耐久性的的重要性

在中國大陸「結構可靠度設計統一標準」[23]中對結構可靠性的定義為：結構在規定的時間內，在規定的條件下，完成預定功能的能力。這裏的規定時間，是指結構的設計使用年限，規定條件是指正常設計、正常施工、正常使用和正常維護；而預定功能則指結構的安全性、適用性和耐久性。所謂結構的耐久性，是指結構在正常設計、正常施工、正常使用和正常維護條件下，在規定的時間內，由於結構構件性能隨時間的劣化，但乃能滿足預定功能的能力[24]；結構耐久性還可以定義為結構在化學的、生物的或其他不利因素的作用下，在預定的時間內，其材料性能的惡化不致導致結構出現不可接受的失效概率[25]；或指結構在要求的目標使用期內，不需要花費大量資金補強處理而能保證其安全性和適用性的能力[26]。從結構可靠性與耐久性的定義可以看出，結構可靠性主要表徵結構的能力問題，而結構的耐久性則主要反映時間問題。

美國標準局(NIST)在1975年的調查表明，美國全年各種因腐蝕造成的損失為700多億美元。其中，混凝土中鋼筋腐蝕造成的損失約佔40%[27]。在美國州際公路網56萬座橋樑

中，處於嚴重失效的就有9萬座。1969年，一年用于修護因鋼筋腐蝕而損壞公路橋面版的費用高達26億美元；1978年增至63億美元[28]。美國材料諮詢委員會(NMAB)在1987年的報告中指出，有253,000座混凝土橋處于不同程度的損傷狀態，且以每年35,000座的速度增加；1991年用于修護由於耐久性不足而損壞的橋梁就耗資9.10億美元[29]。

英國為解決海洋環境下鋼筋混凝土構築物的腐蝕與防護問題，每年就花費將近20萬英鎊。英國英格蘭島，中部環形線的快速道上有11座混凝土高架橋。建于1972年，建造費為2800萬英鎊，建成兩年後就發現鋼筋腐蝕造成的混凝土順筋裂縫現象。1974~1989年的15年間，其修補費用已高達4500萬英鎊，為初始造價的1.6倍[27]。英國每年用于修復鋼筋混凝土結構的費用達200億英鎊。

日本目前每年僅用于房屋結構維修的費用即達400億日元，大約有21.4%的鋼筋混凝土結構損壞是因鋼筋腐蝕引起的。引以自豪的新幹線使用不到10年，就出現大面積混凝土開裂、剝蝕現象[30]，可見腐蝕的威力及嚴重性。

前蘇聯有關資料表明[31]，僅工業廠房受鋼筋腐蝕損壞的金額就占其固定資產的16%，有些廠房使用10年左右即嚴重破壞，經常需要維修，有些建築維修費用已超過其原

始造價。1980年，僅使用了23年的德國柏林會議大廈由于鋼筋鏽蝕造成其西南角塌陷[32]，引起國內外學者的關注，由此可見耐久性設計的重要性。

台灣地區混凝土自西元 1970 年代起，開始步入預拌混凝土時期，當時美國西元 1968 年版的配比規範隨建築技術規則之訂立，深植土木建築營建工程人員內心，多年來這種傳統保守的觀念一直不變的被重覆使用，「強度」等於「耐久性」的舊觀念盤根錯節蒂固心中，使得「水灰比」一語風行不已。但隨著美國在西元 1995 年開始懷疑強度是否等於耐久性後，混凝土的思維已改變。當然談到耐久性，非得追溯二千三百多年前碩果僅存的龐貝古城的混凝土構造物。古代建築能歷久彌堅，考其主因，係由於混凝土中含有飛灰等卜作嵐材料物質，加上石灰而產生反應，這種「石灰與火山灰」儼然就像混凝土不老基因，可以有效防衛混凝土受到外界環境的侵襲。然而 19 世紀在人類開始科學化使用卜作嵐之混凝土後，飛灰的使用反而被模糊化，甚至誤用。西元 1999 年 5 月於英國雪非爾大學召開「下一千年混凝土研討會」上，各國學者極力肯定混凝土乃為未來主要工程建設材料時，許多混凝土研究者又不禁要求注意混凝土耐久性問題，甚至宣稱未來混凝土設計不是僅僅要求

「28 天強度  $f'_c$ 」而已，相應重點為水灰比(W/C)因素，必須同時要求結構物的壽命（使用年限），這時用水量及水泥量和水膠比(W/B)變成另一種要因。這是因為，近百年來混凝土只重視強度，而忽略長期耐久性的問題，造成壽命不足，結構物提早老年化及劣化的困擾。

回顧美國在西元 1995 年開始，將傳統混凝土結構物的觀念由水灰比（W/C）之準強度觀念，改變為水膠比（W/B 或 W/C+P）的耐久性觀念。容許在混凝土中添加大量飛灰等卜作嵐材料，其精神主要是想探求結構物整體之耐久性，以符合一般認知的五十年壽命（民法篇要求）。所以邁入千禧年（西元 2000 年）後，混凝土科學家開始省思，何以過去百年之混凝土結構物不如預期的耐久？如將過去混凝土進展的軌跡抽絲剝繭，歸納分析，可以發現過去之「人定勝天」的迷思及應該「順應自然」之正道觀念。再回頭看看大中華地區，一向耐久性都被忽略，尤其結構設計時根本被設計單位、營造集團、顧問公司及建築師們所漠視，所以即使海域環境有鹽害的侵蝕作用，乃一昧採用設計強度（抗壓強度  $f'_c=3000\sim 4000\text{psi}$ ）。而完全忽略新混凝土規範規定，海域環境鋼筋混凝土有腐蝕考量時，W/C+P（水膠比）小於 0.4 和同時其混凝土的抗壓強度  $f'_c$  必須大於

5000psi 之要求，以致問題叢生。甚至認為耐久性只要採用 II 型水泥、提高水泥用量及提高強度即可達到，而對於強塑劑及卜作嵐材料的使用深具排斥感，曲解認為使用在混凝土中將會破壞混凝土品質。所以工程建築物實際使用上，在短短十數年即顯露疲態、鋼筋生鏽、表皮龜裂、剝落等等。如此的傳統規範如果未加以更新改良，則若再次採用，十數年後其後果預期將如出一轍，即「提早夭壽」。此方面之論述早在西元 1988 年即已提出，故針對過去問題，透過 PDCA 的手段，謀求對策乃明智之舉。從西元 1990 年來，學術界的努力研究，台灣直至西元 1998 年及西元 2001 年公共工程委員會開始著手「公共工程使用飛灰要點」及「高爐石粉使用要點」後，才漸露耐久性正確的觀點。西元 1998 年中國土木水利學會混凝土工程委員會，將耐久性觀念植入「混凝土工程施工規範及解說」中。西元 2000 年交通部也將 11 年來未曾修訂的規範，列入耐久性設計的內涵；2007 年，「中興工程顧問社」委託「中國土木水利工程學會混凝土工程委員會」，編訂「卜作嵐混凝土使用手冊」，重新燃起國內工程技術對耐久性設計的重視，「耐久性」其實才是混凝土最重要的指標，這是無庸置疑的[33]。

### 3-2 混凝土與環境的互動

#### 一、台灣的海域環境下鋼筋腐蝕

在台灣談混凝土耐久性，須由台灣的地理環境來討論。台灣地處中低緯度，為太平洋及亞洲大陸間之一大島嶼，屬於亞熱帶季風氣候。島內山地約佔 64%，而縱貫台灣中部偏東之中央山脈與冬季及夏季之盛行風斜交。冬季時受大陸的高氣壓影響，屬於東北季風型天氣，而春夏期間有連綿陰雨之梅雨季節，夏季則受西南季風及亞熱帶高氣壓迴流之影響，屬於濕熱多雨型之天候。夏秋兩季並常遭受到颱風之侵襲。這種海洋性氣候很容易造成鋼筋混凝土發生鋼筋腐蝕的劣化現象。

針對台灣地區的特色，可將台灣區氣候劃分為七個地區，如圖 3-1 所示。各地區之地理氣候特徵如表 3-1 所示。在這種環境下，沿海結構物受到鹽份的侵蝕也相當大，見圖 3-2 所示，台灣靠西部地區的鹽份是不容忽視的，不同區域之相關腐蝕速率按照 ISO 腐蝕分類，如表 3-2 所示。其特徵如下：

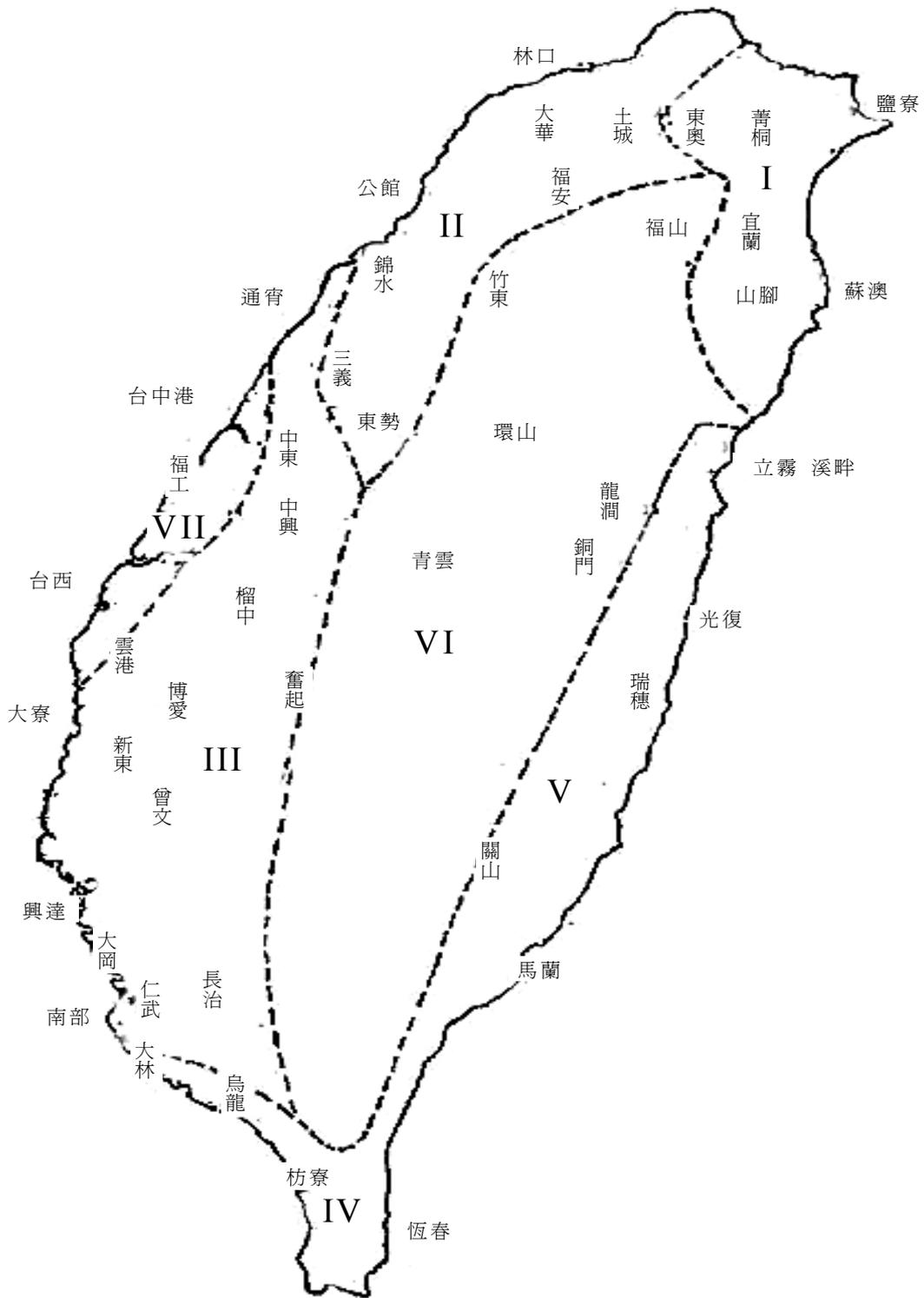


圖 3-1 台灣地區氣候分區位置圖[4]

表 3-1 台灣地區氣候分區特徵[4]

區 名	位 置 及 特 徵
第一區 東北區	位於本省東北角，包括台北縣及宜蘭縣之一部分。面海背山，受東北季風影響，終年多雨，尤其以九至十一月最多，冬季無乾旱。特徵為濕度大、雨量多、日照少。
第二區 北部區	包括台北縣之西北部與桃園、新竹、苗栗等縣之大部分及台中縣一部分山地。丘陵多、平原少、氣候特徵為東北區與西南區之過渡性質，面臨大陸之冷氣團南下之衝，冬季氣溫較低；新竹、桃園沿海冬季季風強。
第三區 西南區	包括西南部大安溪以南之所有平原及東側之丘陵地帶，氣候特徵為年雨量少，雨水集中夏季，冬季乾燥。本區地形平坦，日照充足。
第四區 南部區	本區在本島最南端之恆春半島，氣溫較高，90%之雨量集中於夏季冬季乾旱持續性大，多風，稱為「過山風」。
第五區 東岸區	本區在中央山岳東側之狹長地帶，地勢陡削，北段花蓮氣候與東北區相似，南段(台東)氣候近似於南部。日照時數較同緯度之西部平原為少。
第六區 中部區	本區包括全部中央山地，海拔高度多在 1,000 公尺以上，雨量較四周平地多，氣溫較平地低。
第七區 西岸區	本區於西部海岸之中間部分，由台中縣大甲至嘉義縣市、東路，亦即在大安溪口與北港溪口之間。地勢平坦，為本島雨量最少之地區，冬季風大，乾旱，農作物常受風沙及鹽霧之危害。

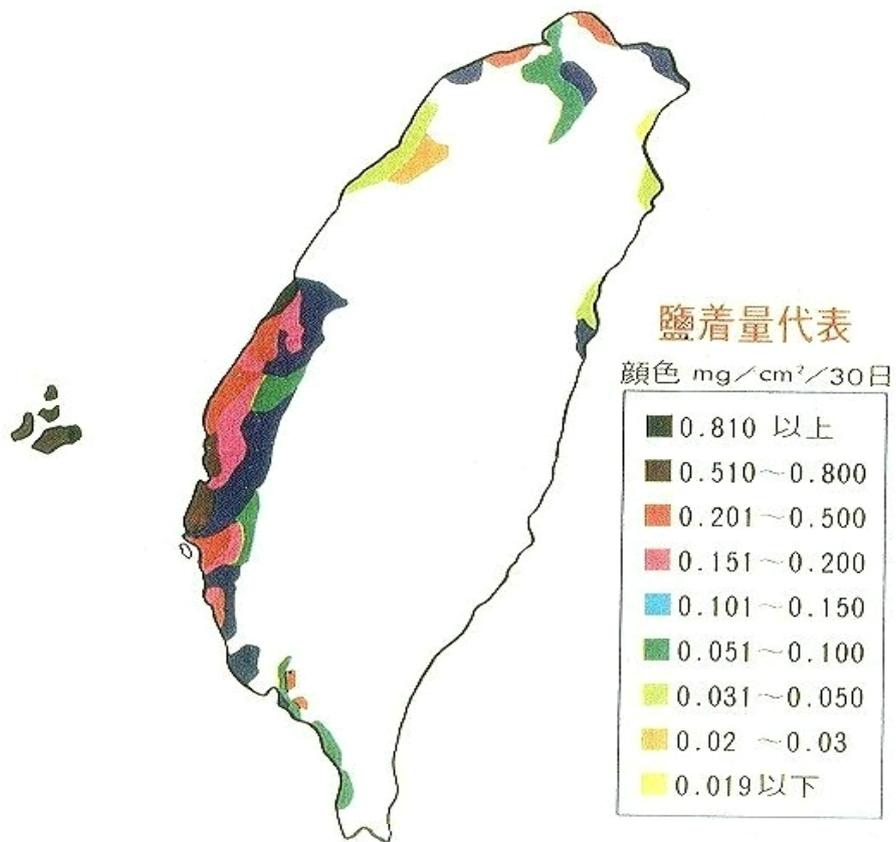


圖 3-2 台灣各地區之鹽份附著量最高值分佈圖[4]

表 3-2 台灣省各地區環境與 ISO 腐蝕分類之對照表[4]

區 域	ISO 分類	環境區分	備 註
基隆	C4~C5	都市、海洋	離海岸 10 公里內為 C5
北宜	C4~C5	都市、海洋	離海岸 10 公里內為 C5
台北、桃園、新竹	C3~C4	都市、鄉村	
新竹、苗栗、台中	C5	海洋	
彰化、雲林、嘉義、南投、花蓮	C3	鄉村、都市	
台南、高雄	C3	鄉村、都市	台南、高雄環境為 C4
屏東、台東	C3	鄉村	林邊為 C5

國際標準組織（ISO）以各種金屬於開始使用後第一年，測得的腐蝕速率（ $\mu\text{ m/yr}$ ），按不同的五個腐蝕速率範圍區分作 C1 至 C5 五個腐蝕環境等級。其中 C1 為輕微腐蝕環境，C2 為低度腐蝕環境，C3 為中度腐蝕環境，C4 為高度腐蝕環境，C5 為嚴重腐蝕環境。而 C5+ 為惡劣腐蝕環境，表示其腐蝕速率超過 C5 環境的上限值。

#### （一）惡劣腐蝕環境（C5+）

一般而言 C5+ 腐蝕環境多座落於重鹽害、強酸雨、或硫磺區內。例如花蓮、陽明山、佳洛水、及林口等地。

#### （二）嚴重腐蝕環境（C5）

重鹽害及酸雨：都市環境、海洋環境、工業環境，例如基隆距海十公里範圍內，屬都市和海洋環境。另外小港、興達、高雄等對某些金屬而言都已達到 C5 的腐蝕環境等級。

#### （三）高度腐蝕環境（C4）

一般而言 C4 腐蝕環境區大都座落於輕度鹽害及酸雨地區，屬於都市環境、海洋環境或工業環境。例如：基隆、台北、宜蘭等的市郊地區是屬於鄉村及海洋的環境。

#### （四）中度腐蝕環境（C3）

一般而言 C3 腐蝕環境區大都座落於本省的鄉村地

帶，例如：斗南、新竹等地區對某些金屬而言都已達到 C3 的腐蝕環境等級。

#### （五）低度腐蝕環境（C2）

本省屬於 C2 腐蝕環境區的地方不多，只有少數偏遠的山區才可能具有如此的低度腐蝕環境。嘉義縣奮起湖就是屬這種低度腐蝕環境。本省大部份的山區都是屬於這種環境。

#### （六）輕微腐蝕環境（C1）

這種環境大都是屬於非常乾燥的地區，各種金屬在這地方的腐蝕速率都很低。例如沙漠地方就是屬於輕微腐蝕環境，台灣並沒有這種腐蝕環境。

## 二、工商業快速發展下的環境劣化

台灣屬於高度工業化地區，由於工業排放污染物加上汽車所排放之氣體，造成台灣地區空氣污染物、一氧化碳、二氧化硫、臭氧、二氧化氮的濃度相當高，見圖 3-3，又在高濕度及高降雨環境下，見圖 3-4，以致台灣地區雨水酸鹼度相當偏酸，見圖 3-5，此對台灣地區混凝土之設計會有酸蝕的問題產生，以致表面易產生粉化問題，在設計上必須特別注意。

1993-2002年 諸空氣污染物月平均濃度值比較圖

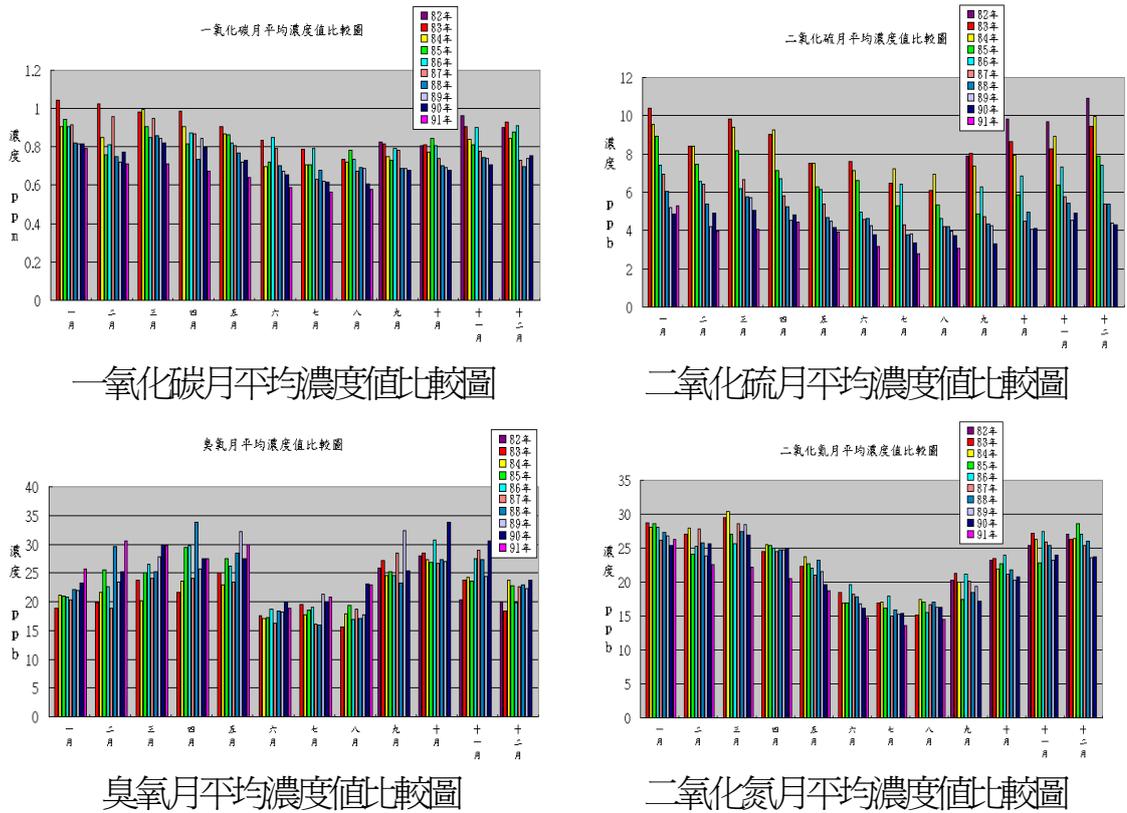


圖 3-3 台灣地區空氣污染物概況[4]

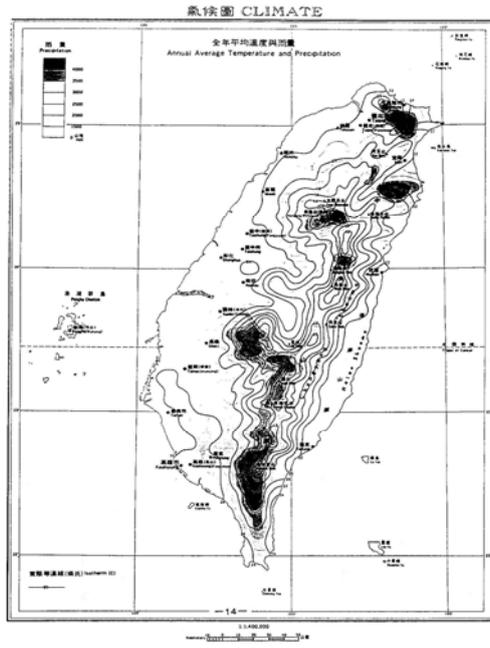


圖 3-4 台灣平均降雨量及平均氣溫分佈[4]

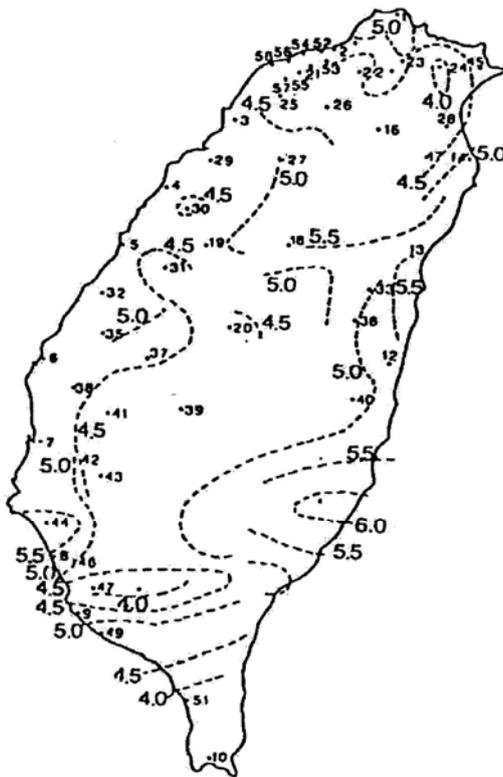


圖 3-5 台灣地區雨水酸鹼度 (pH 值) [4]

### 3-3 混凝土耐久性的主要源頭—水

討論混凝土劣化問題，須探討任何一種組成材料的影響，因為任一材料的性質及材料相互間的變化，對耐久性都有某種程度的影響性，尤其這些材料的特性在界面都相當不同，此即一般所謂的「相容性」及「互制性」。

鋼筋混凝土組成材料包括骨材 (A)，水泥漿 (C+P+W) 及鋼筋 (R)，其組成成分比率及相互間影響性，都會造成「化學」及「物理」的反應[4]，而相應產生耐久性的種類可區分為：

- 1.物理耐久性：(1)抗凍融性；(2)抗乾濕作用；(3)抗溫度變化；和(4)抗磨耗性。
- 2.化學耐久性：(1)鹼骨材反應；(2)抗硫酸鹽侵蝕；(3)抗酸鹼性；(4)金屬腐蝕；和(5)溶解及析晶。

圖 3-6、圖 3-7 及表 3-3 分別顯示混凝土劣化之物理化學及因應基因示意圖及歸納表。由這些歸納之資訊可看出耐久性應注意之內容，其中明顯指出「水泥漿」基因為耐久性問題的核心，尤其「水」的角色更是重要，因為水為混凝土施工難易度的重要因子，水也是水泥水化重要的介質，然而「水」又是造成有害物滲透之媒介，所以水進出

混凝土的特性，對混凝土耐久性有相當不利之影響。因此水泥水化產生微觀結構變化，及骨材的特性，其在整體混凝土中所淵生的影響，均是耐久性必須考量的重點。

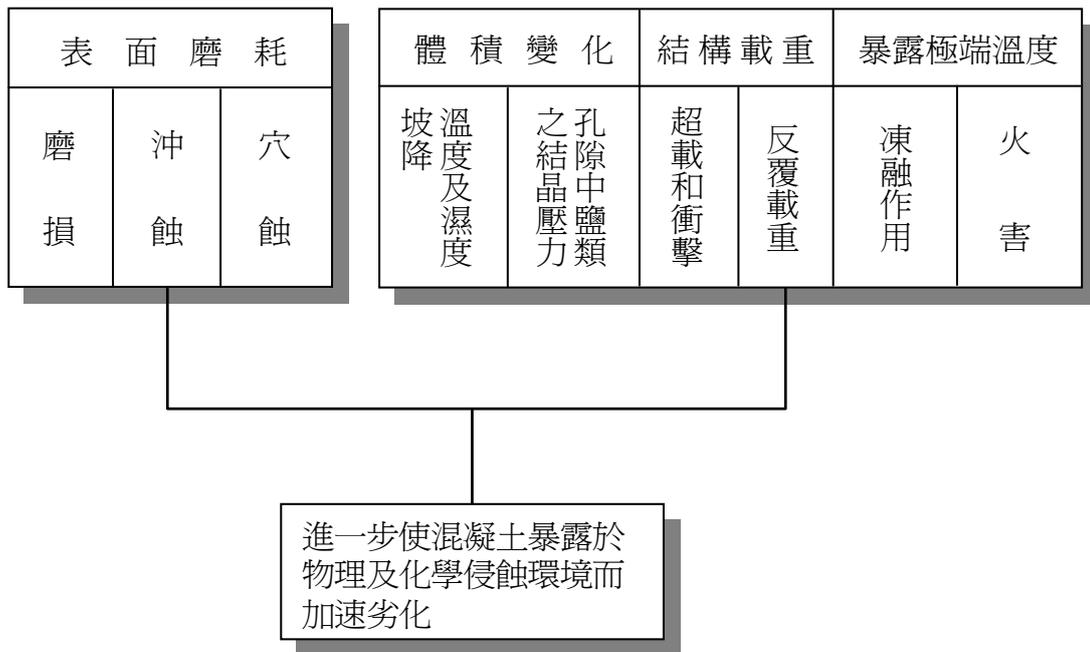


圖 3-6 混凝土劣化之物理基因示意圖 [4]

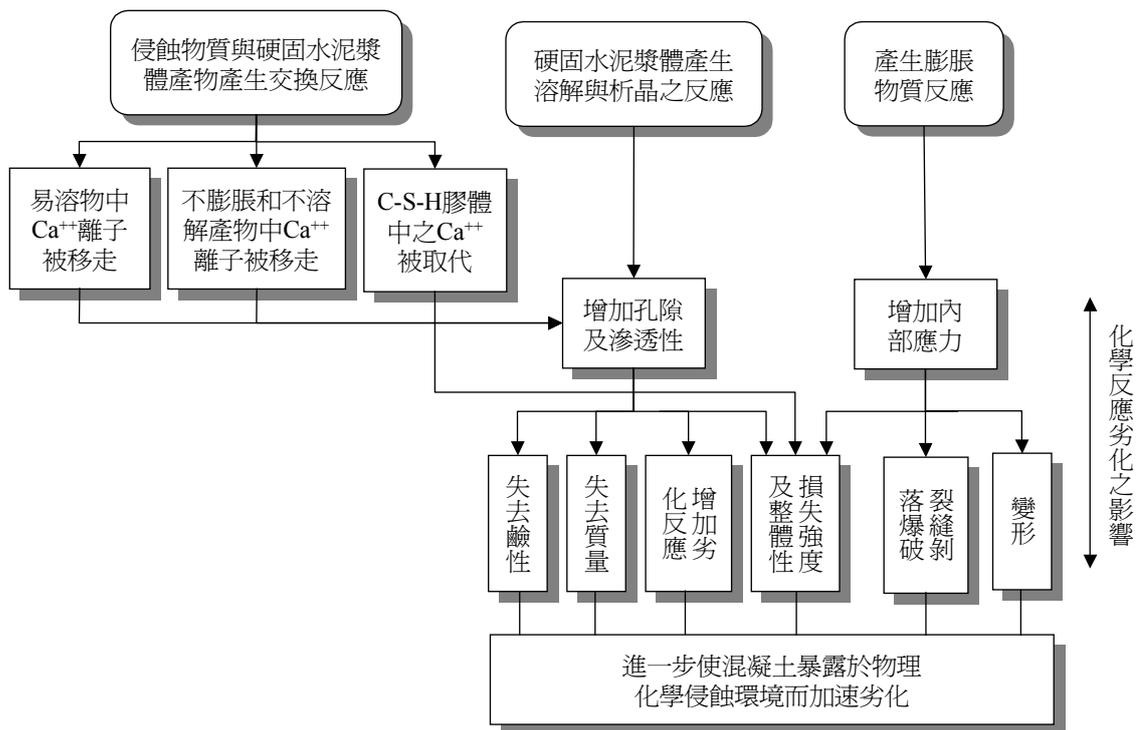


圖 3-7 混凝土劣化之化學基因示意圖 [4]

由以上的詮釋，可以理解混凝土不管物理及化學耐久性的主要基因，都與「水」及「水量」有關係，其次與「水泥的質與量」有關係，更重要的是與「混凝土材料組合之滲透性」有關。混凝土中的水是用來促進水泥水化的主要物質，如果沒有水，水泥水化反應就無法進行，當然強度成長就會有困難。水量直接關係到工作性，然而水量過多，又會有泌水析離的問題產生，對耐久性有害。所以，拌和用水量對混凝土的影響性，牽涉之愛恨情仇是值得探討的。

傳統 ACI 及國外混凝土配比設計方法，即是以「工作性」的大小，決定「用水量」的多寡，通常也就是拌和水

量愈高，則坍度愈大。其次即依據「強度及耐久性」決定最高水灰比 (W/C) (ACI 318-89)；雖然 (ACI 318-95) 開始考量添加卜作嵐材料，以水膠比 (W/B) 來設計。但因配比以「工作性決定用水量」的邏輯下，水量與漿量可能偏高，而衍生耐久性問題。按照 Powers 的理念，W/C 或 W/B 愈高，用水量愈多，則混凝土總孔隙愈多且孔隙直徑愈大，這樣對混凝土的耐久性有很大的負面影響。所以耐久性設計上是混凝土所含水量愈低體積穩定性愈好，而對水泥而言則必須有充裕的水量，令水泥能完全水化，而且要有多餘的水量來供應「卜作嵐與石灰」(不老基因)之卜作嵐反應作用。在滿足以上兩項條件的唯一解就是儘量降低水泥用量，規範配比設計上可以來制訂如下條件：

1. 拌和水量  $\leq 150 \text{ kg/m}^3$ ，不管坍度高或低。
2. 水灰比(W/C)  $\geq 0.42$ ，防制水化不完全及空間限制而產生自生收縮裂縫。
3. 水膠比(W/B)  $\leq 0.4$ ，以保障膠體之品質。

表 3-3 混凝土物理與化學性劣化種類、基因、控制變數及劣化機理 (黃兆龍研究室整理) [4]

劣化種類			劣化機理	劣化機理說明	材料基因*		需要控制變數+ (+愈多愈重要)													
					P	A	R	W/C	W/B	W/S	W	C	fa'	Vp	p	sp	a/c	air		
物理性劣化	表面磨耗	磨損、沖蝕、穴蝕	剪應力 > 剪力強度。反覆車載(磨損); 水的磨損(沖蝕)激流作用(穴蝕)。	表面抗剪力不足, 造成表面被剪破壞。	√	√		+	+	+	+			+						
		體積變化	溫濕度坡降	水份喪失: 毛細管張力、表面能量改變。	乾燥時表面收縮, 造成表面裂縫; 潮濕時表面膨脹, 造成內部裂縫。	√			+	+	+	+	+		+	+	+			
	裂	結構重載	鹽結晶壓力	鹽結晶而當混凝土乾縮時產生楔作用	孔隙中鹽類結晶產生晶壓。	√			+	+	+	+			+					
			超載重和衝擊	混凝土受拉緣應力超過破裂模數	設計不良或偷工減料, 損及強度; 或車輛超重, 另外路面不平整及接頭高程差過大。				+	+	+									
	縫	暴露極端溫度	反覆載重	載重下, 微裂縫在反覆載重下因應力集中而擴大蔓延	在特定載重下反覆之次數過多, 因而疲勞破裂。				+	+	+									
			凍融作用	支配膨脹的因素: 1. 水力定律(Power); 2. 冰分離(Power); 3. 中孔卻水(Litvan); 4. 滲透性。	水結冰體積膨脹 9%, 造成冰鏡或壓力, 使混凝土分離。	√	√		+	+	+	+								
化學性劣化	溶解和析晶	火害	骨材與水泥漿體異膨脹係數及水泥漿遇熱乾縮作用; 水泥漿體水化物的溫分解作用。	劇烈溫度上升產生內外溫差, 而使水分無法順利排出, 造成崩解作用。	√	√		+	+	+	+			+	+					
		火害	骨材與水泥漿體異膨脹係數及水泥漿遇熱乾縮作用; 水泥漿體水化物的溫分解作用。	劇烈溫度上升產生內外溫差, 而使水分無法順利排出, 造成崩解作用。	√	√		+	+	+	+			+	+					
	硫酸鹽侵蝕	氫氧化鈣被溶解而造成孔隙; 氫氧化鈣被溶解而與其它有害物質結合。	水份滲入混凝土, 溶解氫氧化鈣, 而於滲透面露出; 乾濕作用而將溶解物析出結構外。	√			+	+	+	+	+			+	+					
	鹼骨材反應	四大步驟: 1. $SO_4^{2-}(t) \rightarrow$ 滲透 $SO_4^{2-}$ (水泥) 2. $Ca(OH)_2 \rightarrow$ 溶解 $Ca^{2+} + 2OH^-$ ; 3. $SO_4^{2-} + Ca^{2+} + 2H_2O$ 析晶 $\rightarrow C\bar{S}H_2$ ; 4. $C_3A \cdot C\bar{S} \cdot H_{12} + 2C\bar{S}H_2 + 16H \rightarrow C_3A \cdot 32H$ 。	單硫型鋁酸鈣水化物與硫酸鈣鹽類作用, 而生成鈣鈦石造成體積膨脹作用, 致分離混凝土。	√			+	+	+		+			+	+					
	酸和鹼作用	1. 鹼分解並溶解活性矽或碳酸鹽之骨材; 2. 形成含水矽酸鹼玻璃 $S + N/K/H \rightarrow N/K-S-H$ ; 碳酸與氫氧化鈣結晶; 3. 玻璃吸水形成溶膠滯留侵蝕周圍。	骨材之活性矽酸鹽與水泥中之鹼(鉀或鈉)作用產生圓狀裂縫, 滲出膠體, 一般呈現爆開或剝落現象。		√			+	+	+	+			+	+				+	
鋼筋腐蝕	1. $Ca(OH)_2 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + 2H_2O$ ; 2. $C_3S_2H_3 + 6H_3H_2O \rightarrow 3Ca^{2+} + 2SHn + 6H^+$ 。	1. 陽極反應: $Fe \rightarrow Fe^{2+}(aq) + 2e^-$ ; 2. 陰極反應 $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ ; 3. 沉澱作用: $Fe^{2+} + (aq) + 2(OH^-) \rightarrow Fe(OH)_2$ ; 4. 氧化生鏽: $4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$	鹼對混凝土的影響甚小, 然而酸性會因 $H^+$ 離子而加速氫氧化鈣之溶解, 甚至使 C-S-H 受侵蝕而產生矽膠。	√			+	+	+	+			+	+					+	
							√	+	+	+	+			+	+					+

\*P,A,R: 分別指水泥漿體, 骨材及鋼筋; W/C: 水灰比, W: 用水量, C: 水泥量, fa': 骨材強度, Vp: 水泥漿量, p: 卜作嵐材料, SP: 強塑劑, a/c: 骨材 / 水泥比; air: 空氣含量; 和++混用水泥化學簡寫符號: C-CaO, S-SO<sub>2</sub>, H-H<sub>2</sub>O, A-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S-SiO<sub>2</sub>。

雖然耐久性與水有密切關係的觀念被認同，然而在混凝土配比設計的時候，並沒有把「用水量」當作耐久性主要考慮因素，而只是當作工作性之考量。再者只重視水泥漿「質」(指 W/C 和 W/B)，而未考慮水泥漿「量」的重要性。若依據 ACI 318 只以降低 W/C 或 W/B 為主要考慮耐久性方式，間接用強度來決定混凝土耐久性的好與壞，忽略水泥漿與骨材間互制關係和混凝土體積穩定性問題，這對整體品質是不利的。

美國混凝土學會新版 ACI 318-95 的「結構混凝土規範」是有考慮到以 W/B 設計，容許適量採用「卜作嵐材料」。然而規範中可看出 ACI 318 新版的規範雖然容許飛灰、爐石及其他天然卜作嵐材料的使用，可是使用這些材料觀念的改變，如果沒有相對控制「水泥量」及「水量」，則依加州博克萊大學 Mehta 教授的看法，乃無法保障結構物的耐久性，因為「體積穩定性」的問題乃然存在。

因此用水量和 W/C (水灰比)、W/B (水膠比) 及 W/S (水固比) 的相關性，和對混凝土的影響程度相當大，可歸納如下：

#### 一、拌和水的特徵及規範

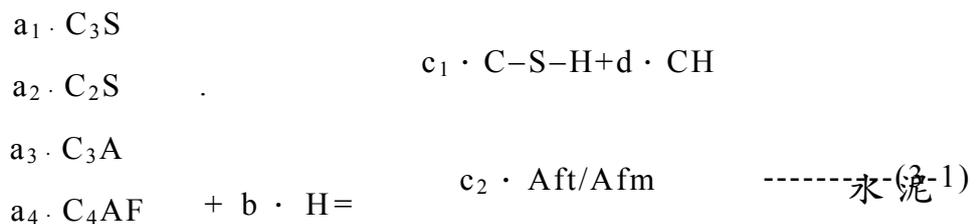
拌和水是水化最主要的物質，可是拌和水本身是一個雙極性的物質，水的分子大小約為  $2.54 \times 10^{-10} \text{m}$  (0.254nm)，所以幾乎可以滲入任何孔洞，如果沒有注意到水的移動特性，混凝土表面就容易產生滲水或白華。而卜特蘭水泥學會 (PCA) 之「配比設計及控制」一書中，

指出「用水量太多的話，會產生抗壓及抗彎強度不足，水泥漿與骨材界面上產生弱帶，造成水密性與耐久性不佳，以及其他淵生的弊病」。

換言之，如前述「混凝土中水量愈多，愈有害處」，但是，拌和水量就施工者的觀點並非如此，因為較多的水量可增進工作性，這正是在施工場合工人加水而無法阻止的主要原因之一。所以考慮混凝土耐久性係應以添加「強塑劑」來達成降低水量又達成高工作性的目標。添加卜作嵐材料同時以強塑劑來改變混凝土工程性能是耐久性配比設計必須之途徑。

## 二、混凝土中水與水泥的水化

混凝土中骨材佔有全部體積的 60~75%，其餘 25~40% 體積為水泥及水所佔據。水的體積在水泥漿中所佔比例甚大（約佔 50%），而在混凝土中約佔 14~21% 的體積。水與水泥的水化基本反應可簡化式 3-1



加上水以

後，水化形成為膠體或晶體及氫氧化鈣。混凝土中用水量愈多，氫氧化鈣（CH）愈容易產生，見式(3-1)。對易溶於水的 CH，當然也愈容易匯集在混凝土中骨材之底邊及附近。以 C<sub>3</sub>S 為例，充分水化所需的水不須太高，W/C=W/S

只要 0.24 加上空間限制的膠孔水 0.18，共 0.42 就足夠了，而在混凝土中如果是高流動化混凝土，為使骨材不產生沉降則水泥漿與骨材比重需相當，所需的 W/C 應是 0.096 以下，見圖 3-8 所示。但一般強度混凝土 W/C 大於 0.4，所以骨材必然沈澱，水量上昇形成泌水之水泥沫，此為不變的事實。但如水量過少，則水化無法完全進行，這對強度影響而言是可以理解的，另一方面亦會影響施工性，產生蜂窩及孔洞問題，將對結構安全性產生致命的傷害，所以適量有效調配這些材料，使它不會有蜂窩及孔洞亦是非常重要重要的工作。

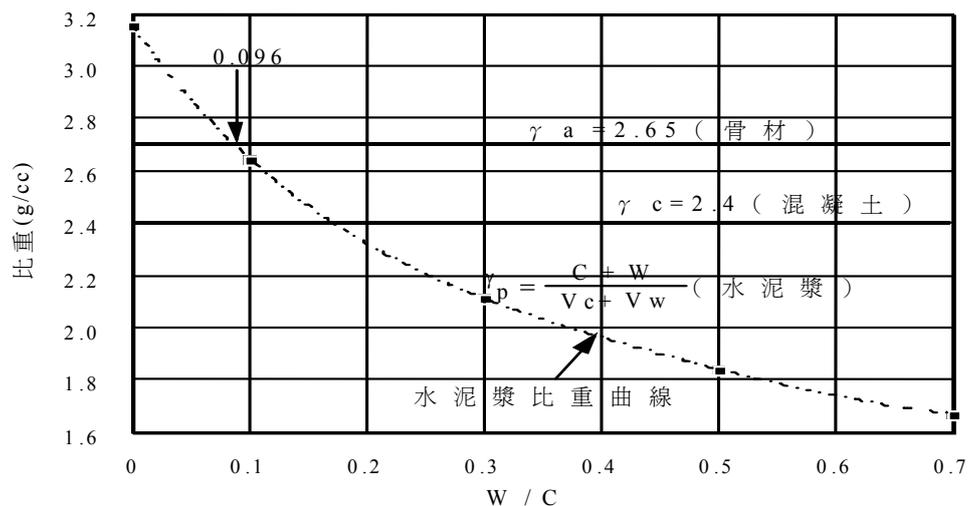


圖 3-8 水泥漿 W/C 與混凝土材料比重之關係[4]

### 三、混凝土中水量與工作性

混凝土用水量與工作性是直接而密切的，用水量愈多，工作性愈好，這是傳統配比流程的第一步驟。如要有很高的工作性，一般會增加水量，然而水的比重最輕，其所調出的水泥漿亦較一般常重骨材為輕，水加太多，只要相對之 W/C 大於 0.096，自然骨材會有沉澱傾向，而生泌

水或析離，因此水又對均勻性有不利的影響。傳統混凝土常採用高水量的設計（ $W_w > 170\text{kg/m}^3$ ），易造成泌水及骨材沈澱析離，滋生嚴重表面裂縫及粉化泥沫，不得不慎。而緻密混凝土配比技術即是透過強塑劑與卜作嵐材料的使用，添加品質優良的強塑劑以大量降低混凝土中水量，達到良好工作性，又不會有沉澱析離問題，此乃混凝土耐久性設計必須考慮的重點。

#### 四、水量與孔隙量

混凝土中所含的水量，如果不去考慮工作性，而單純就材料而言，水的用量愈高，則混凝土所含的孔隙量必然愈高。由 Powers「水泥漿體總孔隙」的公式可以改寫成「混凝土總孔隙」公式(3-2)：

$$P_c = W_w - k_1 \alpha - k_2 \beta \text{-----} (3-2)$$

式中  $P_c$ ：混凝土中之孔隙量；

$W_w$ ：混凝土中之水量；

$k_1, k_2$ ：分別為水泥及卜作嵐材料所填塞之孔隙；和

$\alpha, \beta$ ：分別為水泥水化及卜作嵐反應之程度。

由公式(3-2)可看出用水量愈多，則孔隙量  $P_c$  相應也愈大。水量用的愈多，孔隙當然會增加，不僅強度減弱，而且造成孔隙的連通性，對整體品質是不利的。此處必須說明混凝土總孔隙指的是「巨觀孔隙」(Macro-porosity)，而 Powers 的「水泥漿孔隙」乃是「微觀孔隙」(Micro-porosity)。對混凝土設計而言，巨觀及微觀孔隙都必須加以重視，才能達到耐久性的目的。

## 五、水量與泌水及析離

混凝土中水量與骨材的比重是截然不同的，依據水泥漿的比重分析，見圖 3-8，如果骨材比重假設為 2.65，則水泥漿之的比重在 W/C 等於 0.096 下才會與骨材比重相等。換言之，以目前任何強度的混凝土其 W/C(水灰比)都遠大於 0.096，所以由混凝土本質而言，尤其「高流動化混凝土」SCC，骨材都會沉澱至底部，而水及水泥漿基本上都有上浮的傾向，見圖 3-9。部份的泌水會累積在骨材下方將造成骨材與水泥漿的弱界面，見圖 3-10，如此會影響混凝土的均勻性。所以唯一讓水不會泌的原則為減水，而讓骨材不沈澱的唯一方法係骨材下方均為骨材，換言之，即緻密骨材系統才能防止骨材沈澱。當然西元 2002 年芝加哥 SCC 會議提到過去日本常用的增黏劑，或黏度改良劑 (VMA)，來改善沉澱的問題，但這是不正確的作法，因為無論如何沉澱必然發生，除非減水一途了。

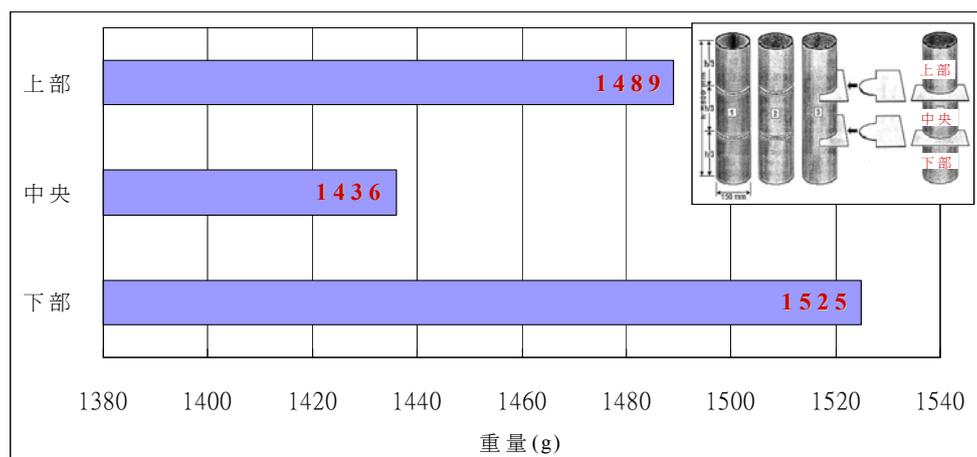


圖 3-9 SCC 中骨材沉澱的問題[4]

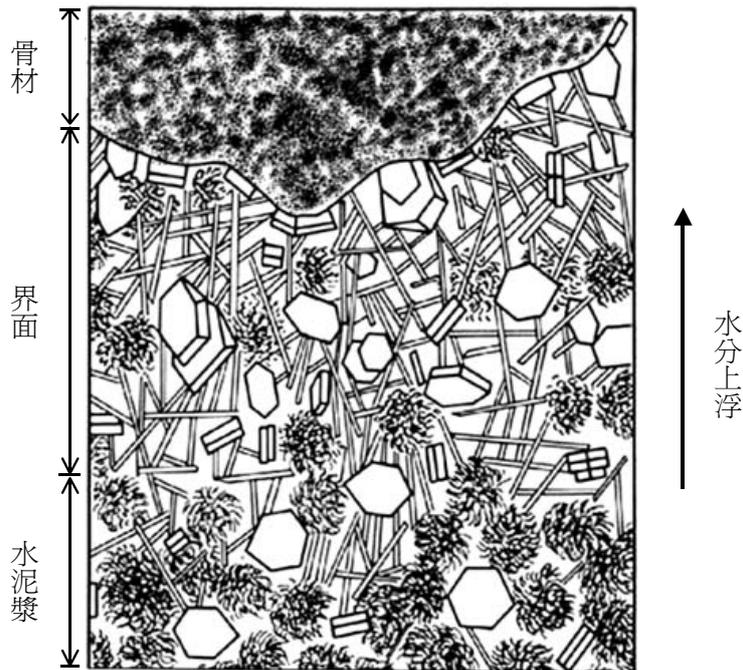


圖 3-10 混凝土骨材與水泥漿之弱界面[4]

#### 六、水在混凝土中的流動

有害物質進入混凝土中，及混凝土中之物質滲出或流動，都與水流動的難易程度有關。水在混凝土中流動的理論係依「達西定理」，滲流量與水壓力，即與一般所稱的水頭（ $h$ ）成正比關係，滲流的大小即為滲透係數（ $K_p$ ），滲透係數（ $K_p$ ）與孔隙（ $P_c$ ）的多寡及孔隙直徑的大小有密切關係，孔隙量愈多，孔徑愈大，均會增大滲透係數，由 Power 毛細孔修正公式(3-3)可推論與用水量（ $W_w$ ），水化程度（ $\alpha$ ）及卜作嵐反應程度（ $\beta$ ）有密切關係，依此「達西定理」之滲流量可簡化如下：

$$Q=K_p \cdot h=f(W_w, \alpha\beta)h\text{-----}(3-3)$$

水灰比（ $W/C$ ）與滲透係數的關係有甚多之研究，證實 Power 之理念對水泥漿而言是正確的。針對不同  $W/C$

及齡期的影響，顯示齡期愈長，則滲透係數幾乎近似「零」，表 3-4 可以清楚看出固定 W/C 之新拌水泥漿到了某一齡期則孔隙幾乎是不相通的。

表 3-4 水泥漿體齡期對滲透係數的影響 (W/C=0.51) [4]

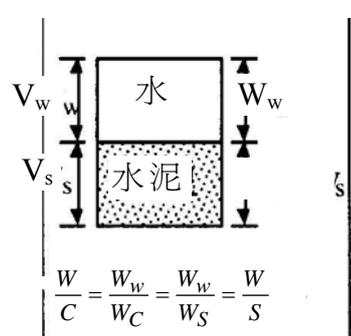
齡期 (天)	滲透係數 $K_p(m/s)$	
新拌水泥漿	$10^{-5}$	與 W/C 無關
1	$10^{-8}$	毛細孔連通
3	$10^{-9}$	
4	$10^{-10}$	
7	$10^{-11}$	
14	$10^{-12}$	
28	$10^{-13}$	
100	$10^{-16}$	毛細孔不連通
240 (最大水化)	$10^{-18}$	
註：水泥漿的 W/C 即為 W/S。W/C = 0.51 之體積比 $V_w/V_s=1.61$		

同理，對於不同 W/C (對混凝土而言為水固比 W/S)，則由於水化關係，造成毛隙孔隙不連通的時間，亦隨 W/S 而不同。W/S 愈低則不連通之時間愈短，表 3-5 顯示不連通之時間。而水灰比對滲透係數的影響可由圖 3-11 看出，然而值得重視的是混凝土滲透係數的縱座標為水泥漿之 100 倍。這點從水量佔有水泥漿及混凝土體積關係來看是不正確的，所以混凝土中連通的孔隙遠大於水泥漿，也暗示骨材與水泥漿之界面存在有泌水或缺陷，所以除了水灰比、水化時間外，界面的影響性是不容忽視，此也暗示傳統混凝土採用 W/C 來設計控制耐久性是不當的。由一般

大壩的滲透係數，見表 3-6，可提醒減少弱界面的產生是增加耐久性的首要工作。緻密混凝土配比設計即透過減水及添加卜作嵐材料填塞空隙與孔隙的策略，改善圖 3-10 水泥／骨材界面，使混凝土幾乎無法透水，因此降低氯離子電滲量至 2000 庫倫以下，增加電阻至 20KΩ-cm 以上。

表 3-5 水泥漿體產生不連續毛細管孔所需之養護時間[4]

W/C=W/S 重量 比	V <sub>w</sub> /V <sub>s</sub> 體積 比	養護時間 (天)
0.40	1.26	3
0.45	1.42	7
0.50	1.57	28
0.60	1.89	180
0.70	2.20	365
> 0.70	> 2.20	不可能



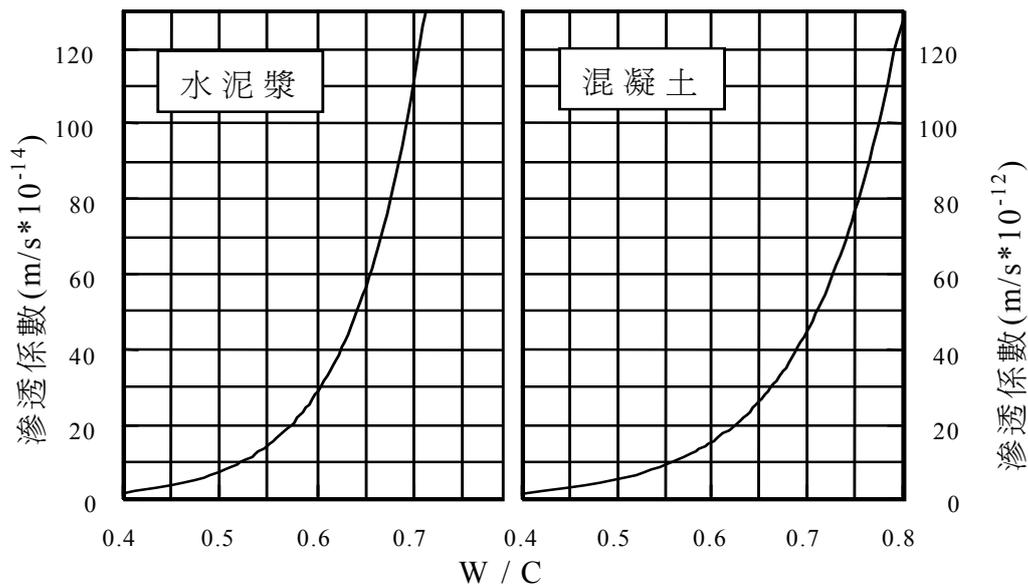


圖 3-11 水灰比對滲透率之影響(1)水泥漿體(2)混凝土[4]

表 3-6 大壩的滲透係數 (Kp) [4]

壩名	滲透係數 Kp=m/s
一般大壩	$8\sim 35\times 10^{-12}$
Hoover	$1.9\times 10^{-12}$
HungryHorse	$6\times 10^{-12}$
FlamingGorge	$35\times 10^{-12}$
Anchor	$142\times 10^{-12}$

### 七、用水量對耐久性之影響

長期耐久性質的評估，當然需借助長期觀測，可是因耐久性觀測時間過長而不可行，也不切實際，引用文獻加以推論，或引用古羅馬碩果僅存的千年建築物來佐證，反而較可行。基本上可以由近代混凝土工程品質歸納混凝土規範是不正確的，因為並沒有考慮到混凝土內部物理化學平衡關係，更重要的並未將古代「不老基因」-石灰加上火山灰的觀念引入，所以龜裂、蜂窩、泌水等百病叢生。而耐久性最主要的物理化學變化基因，都與離子移動有關，因此可以針對離子移動的難易程度來判別耐久性，其中以電阻係數，或氯離子滲透率的檢測，較簡易且可於現場執行。

AASHTO T259 及 ASTM C1202 中亦有明確的規定，見表 3-7 所示，傳統混凝土 (ACI 318-89) 若無添加卜作嵐材料，則電滲電量均會超過 4000 庫倫以上，高性能混凝土採用低水量及添加卜作嵐材料一般均落在 2000 庫倫

以下，此為低氯離子滲透範圍。由圖 3-12 可看出混凝土電阻係數與水泥漿量 (N) 及用水量的關係。水量愈大，非常明顯的其相對應的電阻係數愈低，表示水分子與離子在混凝土中很容易移動。

表 3-7 氯離子電滲電量[4]

電流量 (庫倫)	氯離子滲透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	非常低
<100	可忽略

另由圖 3-13 可觀察到 W/C, W/B, W/S 較低時，明顯隨齡期電阻會增加，且電阻增加率非常快。然而當 W/S 高到 0.108，此點為傳統無卜作嵐材料之配比設計 (ACI 318-89) 範圍，同一工作度不同強度下之數據，基本上若無添加卜作嵐材料，其電阻幾乎是一樣的，即使到 180 天電阻乃低於  $10\text{K}\Omega\text{-cm}$  下，因為用水量有利電子及離子的傳導或擴散，所以電阻愈小，有害離子移動愈易。

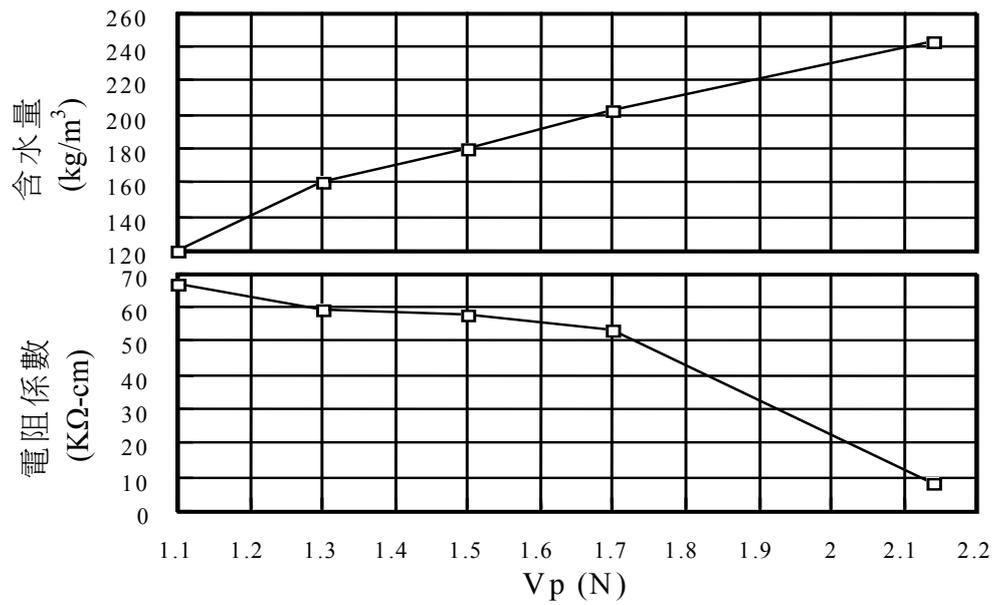


圖 3-12 水泥漿量及拌和水量對電阻係數之影響[4]

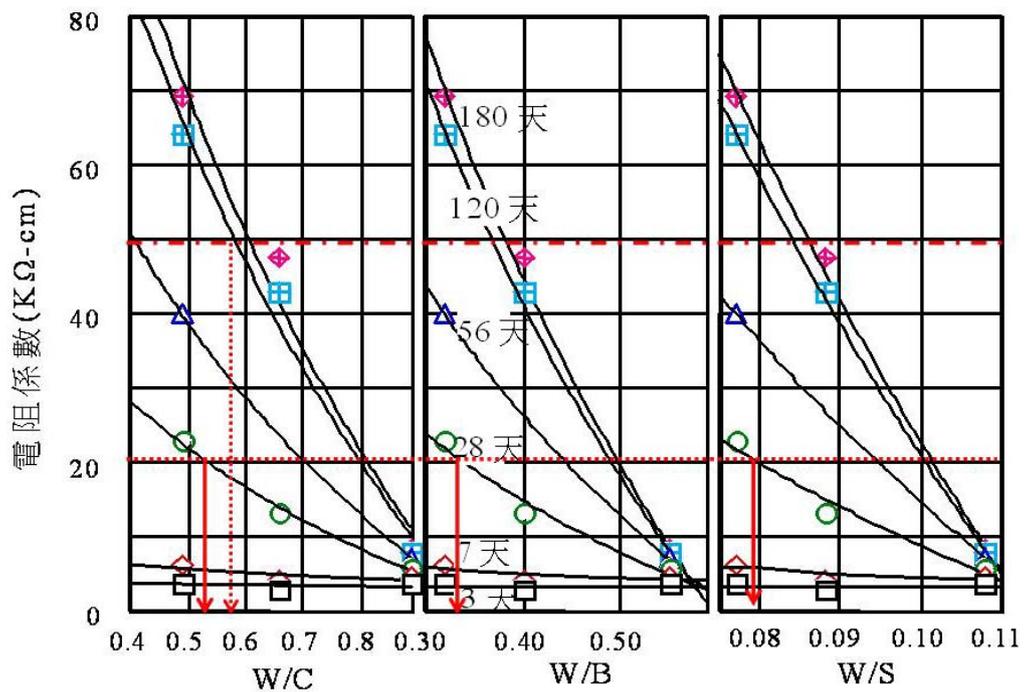


圖 3-13 W/C、W/B 及 W/S 對電阻係數之影響[4]

另由圖 3-14 可看出來傳統配比方法（圖上標示 C 之控制組），因工作度由用水量決定，不管強度如何，同一

工作度下之用水量是一樣的，傳統配比由 W/C 及 W/B 所表現出來的電阻值均呈近似水平線。換言之，傳統配比以 W/C 及 W/B 在同一工作度要求下，無法看出電阻的差異性，如果以 W/S 表示，則很明顯看出沒有添加卜作嵐材料之控制組幾乎是一個點，此與採用相同用水量之結果一致，對於應用緻密配比的混凝土在採用卜作嵐材料的狀況而言，W/S 則會隨拌和水量及水泥漿量  $V_p$  改變而變化，所以固定 W/B 下，改變水泥漿量及水量，可看出 W/S 之變化狀況。

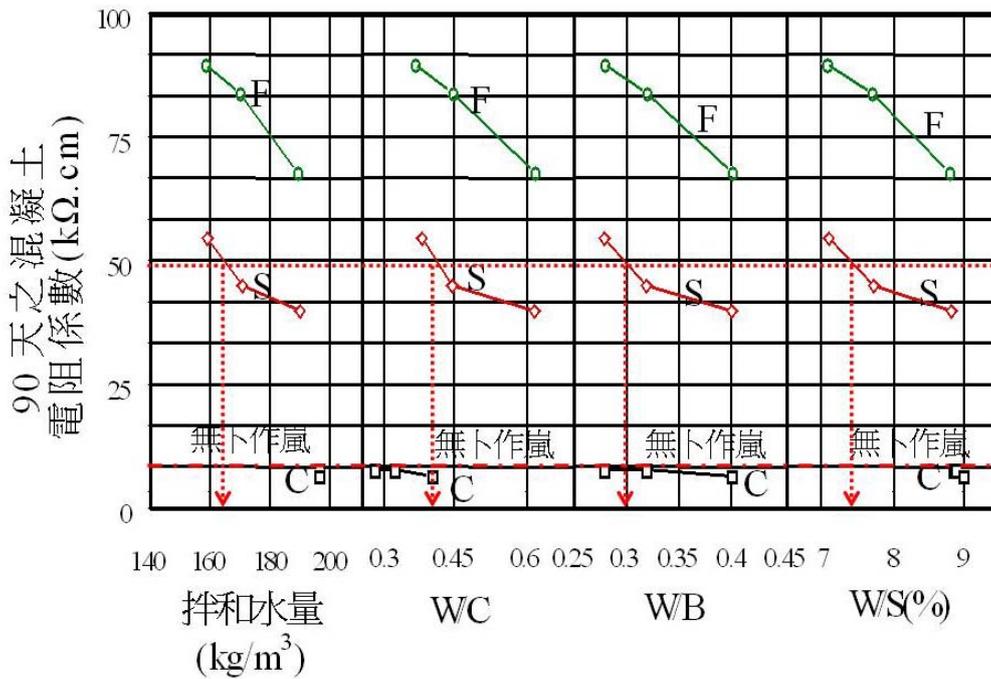


圖 3-14 用水量、W/C、W/B 及 W/S 與電阻之關係[4]

(圖中 S 表示混凝土中添加爐石 / 飛灰，F 表示混凝土中添加矽灰 / 飛灰)

圖 3-14 又顯示矽灰 / 飛灰組之混凝土比爐石 / 飛灰組在長齡期下電阻高出很多，說明微米及奈米級範圍的矽

灰對微孔隙的填塞的效益。W/S 低時，因配比中含高量卜作嵐材料，長期之成長速率甚大，用 W/S 來表示，效果比 W/B 表示更明顯，控制組配比，因用水量相同時，W/S 是相同的，傳統不添加卜作嵐摻料之配比在不同 W/C 下，同一工作性則幾乎有相同之電阻值，更說明公式(3-2)所計算孔隙對耐久性之重要性。

沒有添加任何卜作嵐材料 (P=0) 的條件下，此時如圖 3-15 所示  $W/C=W/B \neq W/S$ ，由數據顯示其電阻不隨齡期呈大量成長趨勢，其他添加卜作嵐材料者全部都以數倍的速度成長。所以用傳統「強度設計法」之 W/C 或用 ACI 318-95「耐久性設計法」之 W/B 而言要很小心，因為當強度相同，用水量不同時，其 W/S 亦不同，電阻也會不同；而相同 W/S 時，如果沒有添加卜作嵐材料（即  $W/C=W/B$ ）；或  $W/C \neq W/B$ ，而用水量偏高時，電阻也會較小，甚至不會隨時間而成長。這對長期品質是沒有好處的，所以須將「添加卜作嵐材料」視為必要，再以強塑劑降低拌和水量並調整工作性。因此以「 $W/C \neq W/B$  及低 W/S」為束制條件，可表現耐久性之意義，當然 W/S 的控制目前採用控制拌和水量小於  $160\text{Kg/m}^3$  的策略。

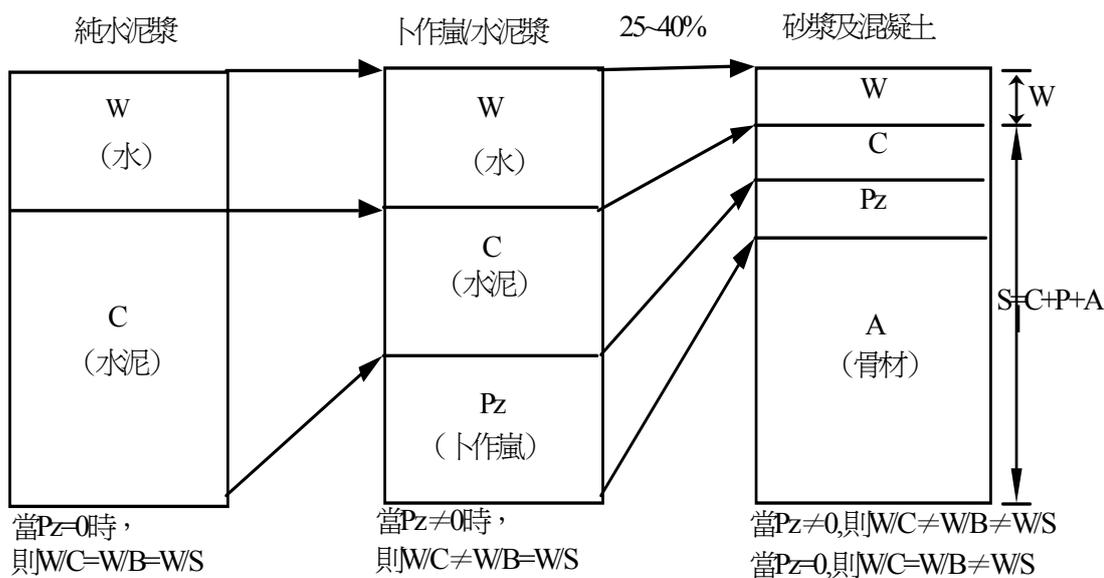


圖 3-15 W/C、W/B、W/S 對水泥漿體及混凝土之影響 [4]

混凝土的氯離子滲透量測，屬於圓柱試體檢測，在結構體上較難執行。原則上係在混凝土配比設計階段，確認混凝土配比性能所進行之試驗。電阻量測則可於結構上應用，若以氯離子滲透電量配合電阻為混凝土材料認定之檢測，則可求出二者之關係，再以電阻檢測進行結構體品質評估，可獲交叉確認品質及品質保證的功能。由電學的觀念，電壓為電流與電阻之乘積，即  $V=IR$ ，應用二者之一可以確認結構混凝土之耐久特性，圖 3-16 所示為電阻與氯離子滲透之  $V=IR$  關係，顯示可依電阻與電滲之資訊來設計耐久性。

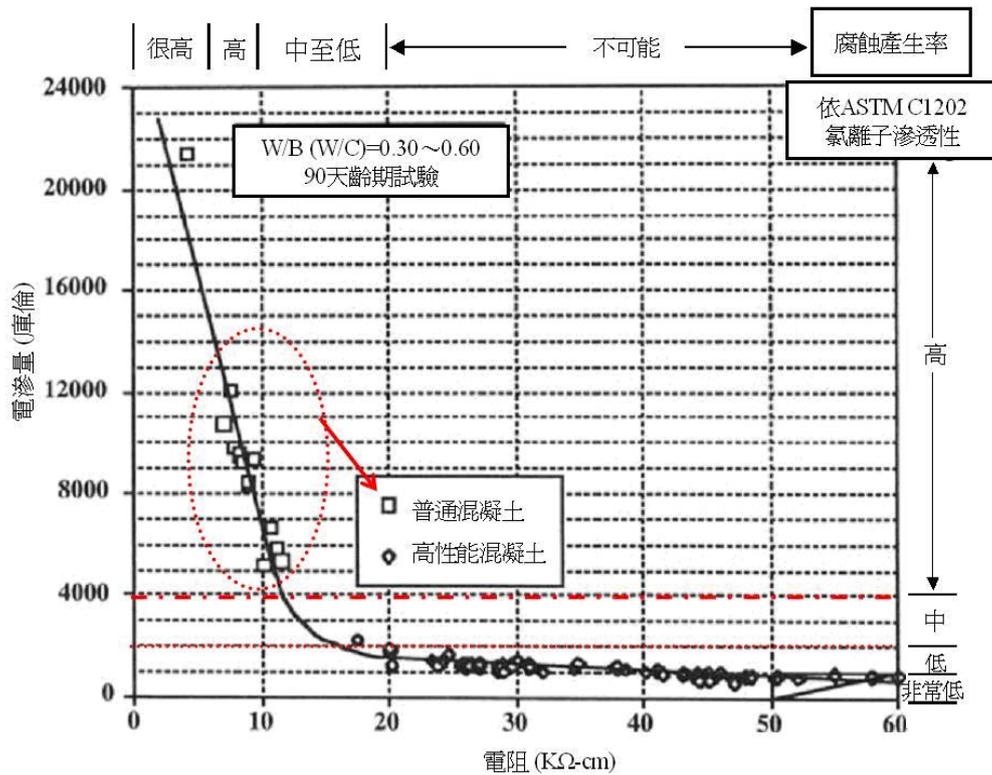


圖 3-16 電阻與氯離子滲透之關係[4]

耐久性與電阻及孔隙之關係，如圖 3-17、3-18，即拌和水量過多時電阻係數大量降低，ACI 配比及傳統自密性或自充填混凝土 (SCC) 採用高量拌和水量時，如圖 3-18，依公式(3-2)及相應之水泥漿系統，顯示毛隙孔較大且多，當然電阻小；添加卜作嵐摻料，則孔隙較小及較少，如圖 3-18 上標示爐石 / 飛灰組及矽灰 / 飛灰組之電阻係數大為增加，尤其是矽灰 / 飛灰組。在此更說明以添加強塑劑，減少拌和用水量，及添加卜作嵐材料，對減少總孔隙及堵塞微米孔隙與奈米孔隙是有幫助的，因此考慮混凝土耐久性是有必要添加這些摻料的。

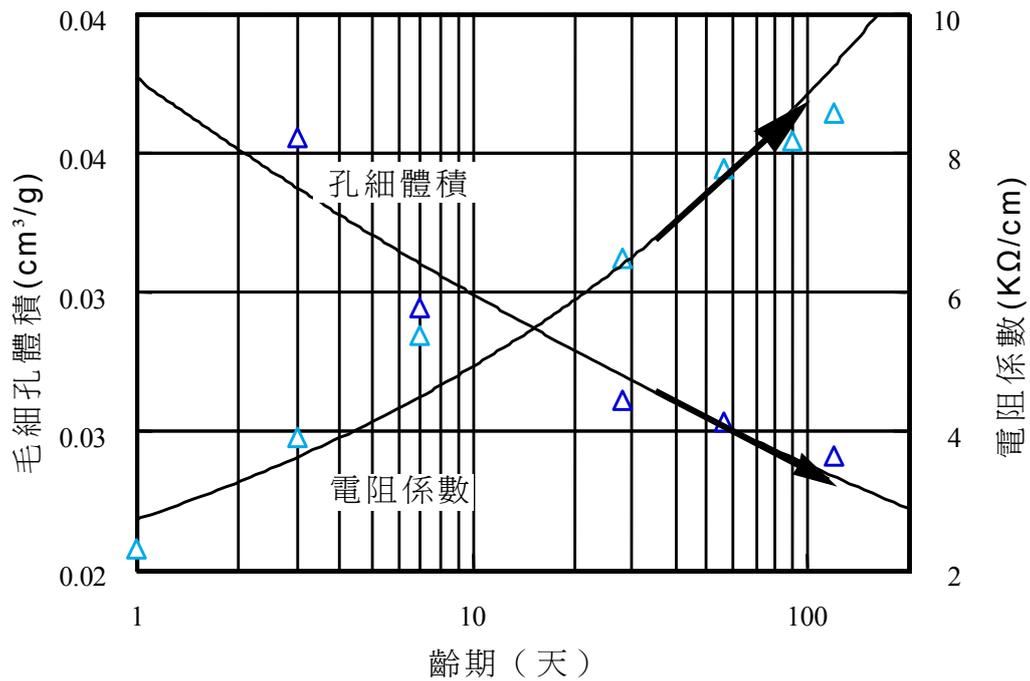


圖 3-17 毛細孔隙體積和電阻係數之成長關係[4]

添加卜作嵐材料的功效，基本上減少滲透率達到 10 倍以上，而  $W/C=W/B$ （即  $P=0$ ）之值愈大，對氯離子滲透率會有 2 倍左右之變化，所以傳統利用  $W/C$  來控制耐久性，對耐久性而言並無多大好處，在此特別強調「 $W/C \neq W/B$ ，及  $W/S < 0.06$ 」對耐久性的重要性了。所以整個混凝土設施安全性的設計除了初期(28 天)結構體混凝土強度以  $W/C$  控制外，長期結構安全性及耐久性均以  $W/B$  來控制，長期結構安全性及耐久性均以  $W/B$  來控制，更長期則以拌和水量的約束來保障設計混凝土年限。

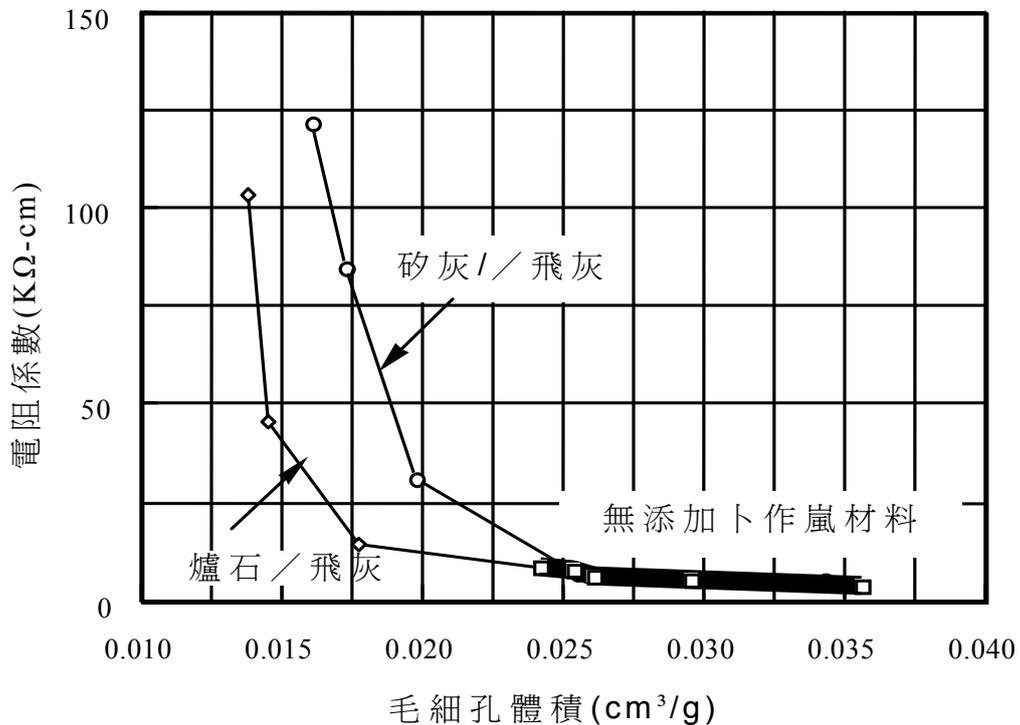


圖 3-18 卜作嵐材料對毛細孔隙體積與電阻之影響[4]

混凝土的耐久性對整個結構體安全性是相當重要的，然而雖然有相當多的研究資訊可考，但混凝土在實際配比及施工上，乃然無法達到理論上耐久性的領域，以致混凝土問題叢生，其主因是沒有將既有之耐久性知識，融入混凝土配比設計中，而施工時並沒有考慮到施工簡易及品質穩定的技術在內，任令預拌廠及泵送業者胡作非為，因此在配比設計中，不能只單獨考慮到「安全性」或「經濟性」，必須同時考慮到「耐久性」及「工作性」基因在內。西元 2000 年新版中國土木水利學會（土木 402-88）「混凝土工程施工規範與解說」中第三章「配比設計」中即指出，「耐久性應依據構造物用途、使用年限、維修成

本及環境條件決定之」，一反過去不重視「耐久性」的問題。而物理及化學耐久性最大的基因是「拌和水」及「水泥漿量」，因此耐久性的設計，必須考慮減少水及水泥用量。

混凝土對於耐久性設計係依照過去歷史的實績、災害、前人的研究成果彙整而得。歸納出，耐久性設計必須由新拌混凝土、硬固混凝土至長期使用的角度加以考慮。經過分析歸納，可得到混凝土耐久性設計的基本準則為：

1. 混凝土中的水量及水泥量應愈少愈好，以防「乾縮及膨脹」發生，宜要求水量小於  $150 \text{ Kg/m}^3$ 。
2. 相對水泥的水量愈多愈好，讓水泥充分水化，以防「自體乾縮」的發生，宜要求  $W/C \geq 0.42$ 。
3. 混凝土的工作性應滿足施工者需求，以防止蜂窩、泌水及析離的產生，宜要求以高性能減水劑來調整工作性。

在此準則下，混凝土可回復至古典混凝土的耐久性。類似高速鐵路或國際金融中心等百年以上設計之混凝土結構物，更需要耐久性之設計觀念。

#### 一、減少拌和水及水泥漿的策略

為了達到耐久性的要求，無論工作性是高流動或低坍度，都有必要減少水量及水泥量，但要如何減少水量及水泥量，而不影響工作性及安全性。這一點有必要由已知的學理上來考慮，基本上可透過下列三種策略為之：

##### (一) 調整級配達最小空隙率減少漿量

調整級配使得大小粒徑骨材互填，俾能將骨材間空隙縮小，此觀念如同材料科學中，原子的堆積，堆積密度愈大，其性質愈佳。圖 3-19 簡示減少水泥漿量 ( $V_p$ ) 的惟一辦法就是將「級配最佳化」，使孔隙率  $V_v$  最小。另外就是降低潤滑漿量厚度 ( $t$ )，或放大骨材粒徑以降低表面積 ( $S$ )。

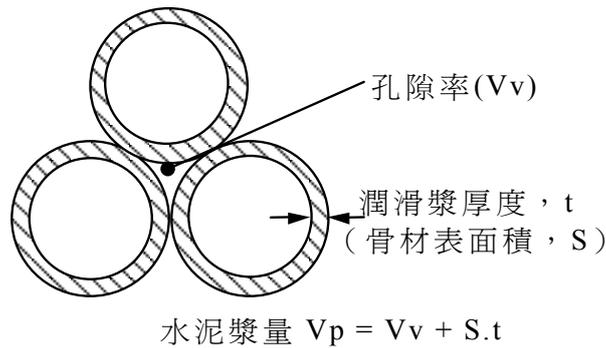


圖 3-19 調整級配達到緻密的效果[4]

級配最佳化可透過大小粒徑骨材相互混合的方式達到，這種技術有很多理論，最典型的就是「富勒曲線」，而漿量厚度的減少，可以透過減水劑或強塑劑等界面活性劑的添加而使剪力降低，使骨材間的互動性較佳。達到同一高坍度及坍流度下，剪力乃然會以漿量較多而相對降低，見圖 3-20。另外的就是降低水泥漿的濃度，換言之，就是提高水膠比 ( $W/B$ )，降低剪力，見圖 3-21，然而這又涉及強度的降低。添加圓形顆粒的飛灰或矽灰，也可以因「球承滑動」的作用，而增加骨材間的滑移性。表面積 ( $S$ ) 的降低，針對粗骨材常受限於模板、鋼筋間距的束制，只有針對放大顆粒數最多的砂來處理，似乎最有效，所以調高砂的 FM 至 2.8~3.2 範圍，亦

即採用機製粗砂，所得效益最明顯。

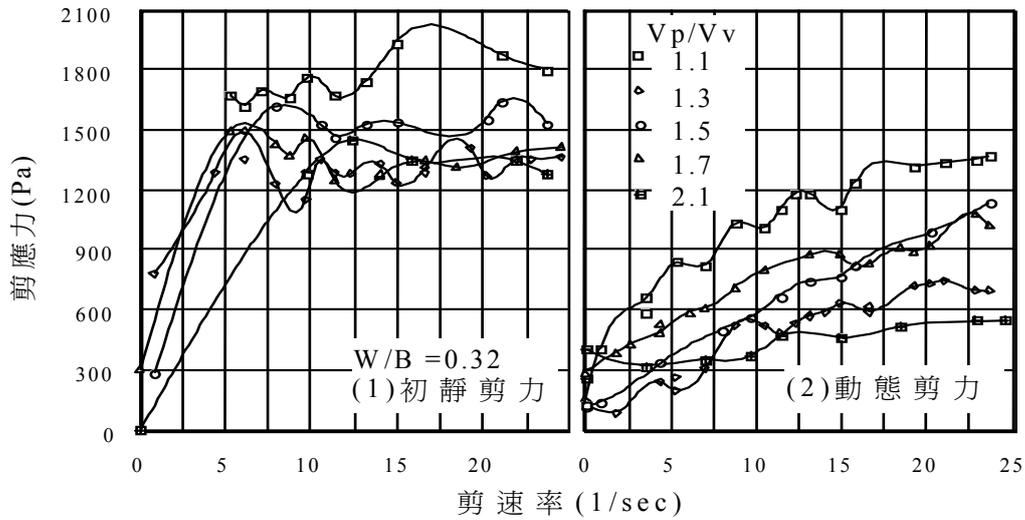


圖 3-20 水泥漿量對流變性質的影響[4]

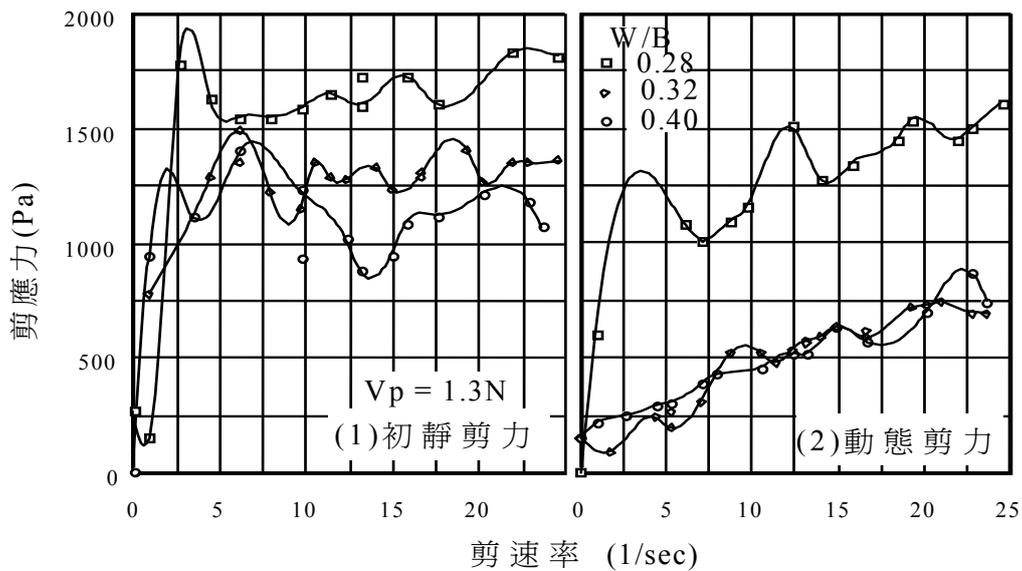


圖 3-21 W/B 對流變性質的影響[4]

### (二) 添加減水劑或強塑劑減少水量

添加減水劑或強塑劑的主要功能，為在相同的坍度下，添加減水劑或強塑劑，等於增加「虛擬水量」，而實際上水量（W）並沒有增加，因此在同一強度下，W/B 是固定的，所以水泥量相對的會降低，見圖 3-22 透過強塑劑的添加可以大量減少水量。

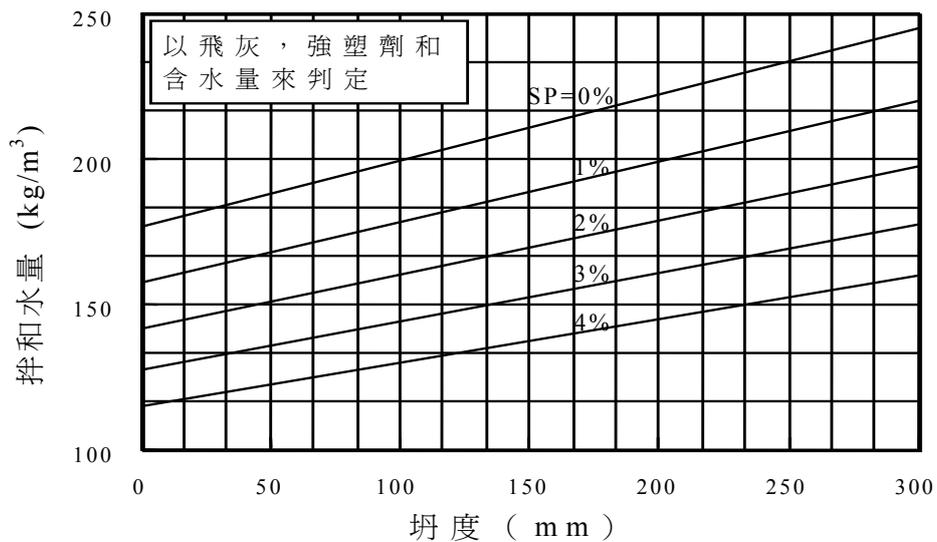


圖 3-22 同一坍度及同一強度下強塑劑  
與拌和水量關係[4]

### (三) 添加卜作嵐材料增加微觀緻密度

卜作嵐材料的添加，在過去曾被嚴重誤解，以為添加卜作嵐材料，對品質會有負面的影響。事實上混凝土的品質是可以經由設計而得，透過添加卜作嵐材料策略的應用可以達到預期的特性。無論何種狀況，添加卜作嵐材料，在達到預期強度下，都可以減少水泥的用量，其主要機能乃透過卜作嵐反應交換作用，轉換易溶性之氫氧化鈣，或其他鹼性物質，成為穩固的 C-S-H 膠體，填塞顯微孔隙或空隙，增進材料的穩定性。

## 二、增強界面的鍵結性

混凝土中骨材與水泥漿界面是最弱的一環，見圖 3-10，如何強化界面強度，對於泌水、析離及骨材與水泥漿變形不一致等問題，要如何改善，才能增加鍵結性這是相當重要的。以下為幾項重要的策略：

### (一) 降低水膠比

降低水膠比可以提高界面的品質，因而提高長期強度，而且使界面不斷強化，此乃須透過添加卜作嵐材料才能達成，由圖 3-23 所示。目前美國 ACI 318-95「結構混凝土規範」已將此列入「耐久性要求」，按台灣沿海區域其混凝土設計，均須考慮防蝕，其 W/B 應小於 0.4(強度  $f'c > 350\text{kg/cm}^2$ )。另外 ACI 比較強調水泥「質」的選用，事實上採用水泥「量」的控制，水泥成份  $C_3S$  及  $C_3A$  總量管制會達到更佳的效果，此為緻密混凝土配比設計的精神。而放射性廢棄物的處置設計與場址的選定息息相關，對於非暴露於海域環境之坑道式低放最終處置場，雖非直接暴露於海域環境，但乃須考量地下水之影響及混凝土材料的孔隙結構如圖 3-24 所示[57]，依混凝土耐久性設計其 W/B 亦應小於 0.4。

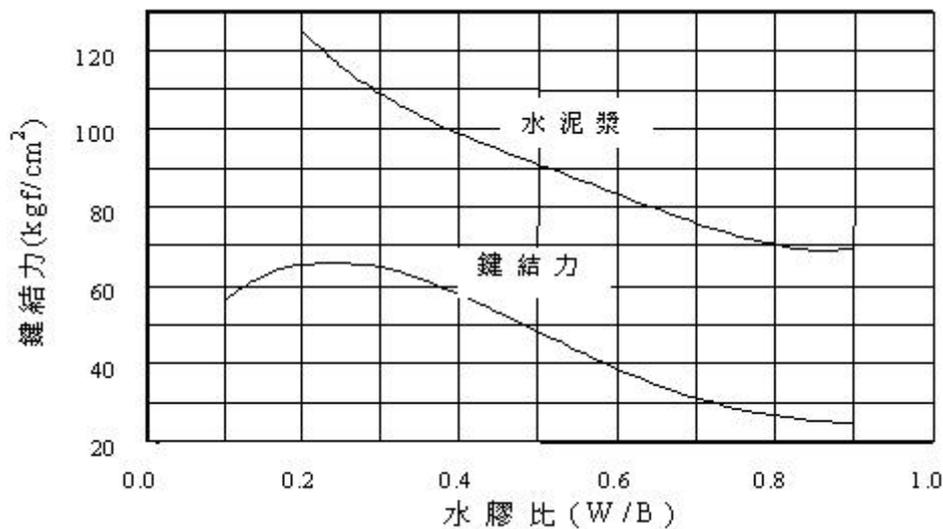


圖 3-23 降低水膠比增進鍵結力[4]

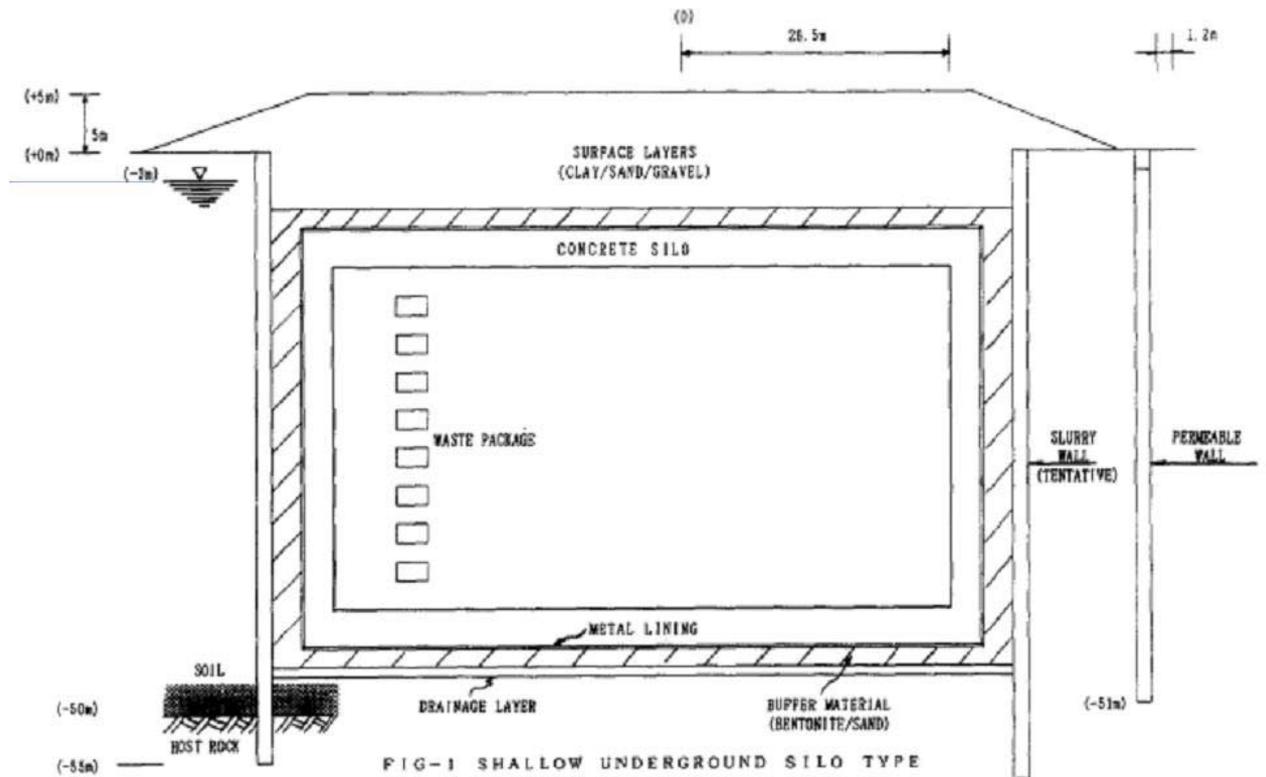


圖 3-24 淺層放射性廢棄物地下處置倉型式[57]

## (二) 降低水泥漿量及增加卜作嵐材料用量

降低水泥漿量對長期耐久性是有利的，圖 3-25 所示係以超音波非破壞檢測方法查驗混凝土的完整性，波速愈高表品質愈佳，波速降低表示劣化。水泥漿量在早期提供較高之超音波速，然而晚期因體積穩定性則較不佳，由超音波速的降低可預期內部產生的裂縫，此與水泥漿骨材變形不一致有關。齡期愈長則愈明顯，漿量減少同時也增加卜作嵐界面固化作用，這對混凝土而言是有利的，見圖 3-25 中漿量 ( $V_p$ ) 之標示方向。

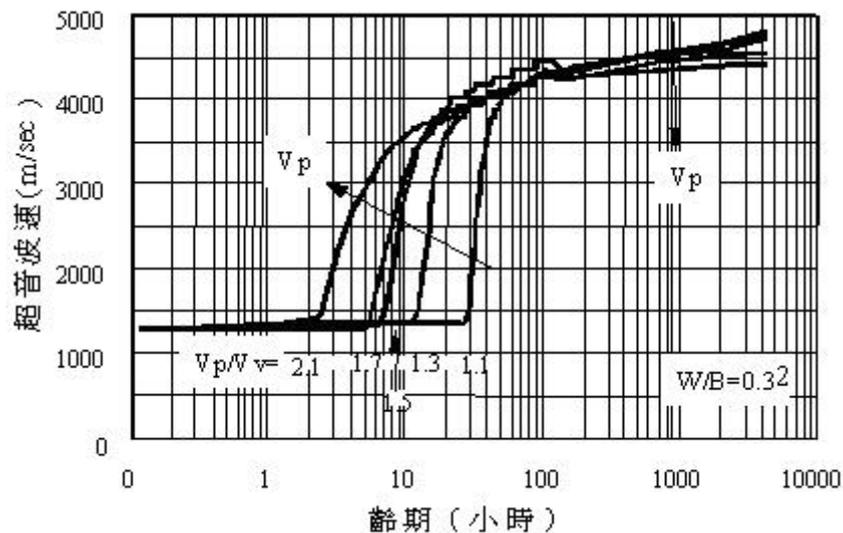


圖 3-25 水泥漿量對超音波速之影響[4]

### 三、增加電阻係數及降低毛細孔滲透性

有害物質在混凝土中滲透或擴散，都是透過電動勢的趨動，傳統混凝土降低滲透性的方法，純粹由降低水灰比（ $W/C$ ）的方式達成。經由試驗指出純粹降低水灰比（ $W/C$ ），只對「水泥漿」而言是有意義的。但對水泥漿只佔 25 至 40% 的混凝土而言，只採用降低  $W/C$  是不足的，在 ACI 318-95「結構混凝土規範」，採用  $W/B$  的耐久性設計理念是有益的，然而更重要的是「水量」（ $W_w$ ）的影響更不容忽視，減低拌和水量對許多混凝土性質是有益的，見表 3-8 所示。所以針對耐久性而言，減低水量是值得採行的重要策略。

表 3-8 減低拌和用水量的好處[4]

好處	原因
1.增加抗壓及抗彎強度	減少泌水
2.降低滲透性，因此增加水密性和低吸水性	減少骨材下方之泌水缺陷，免除滲水路徑
3.增加抗風化能力	減少水分及有害物移動路徑
4.增進新舊接續面及混凝土與鋼筋間的鍵結強度	減少界面粉化與水泥末
5.減少乾燥及潮濕造成的體積變化	減少巨觀孔隙失水收縮及水泥遇水膨脹
6.降低收縮裂縫的機率	減少水量移出混凝土

(一) 降低水固比 ( $W/S_{min}$ )

對整體混凝土而言，降低拌和水量而增加固態材料的重量是有益的，換言之，降低水與固體之比率 ( $W/S$ )。降低拌和水量而不影響工作性，採用強塑劑或減水劑及應用微米或奈米材料（飛灰、矽灰）等卜作嵐材料是必要的。

(二) 使孔隙細緻化 ( $\gamma_{max}$ )

如果混凝土由  $W/C$  控制，而無添加任何卜作嵐材料，則滲透性會隨  $W/C$  降低而降低，但若  $W/C$  過低 ( $< 0.42$ )，則自體縮裂會產生，以致長期滲透性會隨內部裂縫之增加而增加。所以有必要添加卜作嵐材料，利用卜作嵐反應，由其生成物填塞微孔隙的策略，使得孔隙變細且減少，見公式(3-2)所示之  $k_2\beta$  項，因此而增加電阻係數，尤其次微米尺寸的矽灰添加更可以使電阻係數提

昇至 100KΩ-cm 以上。

#### 四、鋼筋防蝕特別規定

當鋼筋混凝土結構物暴露在海域環境下或地下水鹽化地區，則鋼筋防蝕變得特別重要，以下為配比設計應考慮方向。

##### (一) 控制混凝土材料中氯離子含量

針對 28 天至 42 天硬固混凝土材料所含水溶性氯離子濃度，不得超過表 3-9 所示之濃度，這些氯離子都是來自混凝土組成材料，包括拌和水、骨材、膠結料（水泥、卜作嵐）和摻料。所以配比設計時應事先控制總氯離子濃度。

表 3-9 混凝土防蝕保護最大氯離子含量[4]

構造型式	28 天硬固混凝土最大氯離子(Cl <sup>-</sup> )含量		中國國家標準
	水泥重量%	kg/m <sup>3</sup> 混凝土	kg/m <sup>3</sup> 混凝土*
預力混凝土	0.06	0.15	0.15
鋼筋混凝土暴露氯化物下	0.15	0.30	0.3
鋼筋混凝土在乾燥環境下	1.00		
其它鋼筋混凝土構造	0.30		

\*「中國國家標準」規定，混凝土的配比必須預先知道，以便精確推算。

##### (二) 降低氯離子滲透量

依據 AASHTO 規定，混凝土具防蝕性能其氯離子滲透電量必須小於 2000 庫倫，見表 3-7 所示，為達此一目的必須添加卜作嵐摻料。此種作法也可以增加混凝土的電阻係數至 20KΩ-cm 以上，如圖 3-26 及圖 3-14 所示。

##### (三) 確保混凝土品質及保護層厚度

鋼筋暴露於卻冰鹽、鹽水、有鹽分之水、海水和此

等有害物鹽分之霧氣中者，必須依據規定，控制混凝土最大水膠比及最低抗壓強度。更重要的即必須確保有足夠保護層厚度，及由料源管制、製程管制與成品管制的控管流程保證品質，使混凝土由施工至使用階段無裂縫缺陷的產生。

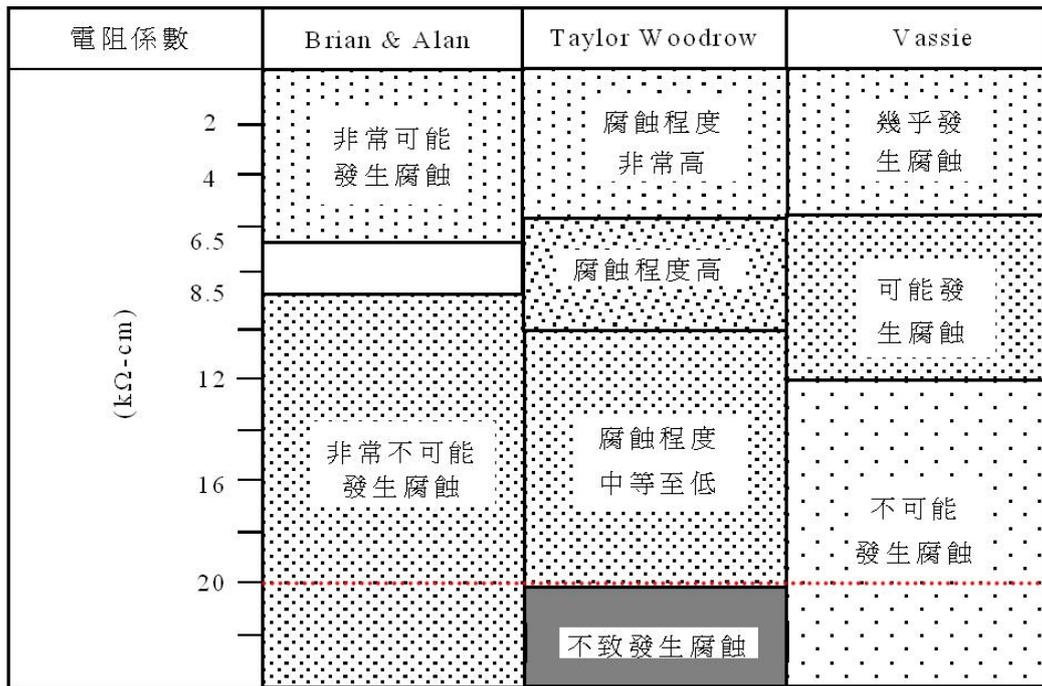


圖 3-26 混凝土電阻與鋼筋腐蝕性[4]

#### 五、新拌混凝土應保障最佳之施工性能

混凝土未必全然是高流動性的 SCC，完全依施工者需求而定。當然早期發展高性能混凝土是高流動性為主要訴求，但是發展了十數年後發覺其實「高性能混凝土」最終目的還是「結構體的高性能化」，亦即「耐久性」才是最終之依歸。但是工作性不佳，則蜂窩會產生，而且工地工人易因加入大量水以助工作性，反而造成泌水、析離及劣

化現象，反而不利耐久性，所以適當「工作性」對耐久性當然有影響。然而，若為了工作性而大量加水及因而提高水泥量（維持 W/C 不變），雖短期上確保了安全性、表面無缺陷的品質，然而因為「塑性收縮」、「自體收縮」、「乾縮」、「潛變」等物理化學反應，使混凝土內外劣化，對混凝土長期耐久性是不利的。換言之，那種設計理念是不正確的設計。所以，工作性考慮的層面其實也是很重要的。

傳統上，增加工作度的方法均是以增加拌和水量為主，然而「拌和水量」乃耐久性之主要「劣化基因」，必須採用添加減水劑及強塑劑來增加潤滑性及降低拌和水量，否則一旦又要求高強度，則較低 W/B 下，水泥的用量會增加，而增加水泥水化反應速率，將影響 45 分鐘之坍度及坍流度，造成嚴重工作度損失。換言之，「水泥用量」是混凝土 45 分鐘後工作性（坍度損失）及長期耐久性之「劣化基因」，有必要儘量降低水泥量。

上述設計的原則，基本上係採用飛灰或爐石等卜作嵐材料及加上強塑劑等來達成目的，而不採用美國 ACI 及中國土木水利學會（402-88）「混凝土工程施工規範與解說」中所述「直接增加拌和水量及水泥漿量」的錯誤方法，以防止混凝土因水泥量過多或水量過多而劣化的富貴病。由以上說明，達到良好工作度的策略如下：

（一）使用良好的級配及粗砂

見圖 3-27，水平軸顯示粒徑愈大，則因表面積（S）愈小，骨材流動所需之潤滑漿量愈少，混凝土所需拌和

水用量及相對水泥量愈少，這當然對顆粒數量最多的砂而言，放大粒徑（FM）採用粗砂，更俱重要性。同時空隙（ $V_v$ ）因級配較佳而減少，所需之填充水泥漿量相應可以降低，因此在同樣漿量條件下，級配佳的骨材，工作性相對會提高。

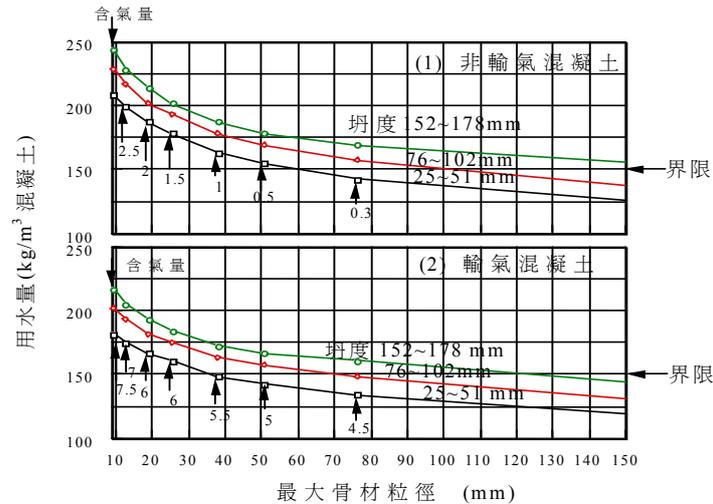


圖 3-27 不同最大骨材粒徑及坍度條件下混凝土建議用水量及輸氣量[4]

## (二) 使用高性能減水劑

工作度要求愈高，則傳統混凝土所需拌和水量必須提高才能突破界面剪力，產生相互滑動。然而，過高之水量並不恰當，目前建議拌和用水量應在  $150\text{kg/m}^3$  以下為宜。減少拌和水量，並且增加潤滑效果是唯一的途徑即強塑劑之使用。透過界面潤滑的功能，使潤滑漿厚度減少，但乃具有良好滑動性，這是非常重要且有效的方式。未來如果有能減水 50% 的強塑劑發明，是混凝土設計者所期盼的，如此才有可能使拌和水量降至  $100\text{kg/m}^3$  以下，混凝土體積穩定性將非常好，而達到高耐久性的

混凝土範圍。

### (三) 添加適量卜作嵐

添加卜作嵐摻料，包括如飛灰、稻殼灰、爐石粉、矽灰，或岩石礦粉等，物理上任何可填充骨材間之空隙，增加接觸點的材料均有助益工作性。如果填充料又是圓形顆粒，如飛灰或矽灰，可藉由「球軸承」的效益，助長材料間的滑動，對工作性更加有益。然而，必須注意其添加量應考慮物理及化學效應，詳細計算，並經過驗證，否則添加量過多，而未調整砂之細度，反而會因細粒料吸水過大，而造成過度黏稠的困擾。通常混凝土設計者宜調高砂的細度模數 FM 由 2.8 至 3.1 範圍，即可減少過黏的問題。

### (四) 輸入適量的空氣

輸氣的方法，如同製作蛋糕般，因為空氣量的增加，相對增加漿量體積，有助工作性，同樣坍度所需的拌和水量自然減少，一般可以減少 10~15% 的拌和用水量，比較圖 3-27(1)及(2)。但是此種方法必須注意到添加空氣量，將會損及強度，需小心修正之。1% 輸氣量，約減少 5% 抗壓強度。另外，輸氣量過多，因黏稠度也會增大，則會降低坍流度。

## 3-4 混凝土施工養護對耐久性的影響

混凝土一旦有裂縫，則鋼筋混凝土內之鋼筋即刻受到有害物之侵蝕，而產生銹蝕現象，當然混凝土內外變成無界限，耐久性即刻產生問題。所以養護對滲透性有相當的

影響，而養護時間愈長，則水密性愈佳。水中養護較蒸氣養護有較佳抗腐蝕能力，故建議浸水或泡水養護。目前國內過度採用乳液護膜養護，或忽視養護的重要性，造成甚多嚴重塑性龜裂的問題，如台北捷運木柵線高架段之帽梁龜裂問題，此皆會造成如圖 3-28 所示裂縫，而加速鋼筋腐蝕的速率，造成長期結構之安全性降低，亦即耐久性問題，所以養護工作舉足輕重也。

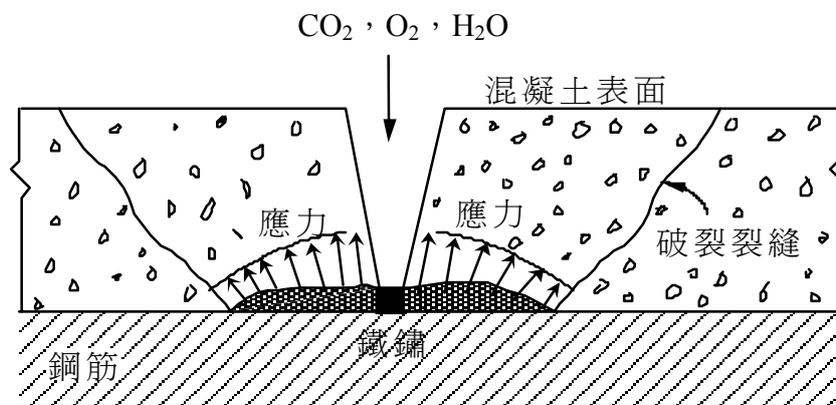


圖 3-28 有裂縫混凝土內鋼筋腐蝕狀況示意圖 [4]

#### 一、一般大氣中養護

大氣中之養護，指的是將混凝土置放在空氣中養護的方法，此為最通俗的作法，但也是最容易被忽視的部份，因此常造成強度及耐久性劣化問題，所以必須要瞭解影響養護的因素，才能找出保障的對策。圖 3-29 顯示養護對強度發展之影響性，濕養護時間不夠明顯是會對強度產生劣化的結果，而且劣化影響隨時間增長而加劇，可見妥善養護的必要性，一般濕養護 7 天以上之混凝土強度可達全程濕養護混凝土強度的 85%，為規範要求之濕養護期限。以下為養護狀況、濕度、溫度之影響。

## (一) 養護環境的影響

### 1. 間歇養護

在實際施工作業中，由於工作環境、時程控制及施工放樣的習性，在工地常常無法進行經常性的養護，以致混凝土受到濕潤及乾燥反覆作用，造成結構體內部產生裂縫，以致逐漸使混凝土失去整體性，甚至滲漏的狀況發生。圖 3-29 顯示出混凝土如果經過持續性的濕養護，理論上強度是不斷地成長，但是如果只濕養護數天，就被置放大氣中，表面看來剛開始強度反而上昇，此乃表面乾縮產生束制作用所造成。但隨時間水分蒸散，表面產生裂縫，強度有漸次下降的趨勢，此點更指出隨著乾燥的持續，水分不斷的蒸發擴散，裂縫持續產生問題是必須重視的，所以適當的養護是很重要的，尤其水泥漿量愈多（由 1.1Vv 增至 1.9Vv），則抗壓強度降低的愈多。

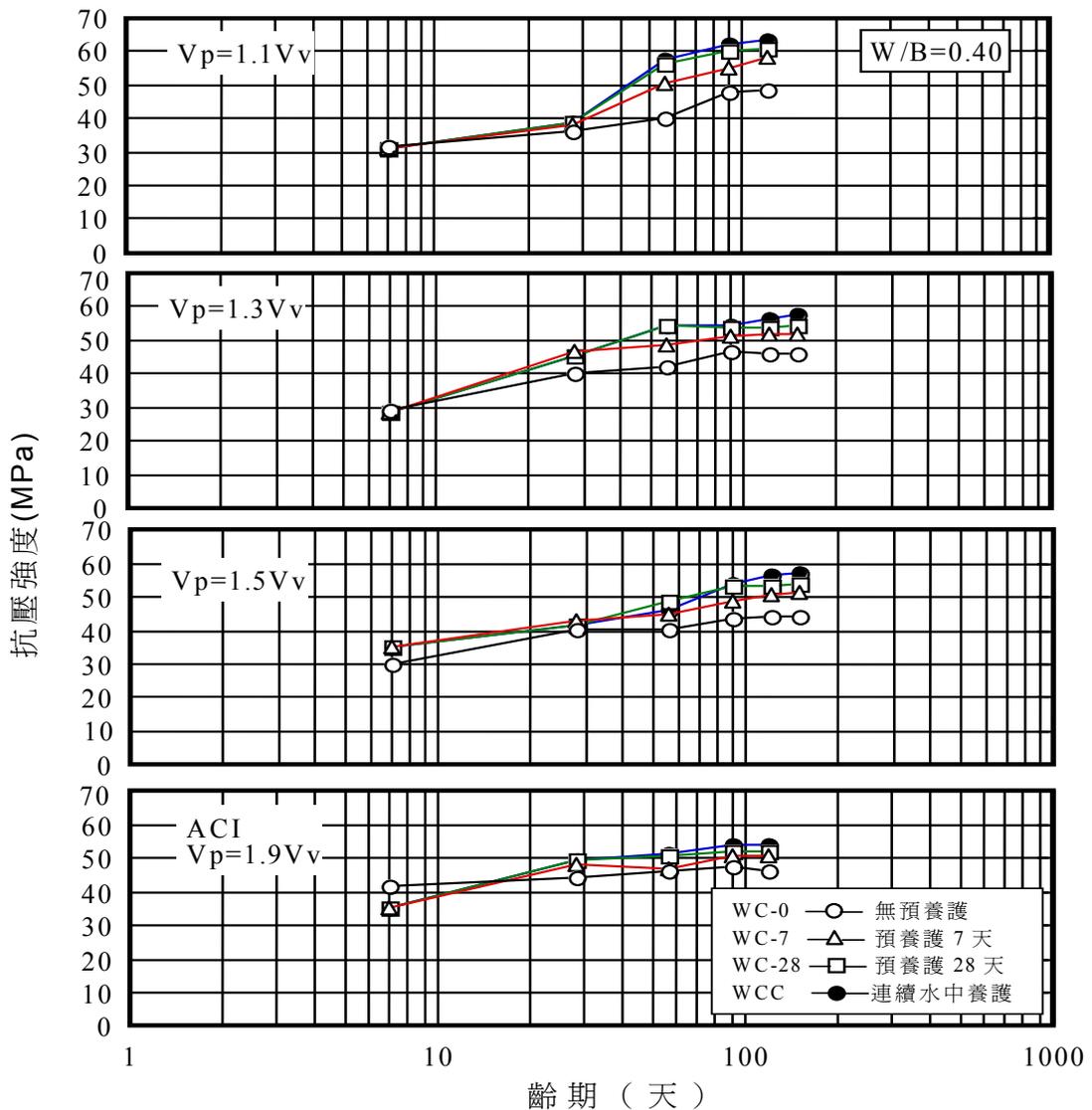


圖 3-29 混凝土養護時間對抗壓強度的影響[4]

## 2. 相對濕度的改變

養護濕度對混凝土性質的影響，端視濕度對毛細管孔的影響程度而定，如果養護濕度低於 80% 時，除水化會終止外，另外也會因毛細孔水的失去而產生裂縫。但密封的水泥漿體，如果水灰比 ( $W/C$ ) 小於 0.42 時，則「自體乾縮」會產生。如果水泥漿過多，加上防護不當則塑性收縮的可能性增大，以致混凝土失去

整體性。

基本上養護愈完全，其強度發展愈佳，如圖 3-29 中連續濕養護之曲線 (WCC)。而在大氣中養護之影響，缺乏足夠之養護水分，對水泥漿體強度之發展非常不利，所以養護環境中，濕度保持愈久，或養護齡期愈長，其各項機械性質亦愈佳 (見 WC-7、WC-28 比較 WC-0)。由圖 3-30 顯示，相對濕度 80%，且在 25°C 常溫環境下，完全沒有預先濕養護於飽和石灰水中試體之強度，只有在前 3 天有成長之跡象，7 天以後則成長有限。預先濕養護 7 天及預先濕養護 28 天之試體，置放於相對濕度 80% 初期強度有超越持續養護之試體，此乃因外圍乾燥之環境迫使試體內表面之水份向外快速擴散排出，導致水泥漿體收縮產生「擠壓效應」，而提高水泥漿體之承壓能力之假象，故會稍高於同齡期飽和石灰水中養護試體之強度。當漿體中水份散失過多，致使水化所須用水不足時，則強度成長便減緩或停滯，由圖 3-31 亦可看出在相當低的相對濕度 50% 環境中，無預先濕養護之水泥漿體中由於水份更加快速排出，故其強度之成長更少且緩慢，概略至 3 天時即呈嚴重劣化，強度降低現象；而預先濕養護 28 天之強度，雖亦有堆積效應產生，但隨著齡期之增加，其強度則有加速劣化下降之趨勢出現。可見持續養護之重要性，然而實際施工上是不可能的。對於低水膠比之高性能混凝土，如果養護之水分不足，則表面水

分將快速蒸發，尤其高含量飛灰及爐石等卜作嵐材料的條件下，這將嚴重影響強度，所以建議施工完成後，即刻泡水養護至少三天，而以七天養護效果最佳。

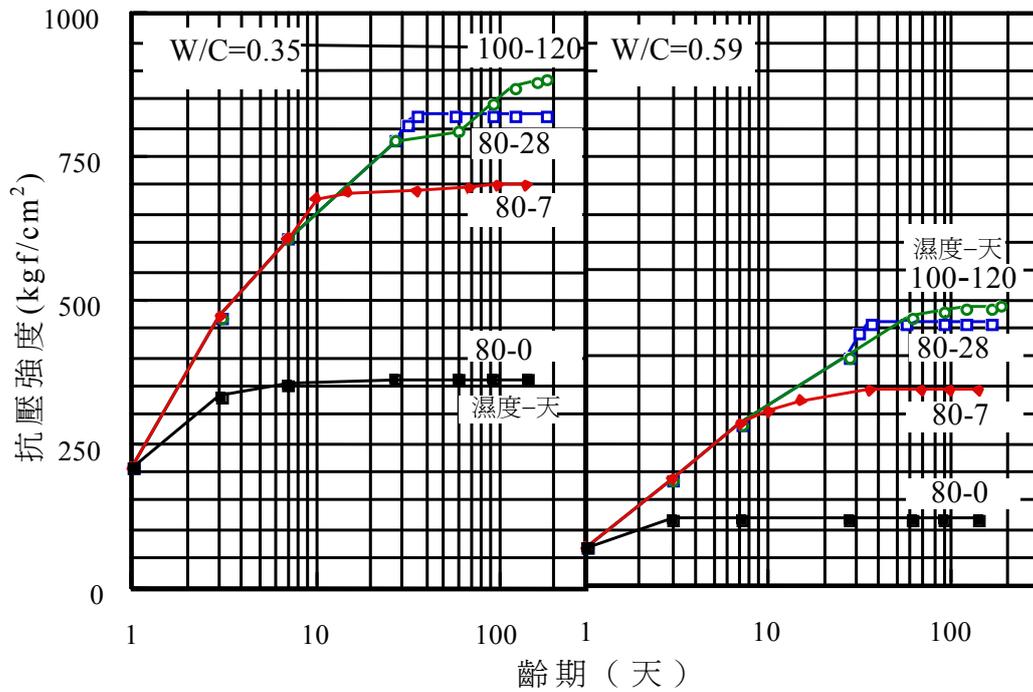


圖 3-30 混凝土養護濕度對混凝土強度的影響[4]

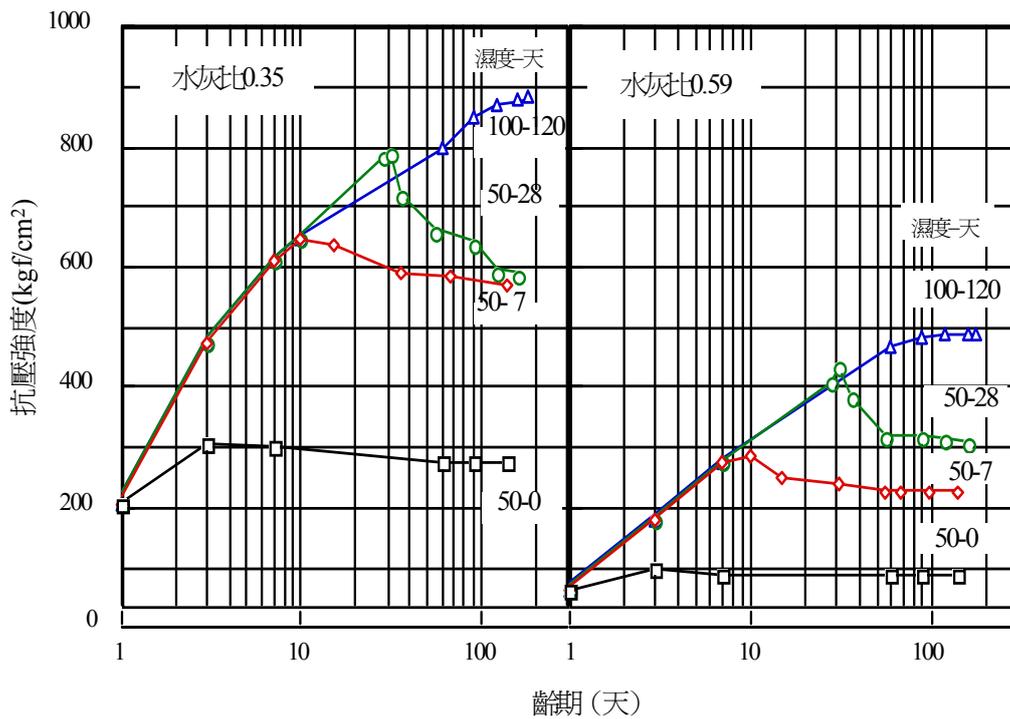


圖 3-31 混凝土養護濕度及時間對混凝土強度的影響[4]

圖 3-32 顯示預先濕養護時間較短，則大孔隙增大，吸水率有增加趨勢，當水泥漿體持續水化，以增強漿體本身之抗張能力之同時，漿體內部水份向外排出，雖然造成堆積之正效應，但水泥漿體之體積，亦因失水而產生變形，此變形所導致之分離壓力及毛細管應力之負效應大於正效應，致使水泥漿體之裂縫形成，見圖 3-32 右圖，漿體之強度下降，見圖 3-32 左圖所示。裂縫之大小及多寡亦直接影響到強度下降之急緩。圖 3-33 係以飽和石灰水中養護之試體強度成長曲線為分母，分別以恆溫恆濕機控制之相對濕度 50、60 及 80% 為分子所得之關係強度比曲線，圖中顯示未經養護直接置於相對濕度 80% 環境中之水泥漿體，其強

度之發展於 120 天時約只達飽和石灰水中養護之 40%，亦即強度約遞減 60%，相對濕度 50%則約遞減 70%之強度，此結果可預期對耐久性及水密性方面有不利之影響，而水灰比 (W/C) 愈大，其遞減程度愈嚴重。換言之，水量愈多，則乾燥失水的機率愈高，裂縫產生機率愈高，當然強度及耐久性的傷害愈大。

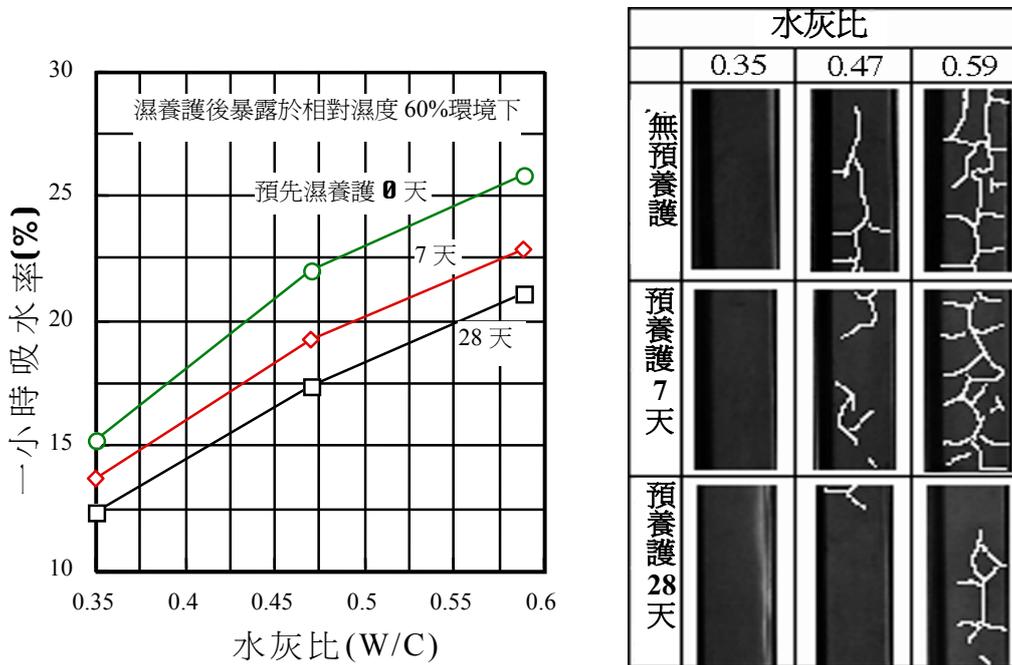


圖 3-32 預先濕養護對水泥漿體(1)吸水率之影響  
(2)裂縫之形成(60%相對濕度) [4]

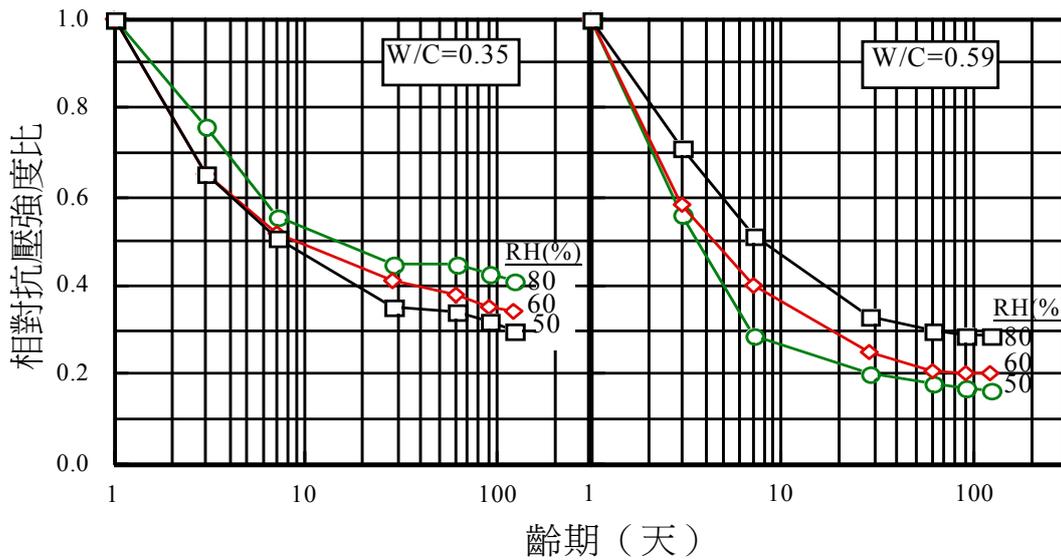


圖 3-33 混凝土暴露濕度下養護之強度比率成長曲線[4]

圖 3-34 及圖 3-35 分別表示預養護 7 天及預養護 28 天之關係強度比曲線，由圖 3-34 中可看出預養護 7 天相對濕度 80% 之強度於 120 天時約遞減 20%，由圖 3-35 預養護 28 天則約只遞減 5% 之強度。以台灣氣候而言，四季平均之相對濕度約為 70~80% 之間，若混凝土澆置好後不施予養護，則其實際強度未達設計標準是可以預期的，千萬切記。若施予 7 天養護，則其強度之減損少於 20%，由工程經濟性上考量，混凝土設計時可利用安全係數或放大係數來加以調整，這是可以被接受的，當然如果配合採用特殊養護技術或早強水泥則又另當別論。對高性能混凝土而言，養護的影響性當然也是可以預見。

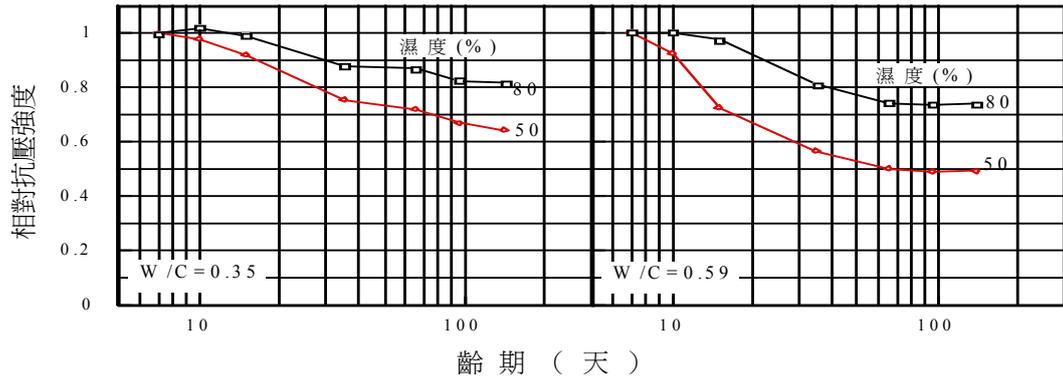


圖 3-34 預先濕養護 7 天水泥漿體相對濕度與飽和石灰水中養護試體之強度比率曲線[4]

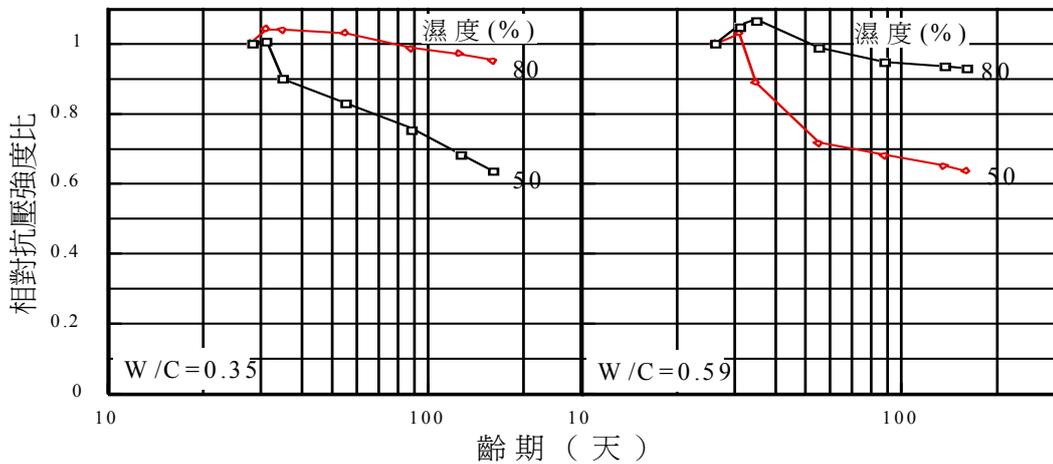


圖 3-35 預先濕養護 28 天水泥漿體相對濕度與飽和石灰水中養護試體之強度比率曲線[4]

相對濕度低於 80% 環境下養護，必須注意到乾燥之外圍環境將促使水泥漿體內部水份向外擴散排出，以致氫氧化鈣之成長隨水份之散失而大量降低，見圖 3-36 之 X 光繞射率強度之降低，明顯的由圖 3-37 看出裂縫因應成長的狀況，更說明濕度過低所造成裂縫產生的問題，這是非常不利於耐久性，尤其二十一世紀混凝土結構物講求百年以上之壽命，宜特別重視之。

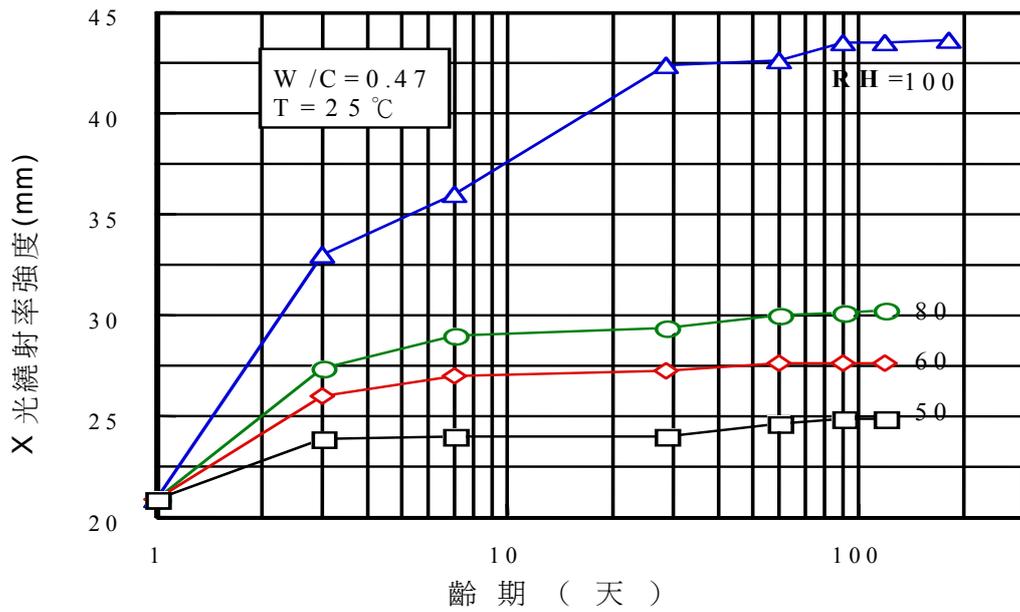
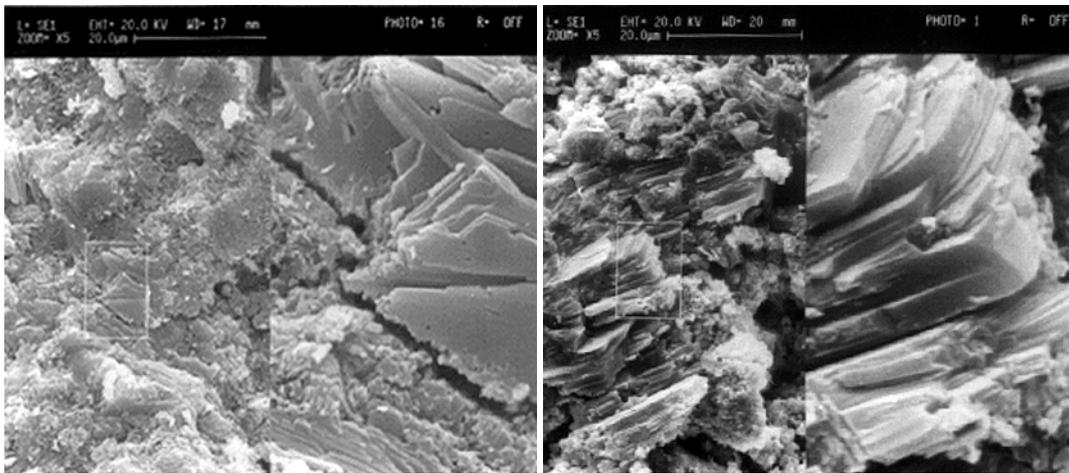


圖 3-36 常溫下各相對濕度對水泥漿體中氫氧化鈣 X 光繞射峰成長率之影響[4]



(1)RH~50%

(2)RH~60%

圖 3-37 水泥漿體濕度條件下之裂縫狀況觀測圖  
(無預養護下，養護溫度 23°C，養護齡期 7 天) [4]

### (三) 二氧化碳的影響

二氧化碳對混凝土的影響有二種，一種是碳酸化而

產生失水的乾縮現象，另一種為因  $\text{CO}_2$  與  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  結合，形成  $\text{CaCO}_3$  的堅硬表面，塗封混凝土表面，反而有強化混凝土表面之作用，進而阻絕後續之侵蝕作用，通常在預鑄混凝土廠鑄造混凝土，如果採用高溫養護時，在含比較高量水泥下，常會造成表面析出白色  $\text{CaCO}_3$  結晶物，此種碳酸化作用甚至保護混凝土避免進一步受侵蝕，然而許多證據顯示高溫將造成材料間差異溫度裂縫，形成劣化之前因，所以高溫養護形成有益的  $\text{CaCO}_3$  保護部分混凝土表面，但也因混凝土產生內部裂縫而不利耐久性。

#### (四) 養護方法的影響

如前述，養護對水泥漿體及混凝土品質的影響甚鉅，透過濕養護的工作，主要目的即「在防止水分的散失」，其方法可以區分為(1)水養護法及(2)封面養護法。「水養護法」是將混凝土浸潤於水中，如此當然充分供應水份，而無失水之慮，這類養護法有「儲水法」，「噴水法」，「灑水法」或「飽和覆蓋物法」等。另一類型為遮蓋表面，減少蒸發表面，此類封面養護法有「防水紙、塑膠布及養護膜」等。這些方法的效果可由圖 3-38 顯示出來，採用水養護的法則，因不斷供應水，水泥漿中之  $\text{C}_3\text{A}$  會大量吸水，而造成大量膨脹作用。以 PE 塑膠布或防水紙保護，則膨脹量稍減，而以養護劑養護，則可見有甚多收縮之作用，表示「養護劑養護」並未有充分保水作用，如此將影響養護功能。綜而言之，最佳的方

法乃然以濕養護最便宜，也最安全。

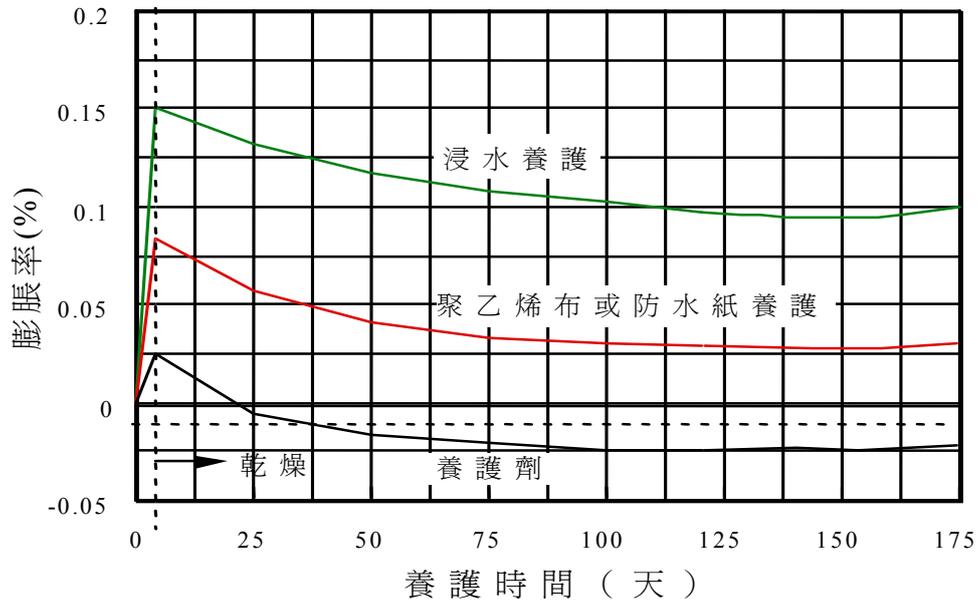


圖 3-38 養護方法對膨脹效果之影響[4]

養護的方法中以水養護最佳，尤其如果 W/C 低於 0.42 之「高強度混凝土」，因會有「自體乾縮」的現象產生，造成混凝土劣化，非常不利耐久性。在此狀況下，水養護對高強度混凝土之品質保障更為重要。

#### (五) 養護最佳期間

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：

1. 強度發展 ( $f_c'$ )。
2. 水化熱的產生 ( $\Delta H$ )。
3. 化學性收縮 ( $\Delta V$ )，即自體乾縮。

圖 3-39 顯示，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

乃初期水化反應最容易發生的問題。而水化熱所衍生之表面溫差應變裂縫及表面濕度之蒸散亦會造成裂縫，而化學收縮乃水泥水化所產生之體積收縮值，即所謂「自體乾縮」。所以表面不斷補充水分，俟強度發展至能抵抗收縮之張力，降低溫度所造成的表面蒸發張力，並且不斷補充水分，防止化學反應造成之裂縫，這些策略對保障混凝土耐久性有直接的影響。

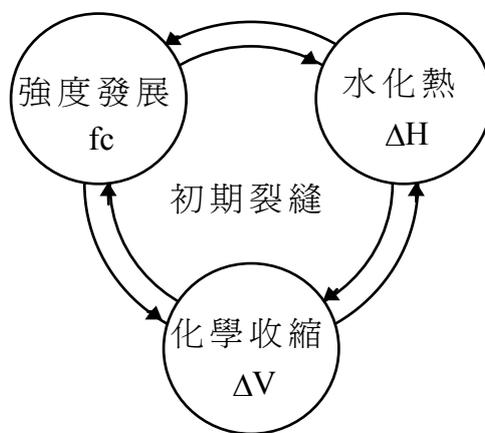


圖 3-39 混凝土裂縫產生要因[4]

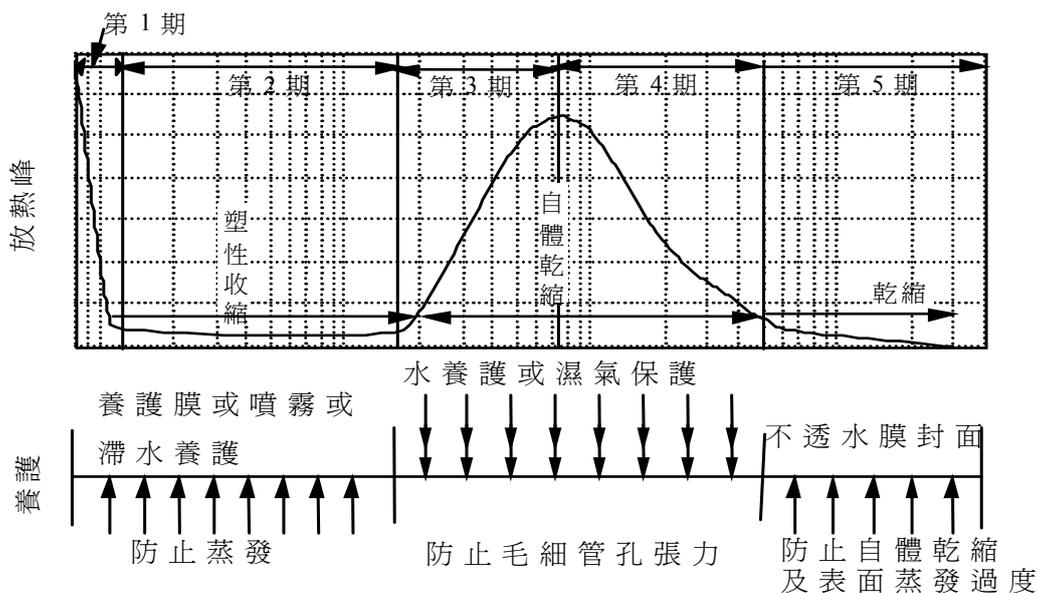


圖 3-40 減少乾縮的方法[4]

如果針對水化放熱曲線來看，見圖 3-40，水泥水化初期至「蟄伏期」間，水泥顆粒間距離被大量水區隔，初期強度發展甚低。所以只要外界溫濕度、風速、配合水泥水化溫度，造成蒸發，一旦水分蒸發散失過快，則容易產生「塑性收縮」。至初凝後，水泥水化進入「加速期」至水化溫度上升與擴散相當時之最高峰點，接著溫度散失較水化熱高時，則進入「減速期」，此時毛隙孔隙之半月膜之張力大，水化需要大量水。如果  $W/C < 0.42$ ，則未水化水泥顆粒將向鄰近水化物吸收水分，而有「等向性」之「自體乾縮」產生，因此充分的養護水份實屬必要。到了「擴散期」，水化持續，未水化水泥核心向外吸取水分，及表面水分蒸散，逐漸往內擴散。當然水化物如果孔隙多及原有水量較大，則這些水亦將脫附而慢速蒸發，造成「乾縮現象」，因此必須防止水分向外擴散，所以早期保持濕潤實屬必要。

由水泥水化觀點可知，混凝土初期養護是非常重要的，養護期間由圖 3-41 可知，施工終飾完成後，即應加以養護。能夠長期養護，當然可以避免水化第 4 期後的乾縮，如無法長期養護，則至少應有 3~7 天的養護時期。中國土木水利學會（402-88）「混凝土施工規範與解說」中，第十二章「養護」即表明「除另外規定者外，早強混凝土至少須養護 3 日，一般混凝土養護 7 日」。

## 二、特殊狀況下之養護

特殊狀況之養護，主要係針對如巨大體積之結構物，

或擔心混凝土結構內外溫度差異，形成混凝土表面與內部應力失衡而產生「裂縫」；或大熱天有可能造成「冷縫」；或「塑性裂縫」而失去結構整體性，所以必須採取養護防護措施以保障混凝土品質。

#### （一）巨積混凝土

「巨積混凝土」除了指「體積碩大」，可能產生溫度裂縫外，另外亦指可能有溫差應力，造成裂縫疑慮時之任何混凝土均屬之。所以，「巨積混凝土」的溫度控制與水分控制是同樣重要的。內部溫度上升之速率，以不超過年平均大氣環境溫度的 $\pm 11^{\circ}\text{C}$ ，在台灣一般控制混凝土溫度在 $32^{\circ}\text{C}$ 以下，其實夏天的溫度平均 $31^{\circ}\text{C}$ ，冬天則為 $14^{\circ}\text{C}$ ，如果以內外溫差不大於 $11^{\circ}\text{C}$ ，則混凝土在夏天應為 $20\sim 42^{\circ}\text{C}$ ，在冬天應為 $3^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 為基準。許多水壩工程，大型筏基使用的混凝土體積實在太大，如果又採用大量水泥的條件下，混凝土澆置三天後溫度可能升高至 $70^{\circ}\text{C}$ 以上。此刻為了降低混凝土溫度需借助內部冷卻系統，以確保混凝土內外溫度差異小於 $11^{\circ}\text{C}$ ，同時並須延長濕養護時間，而噴水於表面上，有冷卻並排除巨積混凝土的熱量的作用，當然也會吸收熱量，並且隔離空氣溫度差異之功能。

降低溫度的方法，最直接的方法為控制發熱之源頭，即採用「降低水泥量」的方法，直接減低水化熱的主要供應來源。通常降低之溫度與水泥量減少數量成正比，圖 3-41 顯示，降低水泥量 13%，可降低溫度 15%，

遠比加入冰塊的效果（降低 9%）明顯而且有效。以目前低漿量之高性能混凝土使用水泥量為一般混凝土之一半，可預期水化熱及溫度將降低一半，這是以往技術上無法達到的目標。

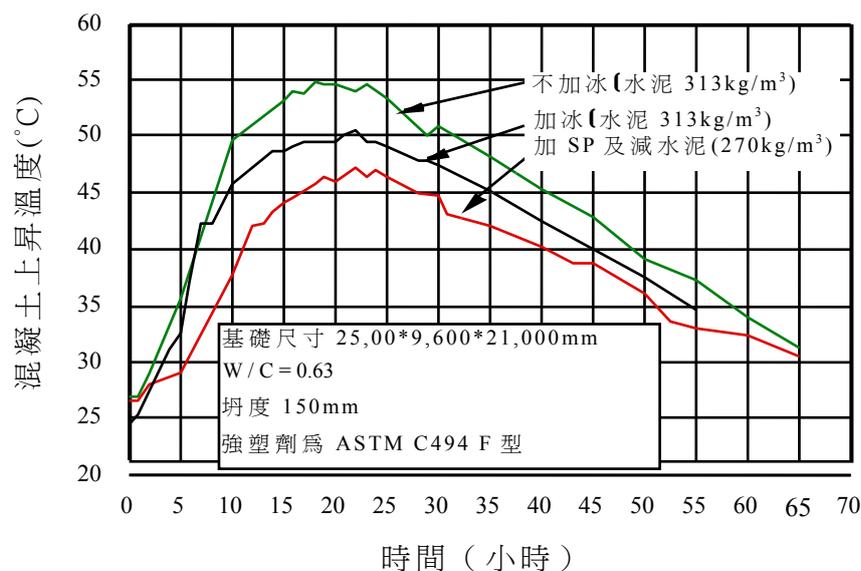


圖 3-41 利用降低水泥量達到降低混凝土水化熱的效果[4]

## (二) 熱天混凝土

在熱帶或亞熱帶區域，新澆鑄混凝土數小時後或隔天易產生大量的裂縫。這些典型的裂縫被稱之為「塑性裂縫」，亦即塑性狀態下混凝土表面上的龜裂。這種裂縫經常貫穿混凝土樓地板全深度，或貫穿鋪面結構全厚度，使結構的整體性無法確保。所以在塑性狀態就必須小心養護，尤其在陽光直射下，或直接受到強風吹襲，此時若再加上氣候乾燥及混凝土溫度過高之多重作用下，表面水蒸發速率將加大。如果比泌水速率大，或無充分水量供應下，又在混凝土表面張力強度不大時，則

「塑性裂縫」的產生幾乎無法倖免，除非有特別之遮蓋，或浸水養護的保護下。圖 3-42 顯示大氣條件（溫濕度及風速）與混凝土溫度之綜合結果對蒸發水量影響性。所以養護時，必須採用可以反射陽光的養護材料，以防混凝土溫度因水化累積過高，通常建議以浸水保持表面潤濕的養護方法補充水分。表 3-9 所示，為熱天混凝土可能之施工傷害及防止策略，基本策略為減少水的蒸發率，增加混凝土的抵抗能力。在混凝土施工前、中及龜裂發生時之因應對策，可以減少因裂縫產生而危及混凝土耐久性的機率。依據「混凝土工程施工規範與解說」，在「炎熱天候下，混凝土之產製過程可藉預冷之材料，或以薄冰屑代替全部或部份之拌和水，惟薄冰屑於拌和時須完全融化」。此規範之目的即在降低圖 3-42 中混凝土溫度，以降低蒸發速率。

熱天施工除了以上可能衍生之弊病外，另一項問題就是「坍度損失過大」，這點對於高流動化高強度混凝土常造成困擾。以致在實際施工時為了施工性，施工人員常加入大量的水來增加工作性、施工速度，間接造成強度劣化、龜裂、耐久性不佳、外觀不雅及大量乾縮等劣化基因，因此在台灣的天候情況是應被特別重視的。裂縫一旦產生，有害物質侵入混凝土內部的管道增加，將使得滲透性大為提昇，降低混凝土長期耐久性。因此，如何考量配比特性及良好的養護方法，降低或避免塑性裂縫的產生是相當重要的。參考 Bjontegaard,

Hammer, Sellevold 等多位學者所進行之裂縫敏感度試驗裝置，量測各組分別在  $23^{\circ}\text{C}$ ， $\text{RH}=50\%$ 之環境下，裂縫指數（各裂縫頭尾端裂縫平均寬度的總和）之大小，並繪製裂縫分佈圖，如圖 3-43 所示。不同水泥種類混凝土的  $\text{W/B}$ 、 $\text{W/S}$ 、 $\text{W/C}$  與裂縫指數之關係，如圖 3-44 所示。由圖中顯示，裂縫指數（CI）隨  $\text{W/B}$ 、 $\text{W/C}$  增加而增加，此乃低水膠比比， $\text{W/C}$  亦較低，水泥漿的抗張強度（ $f_t$ ）形成較早且較高，能抑制因毛細管張力所產生的塑性裂縫，減少早期塑性收縮裂縫和裂縫指數。而水膠比愈高，雖然水泥用量少，蒸發率較低，但  $\text{W/C}$  較高的情況下，水泥漿的抗張強度（ $f_t$ ）形成較慢且較低，能抑制毛細管張力所產生的塑性收縮之效果有限，故裂縫指數較大；然而，依蒸發率高低而言，低  $\text{W/B}$  的裂縫形成較早，但受抑制也比較早，相對的高  $\text{W/B}$  的裂縫發生較晚，但不易受抑制，此現象可說明及早進入養護工作的重要性。不同水膠比下，各種水泥種類混凝土與裂縫指數之關係見圖 3-45，圖中顯示，使用 Type I 與高細度爐石水泥之混凝土，裂縫指數相近，而中細度爐石水泥混凝土裂縫指數稍有增加，亦即爐石細度愈高，會加速爐石水泥水化反應，水泥漿的抗張強度提高，能抑制產生塑性裂縫。

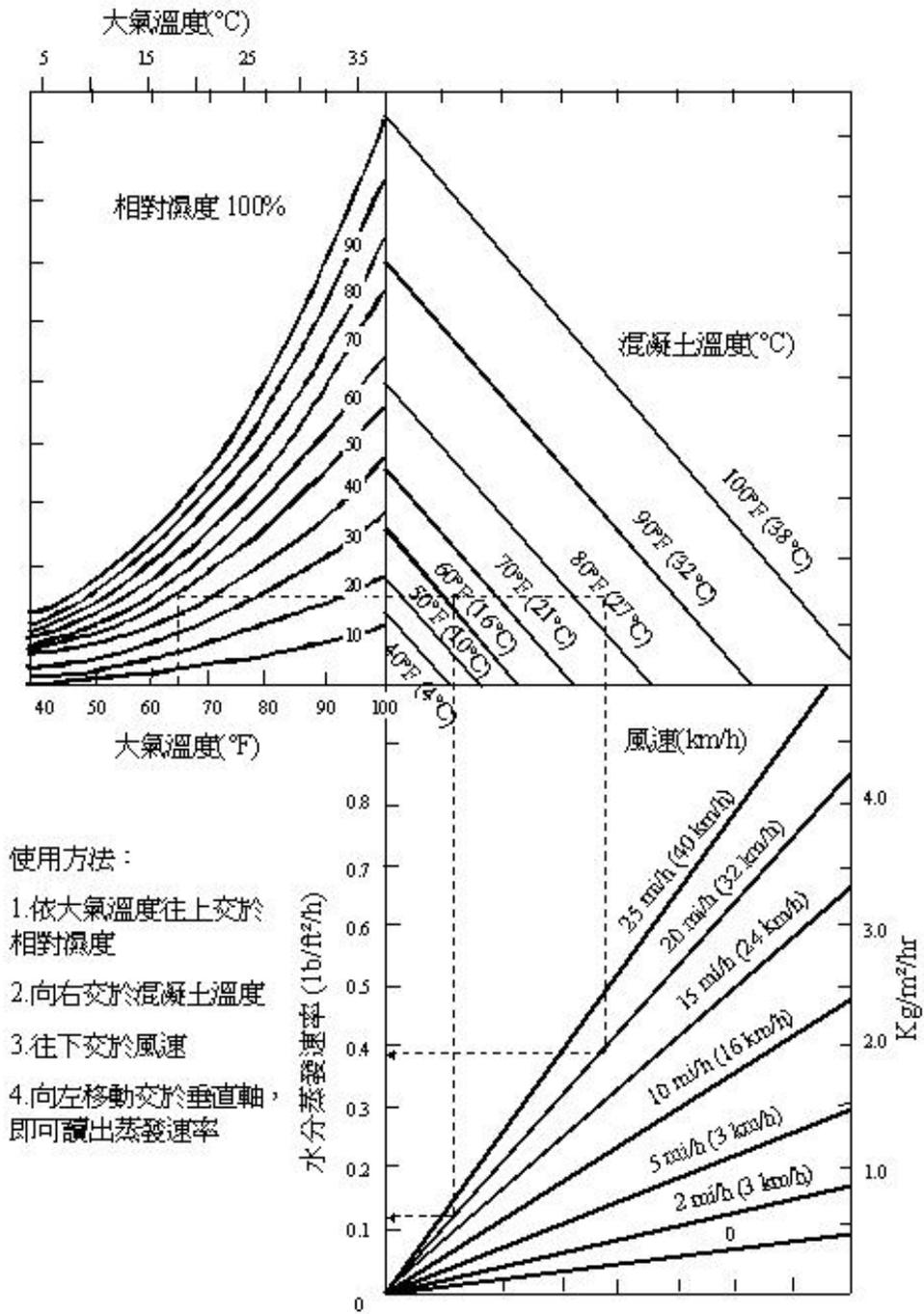
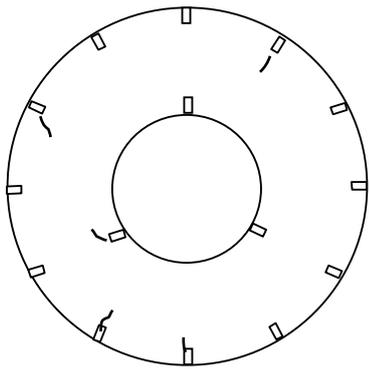


圖 3-42 混凝土溫度和大氣狀況混凝土  
表面水份蒸發量估計圖[4]

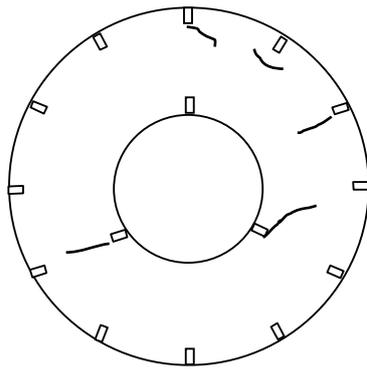
表 3-10 熱天混凝土施工品質對新拌及硬固狀態

可能傷害及防止策略[4]

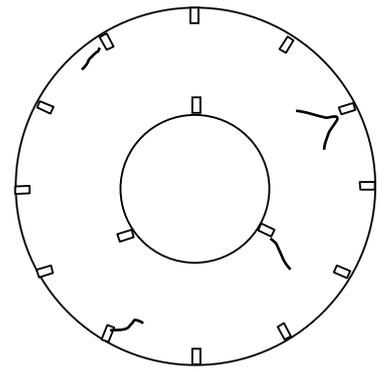
混凝土狀況	問題點	預防對策		
		施工前	施工中	龜裂發生時
新拌混凝土	增加需要拌和水量 加速坍度 損失增加 凝結速率 增加塑性 龜裂的傾向 甚難控制 輸氣量 迫切需要 急早養護	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 收集氣象資料，量測風速、氣溫、相對濕度</li> <li>2. 潤濕基層和模板</li> <li>3. 潤濕乾燥會吸水的骨材</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 冷卻骨材和拌和水，保持新拌混凝土之拌和溫度</li> <li>2. 以液態氮冷卻混凝土。</li> <li>3. 當澆置與修飾時有延緩現象發生時，以 PE 布等臨時覆蓋物遮蓋，以減少表面蒸發</li> <li>4. 在終飾和養護開始前以高分子蒸發延遲劑噴灑混凝土表面減少蒸發（注意此類物質不可有害混凝土）。</li> <li>5. 避免施工中的延遲作業，以減少澆置和開始養護的時間</li> <li>6. 終飾完成立即加以保護，浸泡水分，以防水份蒸發（此最有效）。</li> <li>7. 使用噴霧器以增加空氣中之相對濕度，直到可以其他方法養護時。</li> </ol>	<p>以鋁板將裂縫二面壓緊，重新整飾或重新振動再修飾，並立即採取防護措施</p>
硬固混凝土	減低強度 降低水密性 減低耐久性 造成外觀不均 增加乾燥收縮的傾向	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. 組立臨時擋風阻風設備，減低在混凝土面上之風速</li> <li>5. 組立臨時遮陽以減低混凝土表面溫度</li> <li>6. 使用液態氮氣冷卻混凝土材料</li> <li>7. 配比中添加緩凝劑</li> <li>8. 調整配比，降低水泥量</li> </ol>		



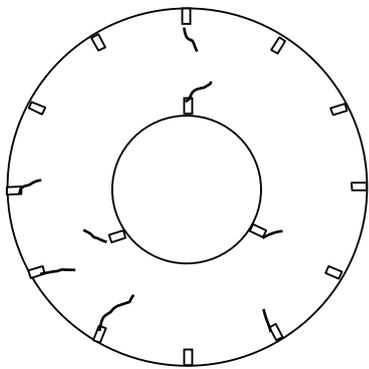
EC(I)-0.28



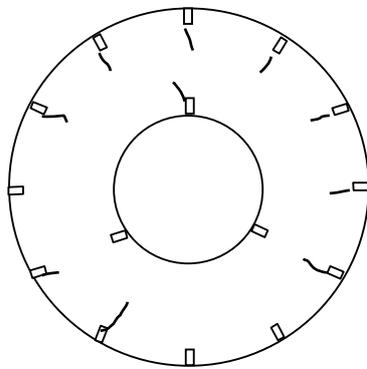
EC(M)-0.28



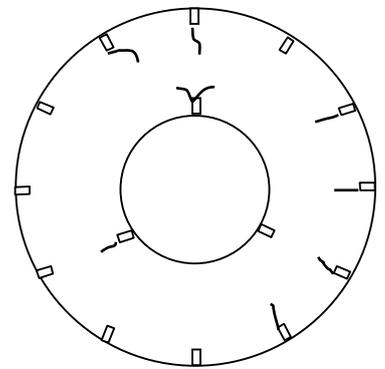
EC(H)-0.28



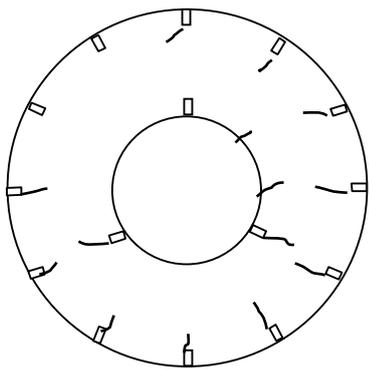
EC(I)-0.32



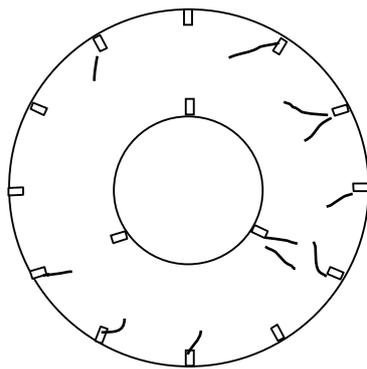
EC(M)-0.32



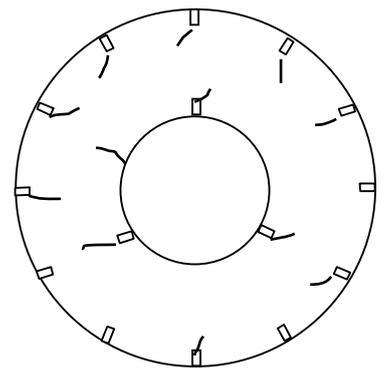
EC(H)-0.32



EC(I)-0.36



EC(M)-0.36



EC(H)-0.36

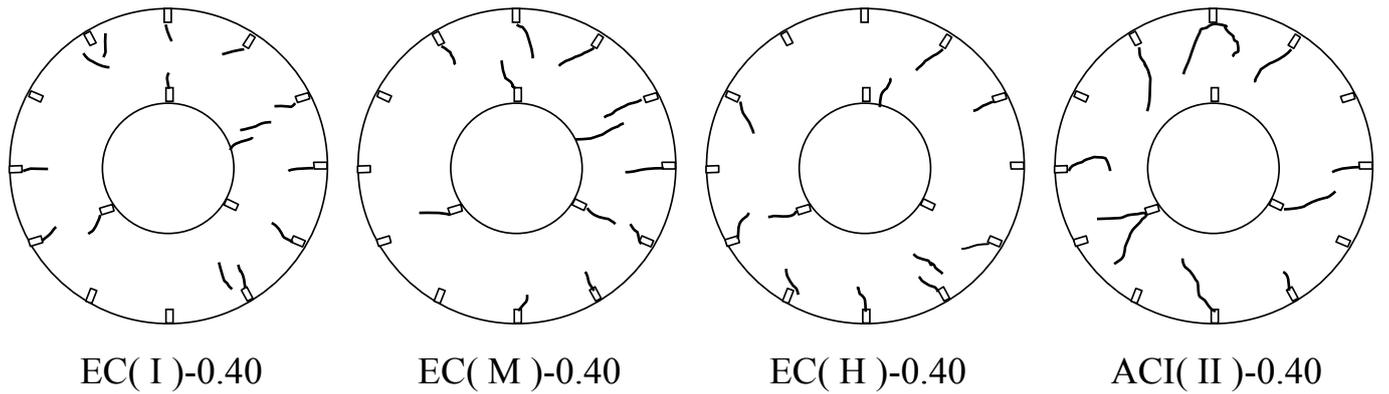


圖 3-43 混凝土之塑性收縮裂縫[4]

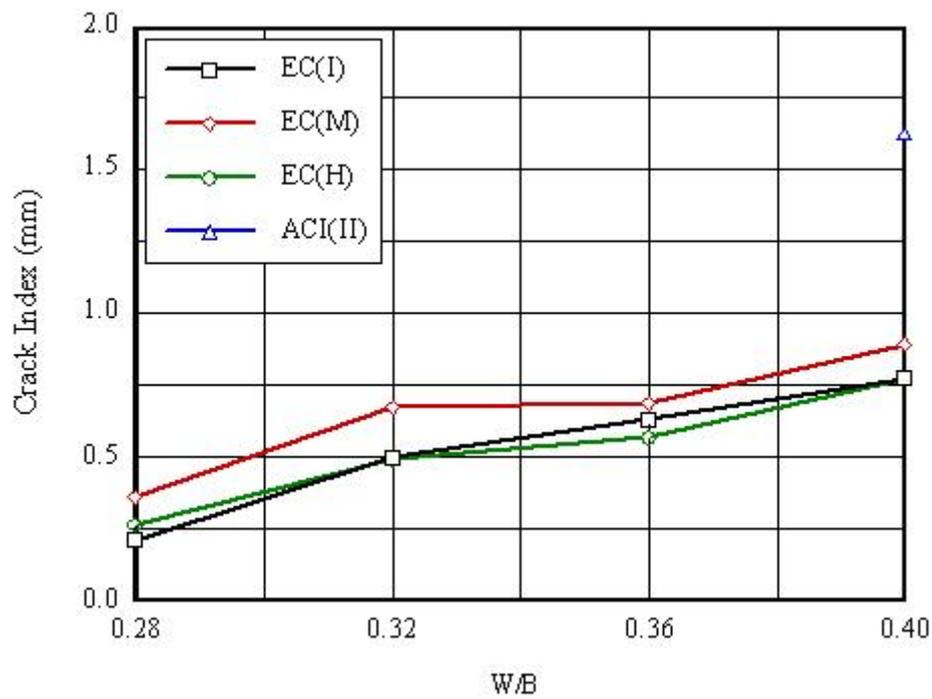


圖 3-44 不同水泥種類混凝土不同水膠比與裂縫指數之關係[4]

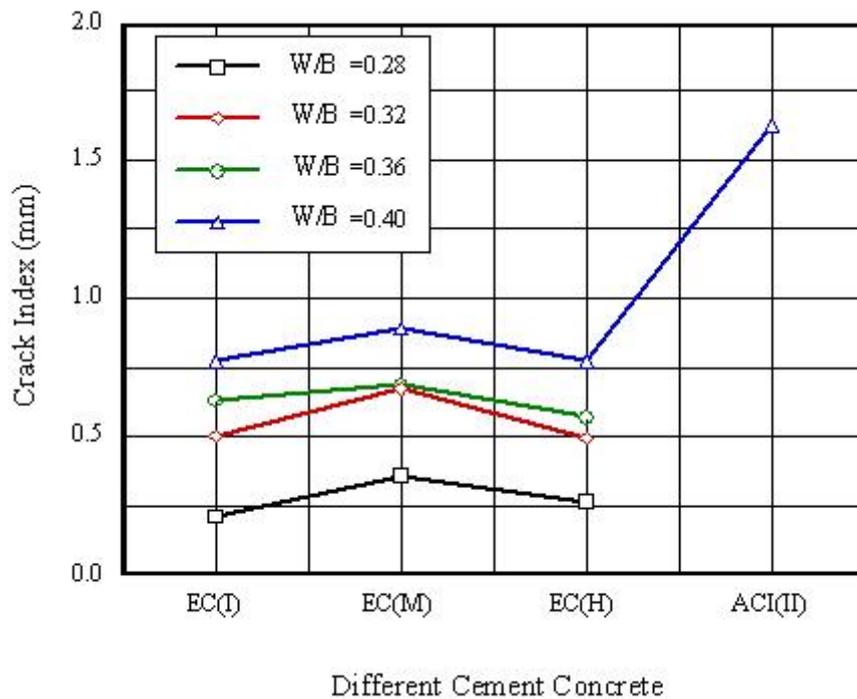


圖 3-45 不同水膠比不同水泥種類混凝土與裂縫指數之關係[4]

### 3-5 混凝土耐久性評估方法

#### 一、混凝土碳化對耐久性的影響

混凝土中的鋼筋鏽蝕，是造成混凝土結構耐久性損傷的最主要因素。而在一般大氣環境下，混凝土碳化則是混凝土中鋼筋鏽蝕的前提條件。因此，研究混凝土碳化及其預測模式，對混凝土結構耐久性評估具有重要的實際意義[34]。20世紀60年代，國際上一些先進國家就開始重視混凝土結構的耐久性問題。對混凝土碳化進行了大量的試驗研究及理論分析。中國大陸在20世紀80年代開始研究混凝土碳化與鋼筋鏽蝕問題，通過快速碳化試驗、長期暴露試驗及實際工程調查，研究混凝土碳化的影響因素與碳化深度預測模式。國內外經過40多年的研究，對於混凝土碳化機理與影響因素已經有了深刻的了解。並提出了很多碳化深度的計算

模式，為進一步研究混凝土中的鋼筋鏽蝕與混凝土結構壽命的預測提供了基礎。這些預測模式可歸納為三種類型：

1. 基於擴散理論所建立的預測模式。
2. 基於碳化實驗（快速碳化，長期暴露試驗及實際結構碳化調查）的經驗模式。
3. 綜合擴散理論與碳化實驗結果的預測模式。

基於上述類型，整理混凝土碳化模式如表3-11[35-43]所示。

表3-11 混凝土碳化深度預測模式[35-43]

文獻	預測模式	備註
35	$X = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}C_{CO_2}}{M_{CO_2}}} \sqrt{t}$	
36	$X = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}C_{CO_2}}{C_{CH} + C_{CSH} + 3C_{C_3S} + 2C_{C_2S}}} \sqrt{t}$ $D_{CO_2} = 1.64 * 10^{-6} e_p^8 (1-RH)^{2.2}$	$C_{CH}, C_{CSH}, C_{C_3S}, C_{C_2S}$ 分別是 $Ca(OH)_2, C-S-H, C_3S, C_2S$ 的濃度； $e_p$ 是已碳化混凝土孔隙率；RH是相對濕度
37	$\frac{W}{C} > 0.6; X = r_c r_a r_s \sqrt{\frac{\frac{W}{C} - 0.25}{0.3(1.15 + 3\frac{W}{C})}} \sqrt{t}$ $\frac{W}{C} \leq 0.6; X = r_c r_a r_s \frac{4.6\frac{W}{C} - 1.76}{\sqrt{7.2}} \sqrt{t}$	$r_c$ 是水泥型別影響因子； $r_a$ 是骨材種類影響因子； $r_s$ 是摻料影響因子
38	$X = r_1 r_2 r_3 \left( 12.1 \frac{W}{C} - 3.2 \right) \sqrt{t}$	$r_1$ 是水泥型別影響因子，礦渣水泥為 1.0，普通水泥為 0.5~0.7； $r_2$ 是飛灰影響因子，取代水泥量小於 15%，取 1.1； $r_3$ 是氣候影響因子，一般地區取 1.0，潮濕地區取 0.5~0.8，乾燥地區取 1.1~1.2
39	$X = k_{CO_2} k_T k_w \sqrt{t};$ $k_{CO_2} = (2.804 - 0.847 \log C_{CO_2}) \sqrt{C_{CO_2}};$ $k_T = e^{\left( \frac{8.748 - 2563}{T} \right)}; k_w = 2.94 \frac{W}{C} - 1.012$	$k_{CO_2}$ 是 $CO_2$ 濃度影響因子； $k_T$ 環境溫度影響因子； $k_w$ 水灰比影響因子

40	$\frac{W}{C} > 0.6; X = k \times 104.27 k_c^{0.54} k_w^{0.47} \sqrt{t}$ $\frac{W}{C} \leq 0.6; X = k \times 73.54 k_c^{0.83} k_w^{0.13} \sqrt{t}$ $k_c = (-1.019C + 9.311) \times 10^{-3}$ $k_w = (9.844 \frac{W}{C} - 2.982) \times 10^{-3}$	<p>K 是水泥型別影響因子，礦渣水泥為 1.43，普通水泥為 1，飛灰矽灰水泥取 1.56，飛灰礦渣水泥取 1.78；<math>k_c</math> 水泥用量影響因子</p> <p><math>K_w</math> 水灰比影響因子</p>															
41	$x = \sqrt{6000(R_{28} + 25)^{-0.15} \times 6 \sqrt{t}}$	<p><math>R_{28}</math> 混凝土 28 天抗壓強度 (MPa)</p>															
42	$X = 250 \left( \frac{1}{\sqrt{F_c}} + \frac{1}{\sqrt{F_g}} \right) \sqrt{t}$	<p><math>F_c</math> 混凝土抗壓強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)</p> <p><math>F_g</math> 假設不碳化的極限強度，<math>F_g = 625</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</p>															
43	<p>礦渣 400<sup>#</sup></p> $x = 570(5.41W/C - 1.00)C^{-0.9} \sqrt{t}$ <p>礦渣 500<sup>#</sup></p> $x = 495(4.98W/C - 1.00)C^{-0.9} \sqrt{t}$ <p>普通矽灰 300<sup>#</sup></p> $x = 463(4.79W/C - 1.00)C^{-0.9} \sqrt{t}$ <p>普通矽灰 400<sup>#</sup></p> $x = 450(4.70W/C - 1.00)C^{-0.9} \sqrt{t}$ <p>普通矽灰 500<sup>#</sup></p> $x = 407(4.23W/C - 1.00)C^{-0.9} \sqrt{t}$ <p>普通矽灰 600<sup>#</sup></p> $x = 380(4.08W/C - 1.00)C^{-0.9} \sqrt{t}$	<p>左式僅適用於北京地區室內環境，其他情況應乘以以下之比例係數</p> <table border="1" data-bbox="1034 898 1465 1160"> <thead> <tr> <th></th> <th>室內</th> <th>室外</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>北京</td> <td>1.00</td> <td>0.72</td> </tr> <tr> <td>西寧</td> <td>0.80</td> <td>0.66</td> </tr> <tr> <td>貴陽</td> <td>0.85</td> <td>0.54</td> </tr> <tr> <td>杭州</td> <td>0.85</td> <td>0.72</td> </tr> </tbody> </table>		室內	室外	北京	1.00	0.72	西寧	0.80	0.66	貴陽	0.85	0.54	杭州	0.85	0.72
	室內	室外															
北京	1.00	0.72															
西寧	0.80	0.66															
貴陽	0.85	0.54															
杭州	0.85	0.72															

## 二、氯離子滲透對混凝土耐久性之影響

氯離子侵蝕，是影響混凝土耐久性的另一個主要因素。由於氯離子的侵蝕，引起鋼筋銹蝕導致結構耐久性失效甚至破壞的現象屢見不鮮，已經引起了人們的注意。據調查分析，處於海洋環境下的海港碼頭、離岸工程、跨海大橋以及寒冷地區需要撒卻冰鹽的路橋工程，導致鋼筋銹蝕的主要原因是氯離子的侵蝕；氯離

子引起鋼筋銹蝕的機理與混凝土碳化不同。目前，碳化機理研究的比較充分，已有比較成熟的模型和大量的資料可供參考。氯離子極易穿透鋼筋的保護膜，當達到一定濃度時，能夠破壞鋼筋表面的鈍化膜[45]。當存在充足的氧氣和水分時，即使在碳化深度較淺時也能導致鋼筋銹蝕。普通混凝土結構抵抗氯離子侵蝕的能力非常低，許多工程現狀和相關結果都可以證明這一點。20世紀70年代以來，發達國家為了提高鋼筋混凝土結構的耐久性，開始高性能混凝土的研究與應用，並獲得了顯著效果[46]。2001年5月，中國大陸頒佈實施了海港工程混凝土結構防腐蝕技術規範[47]。高性能混凝土，在海港碼頭以及其他冬季需要撤卻冰鹽的路橋工程中的應用必將日益廣泛。研究低滲透性高性能混凝土，抵抗氯離子侵蝕的耐久性能具有重要意義。與普通混凝土相比，高性能混凝土的特點是低水膠比、摻用高效減水劑和卜作嵐材料。低水膠比以及摻加卜作嵐材料可以從微觀上改善混凝土的孔結構特徵，增強抗侵蝕的能力。人們往往根據「材料和配比基本相同的混凝土，強度愈高，則混凝土耐久性的試件抗滲性或抗氯離子滲透性、抗凍性也愈高」的事實，就直覺認為「混凝土強度愈高，結構的耐久性就愈高。」其實，這是誤導。世界著名的混凝土耐久性專家，美國加州大學的P.K. Mehta教授，最近，從總結20世紀混凝土結構耐久性教訓，展望新世紀如何建造耐久混凝土結構的高度，明確地指出了這是誤導。[48] 他說：20世紀30年代，水泥的 $C_3S$ 含量低，潛變大、乾縮率和熱脹冷縮率低，混凝土不易開裂。以後，大興土木，強調混凝土快硬、早強來加快施工進度。水泥工業的發展，為此提供了熟料 $C_3S$ 含量愈來愈高(大於50%)，細度愈

來愈高(大於 $350\text{m}^2/\text{kg}$ )的矽酸鹽(波特蘭)水泥，使混凝土早強、快硬。同時，混凝土早齡期的潛變減小，彈性模數和乾縮率、熱脹冷縮率也相對地增高。混凝土變得更脆，更易開裂。這種脆性，在尺寸小、約束變形小的試件上，並不明顯。但在乾濕頻繁、冷熱、凍融交替或海水浪濺及用却冰鹽化雪的侵蝕環境條件下的大尺寸結構上，卻因此愈來愈容易開裂，而大大地降低了結構的耐久性。須知：在一般的混凝土內，由於泌水積存於粗骨料顆粒或鋼筋底部，使水泥砂漿與它們的介面層水灰比較大、強度較低、更易形成微裂縫。即使混凝土結構表面只出現少量不連續的細裂縫，也可以讓侵蝕介質輕易的滲入，從而大大降低結構的耐久性。一般混凝土結構，過去採用的混凝土強度等級不高，施工不太強調混凝土快硬、高強，反而不太容易開裂。現在，廣泛採用泵送、振搗快硬高強的商品混凝土，都普遍存在施工期間頻繁發生構件開裂問題。大陸交通部第一航務工程局針對北方海港大量新、舊鋼筋混凝土碼頭的耐久性問題作過一次全面系統的調查，也發現綜合其趨勢是，建造的年代愈久，結構的耐久性也愈好，都驗證了上述論點[49]。值得指出的是：美國各州公路工程師協會(AASHTO)，鑒於使用却冰鹽的大多數鋼筋混凝土路橋，由於鹽分滲入混凝土，促使鋼筋廣泛嚴重鏽脹破壞，為提高結構耐久性，於1974年修改了相關規範。將混凝土的最大水灰比限值從0.53降為0.4~0.45，28天混凝土最低強度等級定為30MPa，最小水泥用量相應地增加到 $360\text{kg}/\text{m}^3$ 。但是，實際上，由於上述原因，使混凝土變脆，調查表明，即使低水灰比，在用卻冰鹽的許多路橋結構上，乃嚴重開裂，並沒有提高結構的耐久性[50]。另一方面，隨著高效

減水劑和大量優質工業副產品—水淬高爐礦渣粉和粉煤灰的開發，上世紀末，國內外大量研究試驗與工程實務已充分證實充分濕養護的高性能混凝土，是可以從根本上解決新建鹽污染鋼筋混凝土結構的耐久性問題的；是可以保證具有百年以上使用壽命的。這種混凝土是低水灰比「低達0.35~0.40、低水泥用量、同時摻加適量高效減水劑，必要時還加輸氣劑和卜作嵐摻料」的混凝土；它不泌水，既能節約資源，有利於環保，又能顯著改善混凝土孔隙結構、抗裂性並提高混凝土抗氯離子滲透性。要真正配製優質的高性能混凝土，還有一個很重要的前提，就是最好採用純熟料波特蘭水泥（歐美各國都是統一這樣稱呼的），按具體工程需求，外摻適量優質卜作嵐摻料和化學摻加劑。為確保設計使用壽命，設計人員在設計階段，對高性能混凝土等防腐蝕措施，需要有一種快速可靠而簡易的量化測試技術，迄今這還是一個舉世關注的重要問題。國外近十年在這方面有長足進展，據瞭解歐盟1999年已完成了名為DuraCrete的有關混凝土耐久性設計的聯合研究項目，出版了一系列的研究報告。提出了一套預測使用壽命的「耐久性設計與再設計指南」[51]。下面就使用壽命預測方法作一簡介：氯化物對混凝土的滲透是擴散與毛細管吸附等多種機理不同組合的綜合結果，但以擴散為主，所以公認可以近似地用有效擴散係數加以表示。1970年，義大利Collepard等假設氯化物在混凝土中的擴散符合Fick擴散定律，可以Fick第二擴散定律的誤差函數解表述下列關係。

$$C_{cr} = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t_0}} \right]$$

式中， $C_s$  為混凝土表面的氯化物濃度， $x$  為混凝土保護層厚度，

$D_c$  為混凝土氯化物有效(表觀)擴散係數,  $t_o$  為從竣工到鋼筋開始腐蝕的齡期(即這裏所說的預期的使用壽命),  $C_{cr}$  為鋼筋開始腐蝕時的鋼筋與混凝土的界面孔隙中的氯化物濃度。它的應用前提是  $D_{cl}$  和  $C_s$  為不隨時間改變的恒定值。以規定的  $x$  值, 和從早齡期(如1-3個月)混凝土上試驗獲得的  $C_s$ 、 $D_{cl}$  值, 加上參照類似混凝土以往實驗或工程耐久性調查獲得的  $C_{cr}$  值, 按上式即可求出預測的使用壽命( $t_o$ ), 相關研究如表3-11所示。但是, 從1992年起, 發現上式的前提在早齡期混凝土上, 實際是不存在的。因為, 眾所周知, 混凝土是非均質、多相、有活性的毛細管多孔體。研究表明: ①一般, 混凝土(特別是摻加火山灰質摻料及摻量較多的高性能混凝土)的水泥水化反應和火山灰化反應至少要持續6個月。②另外, 在氯化物沿毛細孔道或裂縫的充水連通部分滲入混凝土的過程中, 會與孔(縫)壁的水化產物和火山灰反應產物化學結合與物理吸附, 只有剩餘在孔液中乃呈游離態的氯化物離子(與被結合部分呈動態平衡)才繼續參與滲入(擴散)過程。而這種結合, 因溫度、氯化物濃度、膠結材料種類等而異。③由於混凝土澆築過程中, 混凝土表層易為水泥漿體所聚集, 濕養護也不如內部實體那麼充分, 所以混凝土在孔結構與氯化物擴散性方面是表裡不一的。總之, 混凝土的氯離子擴散係數( $D_{cl}$ ) 事實上是隨著齡期和離混凝土表面距離而變化的, 尤其是在水泥水化與卜作嵐反應(火山灰化反應)的初期。此外, 驅使氯化物向混凝土內擴散的混凝土表層孔液的氯化物離子濃度( $C_s$ ), 主要是隨周圍環境的氯化物濃度而變的(也受混凝土表層孔隙結構的影響)。實際調查證實, 海洋、却冰鹽和鹽鹼地有區別, 就是同一座結構, 不同部位和坐向, 也會因為浪

濺、乾濕交替，雨淋程度不同，產生較大差異。而 $C_s$ 也是隨時間變化的，如有的認為，對於環境氯化物濃度較為持續穩定的海洋、海岸工程結構，可以 $C_s = S\sqrt{t}$ 表示，而對於只在冬天撒却冰鹽的公路(如使用壽命僅20-40年)則要經過5年才在深13mm處達到趨近於穩定的 $C_s$ 值，所以應該視實際情況分別選取適當的 $C_s$ 經驗值。在工程實務中，重要的是許多混凝土厚度不夠(橋面板肋的保護層厚度有一半以上是不合格的)及却冰鹽使氯化物滲入混凝土中。英國 Browne(1980)按德國 Klopfer (1978)實測的關於外部混凝土碳化深度的大量資料，歸納出的混凝土碳化深度、強度等級與齡期的關係曲線(圖3-46的左邊一組曲線)英國、香港、澳大利亞的四十座海工鋼筋混凝土結構上，鑽取大量混凝土試樣，實測強度與氯離子濃度在斷面上的分佈，並按活化鋼筋的Cl臨界濃度為水泥用量的0.4%繪出相應的一套曲線(圖3-46的右邊那組曲線)對比中可以看出，同樣是C45級混凝土，如果鋼筋去鈍化時間都是50年，則在一般的碳化環境中，混凝土最小保護層厚度只需10mm；而在含氯化物的環境中，就至少需要70mm，可見氯化物引起的鋼筋去鈍化，一般要比混凝土碳化引起的鋼筋去鈍化嚴重得多。實際上，在海岸浪濺區，混凝土由於氯化物滲透到鋼筋而因鋼筋鏽層脹裂時，混凝土的碳化深度還僅僅是厚1至數毫米的表層。由圖3-47所示，水膠比越高極化電阻越低，鋼筋越容易鏽蝕。另由圖3-48所示，混凝土添加卜作嵐材料，在相同的保護層條件下，其服務壽命較佳。圖3-49顯示，混凝土滲透係數與強度成反向關係。圖3-50顯示，品質越佳、鋼筋保護層越厚其服務壽命越長；圖3-51顯示，爐石水泥在不同的pH值條件下，其滲出量較一般水泥為低，驗證添加卜

作嵐材料的效益。

表3-12 氯離子滲透與預測相關研究[56-59]

文獻	預測模式	備註
56	$Decl- = \frac{RTJ}{CupFU}$	$R$ : perfect gas constant ( $8.32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ); $T$ : temperature (K); $J$ : ionic flux ( $\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ); $F$ : faraday's constant ( $96487 \text{ C.mol}^{-1}$ ).
58	$C = C_0 \text{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dappt}}\right)$	$C_0$ is the chloride level at $x=0$ , constant $D_{app}$
59	$D_{aTSL} = D_{aTc} \left(\frac{T_c}{T_{SL}}\right)^\alpha$ $T_{SL} = T_c \left(\frac{X_{cover}}{\xi \sqrt{T_c D_{aTc}}}\right)^{\frac{2}{1-\alpha}}$	$\xi = 2\text{erfc}^{-1}(C_{cr}/C_s)$

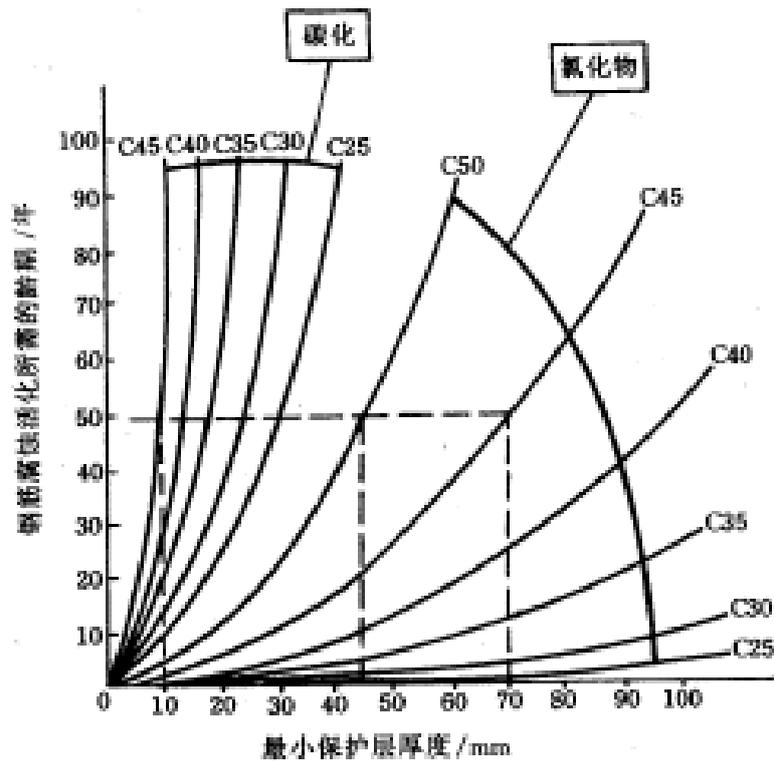


圖 3-46 混凝土內鋼筋腐蝕活化齡期建議圖[61]

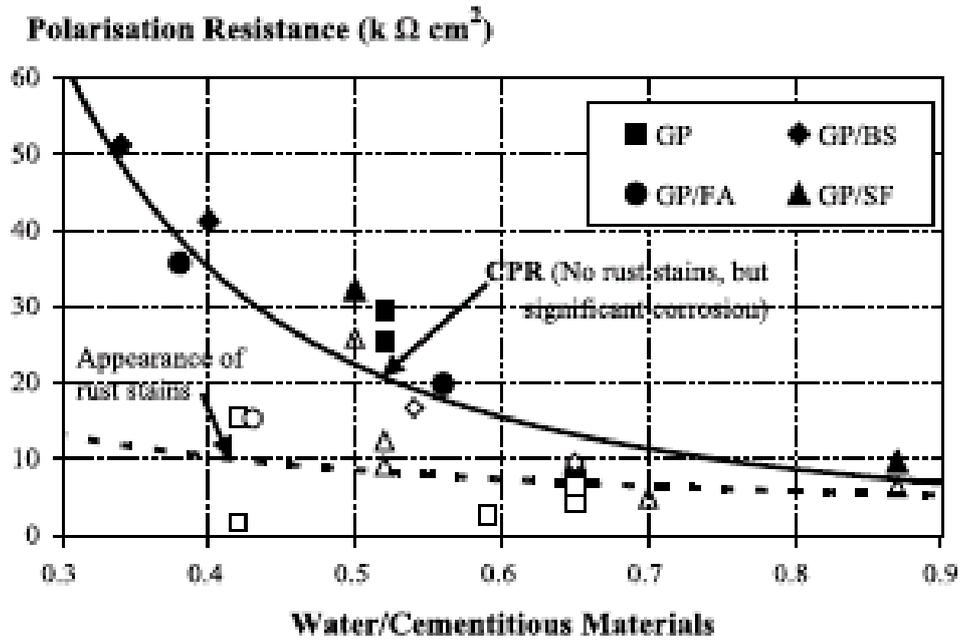


圖 3-47 混凝土極化電阻與水膠比關係圖[60]

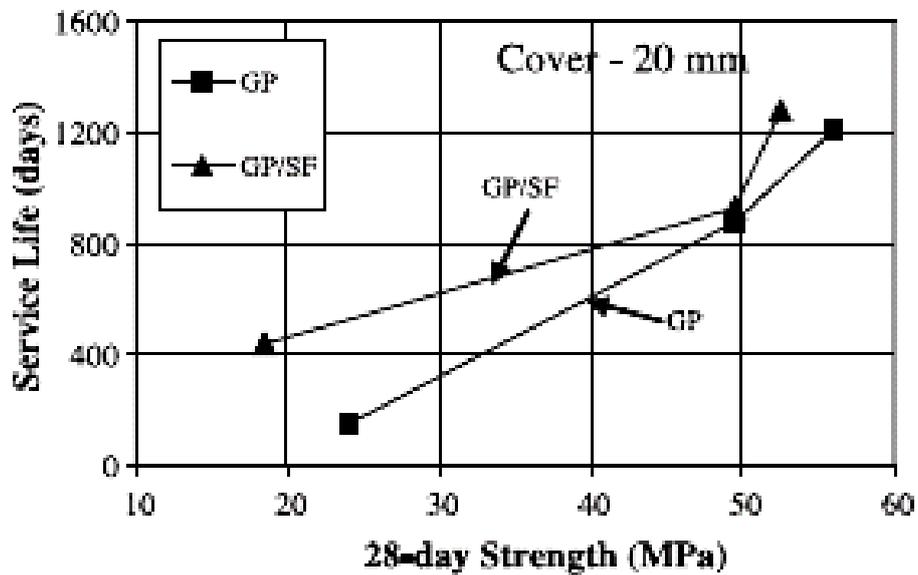


圖 3-48 不同配比混凝土其強度與服務壽命關係圖[60]

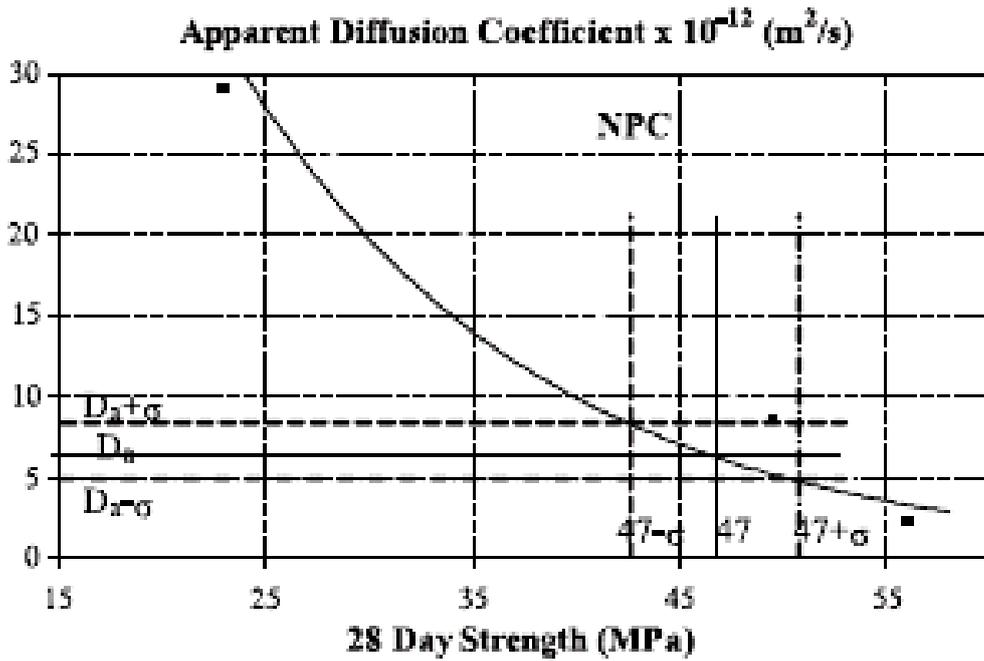


圖 3-49 混凝土強度與擴散係數關係圖[59]

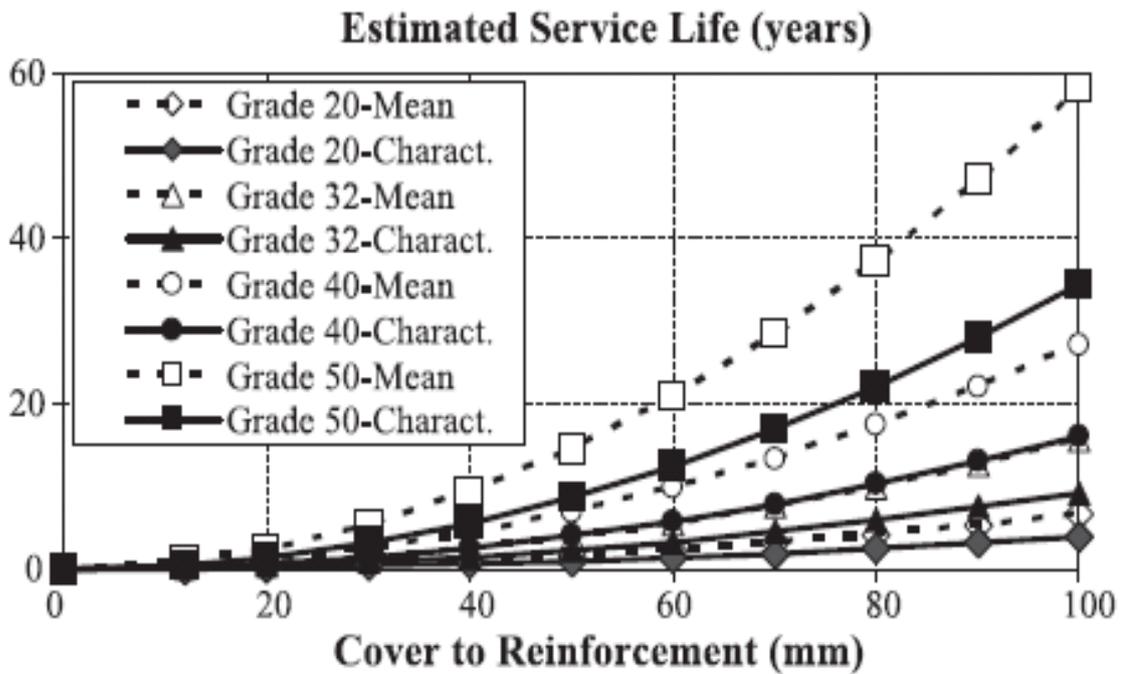
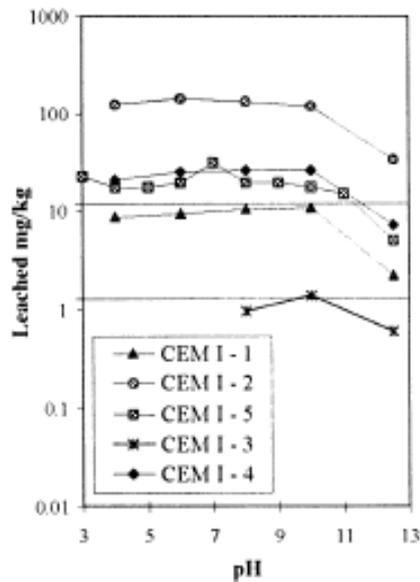


圖 3-50 不同等級混凝土其內鋼筋保護層厚度與服務壽命關係圖[59]

## PORTLAND CEMENTS



## SLAG CEMENTS

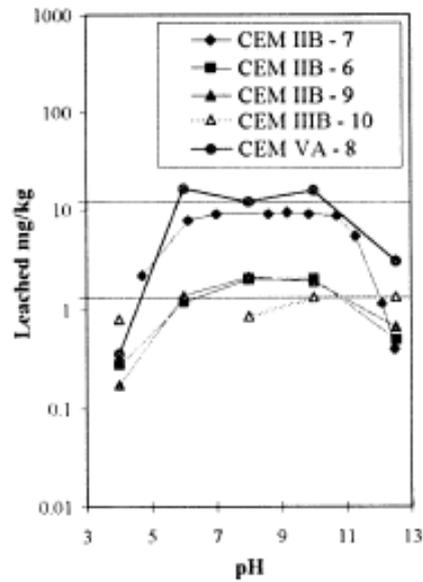


圖 3-51 不同種類水泥混凝土在不同 pH 值之滲出圖[62]

### 肆、混凝土結構耐久性設計及導則

混凝土結構及其構件的耐久性應根據不同的設計使用年限及其相應的極限狀態和不同的環境類別及其作用等級進行設計。同一結構中的不同構件或同一構件中的不同部位由於所處的局部環境條件有異，應予區別對待。結構的耐久性設計必須考慮施工品質控制與品質保證對結構耐久性的影響，必須考慮結構使用過程中的維修與檢測要求。結構的設計使用年限應按工程的實際需求，設計使用年限；對於特殊重要的結構物、其設計使用年限甚至大於 100 年（如放射性廢棄物處置設施）。

#### 4-1 耐久性設計考量事項

由前述，混凝土結構的耐久性設計一般應包括：

- 1.耐久混凝土的選用，混凝土原材料選用(水泥種型別，摻和料種類，骨材種類與品質要求等)、混凝土配比的主要參數(最大水膠比、最大用水量、水泥用量、最小膠結材料用量等)及輸氣等要求，根據需要提出混凝土的氯離子擴散係數、抗凍耐久性指數或抗凍等級等具體指標在設計施工圖和相應說明中，必須標明水膠比等與耐久混凝土相關的重要參數和要求。
- 2.與結構耐久性有關的結構構造措施與裂縫控制措施
- 3.為結構使用過程中的檢測、維修或部件更換，設置必要的通道和空間。
- 4.與結構耐久性有關的施工品質要求，特別是混凝土的養護方法(包括溫度和濕度控制與養護期限)以及保護層厚度的品質控制與品質保證措施在設計施工圖上應標明鋼筋的混凝土保護層厚度的施工誤差及混凝土施工養護要求。
- 5.結構使用階段的定期維修與檢測要求。
- 6.當環境作用非常嚴重或極端嚴重時，應考慮是否需要採取防腐蝕附加措施，如局部選用環氧塗層鋼筋，在混凝土組成中加入腐蝕抑制劑或水溶性聚合物乳液，在混凝土表面上塗刷或覆蓋防護材料，甚至採用陰極保護等。此外，還可考慮在混凝土澆築成型中採用特殊的織物襯裏透水模板以有效提高表層混凝土的密實性[63]。採用防腐蝕附加措施，尤其是防腐新材料和新技術的使用，需通過專門的論證。
- 7.對於可能遭受氯鹽引起鋼筋銹蝕的重要混凝土工程，

宜根據具體環境條件和適當的材料劣化模型，進行結構使用年限的驗算。不同設計使用年限的結構物，在不同環境作用下需要進行耐久性設計。

#### 4-2 提高混凝土結構耐久性的設計原則

對於如何提高混凝土結構耐久性的設計原則如下：

- 1.採用的結構類型、結構佈置和結構構造應盡可能有利於阻擋或減輕環境對結構的作用，便於施工並有利於保證施工品質，便於工程今後使用過程中的檢查和維修。
- 2.選用品質穩定並有利於改善混凝土緻密性和抗裂性的水泥和骨料等原材料；盡可能降低混凝土的「拌和水用量與水膠比」，並在混凝土組成中摻入適宜的卜作嵐摻料、高效減水劑等。
- 3.增加鋼筋的混凝土保護層厚度。
- 4.注重防、排水和密封等構造措施，盡可能避免水和氯鹽等有害物質接觸混凝土表面，盡可能防止混凝土在使用過程中遭受乾濕交替。
- 5.從混凝土耐久性出發，提出混凝土施工品質的要求，特別是混凝土養護的溫、濕度控制。
- 6.對於嚴重環境作用下的重要工程，宜採取多重防護對策，即綜合採用多種的防護措施，可以在一種措施失效後啟動下一種措施，如結構銹蝕後啟動陰極保護；也可以多種措施同時平行作用，如同時採用腐蝕抑制劑和鋼筋表面塗層等。
- 7.同一結構中使用相同材質的鋼筋，有利於降低鋼材的電化學銹蝕速度。
- 8.混凝土結構的耐久性設計，需考慮到混凝土構件開始暴露于環境

作用時的不同齡期對耐久性的影響。應儘量設法延遲，新澆混凝土開始與氯鹽接觸或遭受冰凍的時間。

9. 當結構所處的環境作用等級非常嚴重或極端嚴重時，應在設計中提出必須進行結構使用年限內的定期檢測要求。第一次檢測需在結構竣工使用後的3~5年內進行，並根據測試結果對結構的耐久性做出評估。除目測外，檢測的重點在於確定表層混凝土的劣化現狀，如混凝土的碳化深度，混凝土表層內不同深度處的氯離子濃度分佈，鋼筋的銹蝕或銹蝕傾向等。以後的定期檢測間隔一般不超過10年。對於重要工程，應在設計階段提出結構全壽命檢測的詳細規劃，在工程現場設置專供檢測取樣用的構件。後者在尺寸、材料、配筋、成型、養護以及暴露環境條件上，應能代表實際的結構構件，必要時還可在結構構件的代表性部位上設置感知套件，以監測銹蝕發展。
10. 結構使用年限或使用壽命的驗算以及使用階段的檢測規劃可委託專業的研究、諮詢機構完成並通過驗證。

#### 4-3 耐久性混凝土的材料選擇

混凝土結構的耐久性設計應對混凝土原材料的選用與混凝土水膠比等主要的配比參數提出具體要求，使混凝土有良好的抗侵入性、體積穩定性和抗裂性。以下是配製耐久混凝土的一般要求：

1. 選用低水化熱（儘量降低水泥用量）和含鹼量低的水泥，儘可能避免使用早強水泥和高 $C_3A$ 含量的水泥。
2. 選用堅硬、級配合格、粒形良好的潔淨骨料。
3. 使用優質飛灰、爐石等礦物摻料或複合礦物摻料；除特殊情況外，礦物摻料應作為耐久混凝土的必需組成材料。

4. 使用符合規範(ASTM C494)相關規定之優質化學摻料作為配製耐久混凝土的必要手段。
5. 儘量降低「拌和水用量」，為此應外加高效減水劑或有高效減水功能的複合摻劑。
6. 限制混凝土配比中，膠結材料的最高用量。因此，應特別重視混凝土骨料的級配以及粗骨料的粒形要求。
7. 盡可能減少混凝土膠結材料中的「水泥用量」。
8. 混凝土的最低強度、最大水膠比、和混凝土配比中膠結材料的最低用量，但單方混凝土的膠結材料總量不宜高於400(30MPa以下)、450 (40~50MPa)和500 (60MPa以上) $\text{kg/m}^3$ 。在滿足最大水膠比限制和結構強度設計所要求的混凝土最低強度的前提下，不宜要求混凝土的早強。大摻量礦物摻料的混凝土水膠比不宜大於0.40。
9. 硫酸鹽等化學腐蝕介質作用下的混凝土，不宜只使用水泥膠結材料，視環境作用應在水泥中加入適量的礦物摻料。
10. 氯鹽環境下的配筋混凝土應採用較大摻量礦物摻料的低水膠比混凝土。單摻飛灰的摻量不宜小於25%，不宜單摻磨細爐石，且宜複合使用飛灰、矽灰、飛灰加爐石或兩種以上的礦物摻料。同時，應嚴格限制混凝土各種原材料(水泥、礦物摻和料、骨料、外加劑和拌和水等)中的氯離子含量，儘量降低從原材料增加混凝土中的氯離子。新拌混凝土硬化後，實測混凝土中的氯離子含量對於鋼筋混凝土不應超過膠凝材料重的0.1%
11. 氯鹽環境下的配筋混凝土重要工程，宜在設計中提出混凝土抗氯離子侵入性的指標，作為混凝土耐久性品質的一種控制標

準。

#### 4-4 放射性混凝土結構耐久性評估

目前混凝土結構的耐久性評估研究主要有：

##### (一) 可靠度理論的混凝土結構耐久性評估與設計

文獻[64]，針對影響鋼筋混凝土梁耐久性因素分析的基礎上，以可靠度理論對既有鐵路橋梁在單位時間內的損壞機率進行評估。並根據剩餘使用期限內的損壞機率與單位時間內的損壞機率的簡單比例關係，對該梁剩餘使用壽命進行評估。而文獻[65~67]考慮了結構強度隨時間的遞減性對結構可靠度之影響，建立鋼筋混凝土結構耐久性分析方法。

##### (二) 模糊數學理論的混凝土結構耐久性綜合評估

文獻[68]建議以模糊數學理論的回歸分析法，將混凝土碳化趨勢模擬為一模糊區域，取區域中之對應隸屬函數。文獻[69]以模糊集理論評估橋樑的現況，將材料特性、橋樑的幾何特性以及載重為主要參數，進行橋梁的承载力評估，並以權重方式來表示橋樑的損傷情況。

##### (三) 混凝土結構耐久性專家系統評估

80年代後期，美國以多年來對混凝土耐久性所進行研究為基礎，建立了第一個建築材料的專家系統—Durcon系統(Durability Concrete)[70]，它是由美國國家標準局及美國混凝土耐久性委員會(ACI 201)共同研發，專門用於提高混凝土耐久性而進行混凝土設計方案的決策標準系統[71~73]。文獻[74]用專家系統來分析水工鋼筋混凝土

土結構的損壞狀況，試以模仿人類專家決策的機理，發展一種決策方法對建築物的損傷情況進行評估。

#### (四) 類神經網絡的結構耐久性評估與預測

由於結構物和外界環境的複雜性，使得混凝土結構耐久性評估結果與影響因素之間關係甚難模擬，因此，近年來由於類神經網絡的結構評估、預測技術進展快速。文獻[75]提出以類神經網絡的結構耐久性多目標評估法，以結構裂縫寬度、撓度作為耐久性評估網絡的輸入參數，並妥善解決網絡空間分佈不均造成網絡收斂速度與精度的問題。另有文獻[76]則以類神經網絡與響應面法結合結構可靠度分析法，以其可靠度指標對受海水侵蝕的混凝土結構物進行耐久性評估，該方法建立之類神經網絡模式，對於混凝土耐久性之預測可得良好的結果。

綜合上述，雖然研究成果豐碩，但是由於混凝土結構本身特性和使用環境複雜，在耐久性評估、預測、混凝土品質管制及結構損傷等相關問題乃須進一步深入研究。本計畫執行時程有限，現階段針對材料性能進行比較評估。由於混凝土組成材料複雜，且混凝土品質與施工水準亦有密切關係，所以甚難論斷那種模式較佳。而有關最終處置場混凝土工程障壁耐久性相關設計、評估資料蒐集中，最多只有設計強度 $>350\text{kgf/cm}^2$ 及掩體設計厚度等資料，甚少針對混凝土材料作深入論述。本研究由於現階段的研究時程短促，尚有相關研究參數未完全建立，因此以現有的研究數據進行比較分析。由前述，針對目前台灣環境狀況的評估與現有環境條件近似且以耐久性設計

之工程「加拿大跨峽大橋」100年壽命設計要求的混凝土性能與本研究驗證之混凝土性能相互比較分析。本研究依緻密配比法所配製之混凝土，以傳統混凝土透水試驗（達西定律 Darcy's Law），無法求出其滲透係數。因此，依 AASHTO T277 (ASTM C1202-93) 建議使用氯離子加速電滲法評估混凝土的抗蝕能力。因為氯離子比水分子的滲透力更強，所以當氯離子無法滲入混凝土內部時，水分子將更難滲入，則應有較佳的耐久性。而加拿大跨峽大橋設計者要求以使用氯離子擴散試驗，評估其所暴露環境的服務壽命。混凝土氯離子擴散係數要求須小於「 $4.8 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ 」，在保護層厚度為 75mm，達到鋼筋腐蝕之氯離子濃度為 0.4%（水泥重量， $1.6 \text{kg}/\text{m}^3$ ）所須時間為 60 年。但加速試驗與所處環境不同，當達到  $1.6 \text{kg}/\text{m}^3$  氯離子濃度時，實際環境不一定會發生腐蝕反應。因為在正常情況下混凝土結構會隨時間越來越緻密其阻抗性會提高，氯離子更不易侵入，所以正常滲透速率下其服務壽命遠大於 60 年。表 4-1、4-2 是本研究部份配比與加拿大跨峽大橋配比之耐久性指標之比較。要達到跨峽大橋的設計性能，混凝土(W/B)應小於 0.4，氯離子電滲量為 750 庫侖（<1000 庫侖），而氯離子擴散係數只有跨峽大橋設計要求的 1/77（非加速試驗）和 1/15（加速試驗），而抗壓強度亦大於其設計強度（90 天=60MPa），顯示本研究配比能滿足高耐久性的設計須求。在氯離子滲透方面，核能研究所對本研究配比 W/B=0.32 和 0.4，齡期 28 天後，以 Fick's Law（第二定律）進行氯離子擴散試驗，並依試驗數據所建立之 Error Function 推測，當達到跨峽大橋氯離子限制值（0.4%水泥重）時，混凝土不同保護層厚度的服務年限。試驗所使用之氯離子濃度為

3M(mole)，計算擴散係數時則採用前述台灣沿海的平均氯離子濃度 19500ppm 為表面濃度。當擴散深度達到容許濃度為 1440ppm(0.4% weight of cement)，依所須擴散年限來預測本研究配比之服務年限。驗證結果如圖 4-1 所示，服務年限推測如表 4-3 所示。表中顯示本研究配比 W/B=0.4，保護層厚度 40mm 以上其預測服務年限可以達 100 年以上，較跨峽大橋保護層厚度為 75mm，僅有 60 年（僅就混凝土性能討論）的壽命高出甚多。另外，本研究之氯離子擴散實驗，條件較加拿大跨峽大橋嚴苛。因此在施工妥善且有足夠保護層（ $\geq 75\text{mm}$ ）的前題下，服務年限應可滿足低放射性廢棄物的管制年限。

表 4-1 加拿大跨峽大橋設計需求 [77]

設計需求		配比設計	
91 天抗壓強度	60MPa	水泥	430kg/m <sup>3</sup>
最少膠結料量	450kg/m <sup>3</sup>	飛灰	45 kg/m <sup>3</sup>
最大 W/B	0.34	砂	705 kg/m <sup>3</sup>
水泥種類	10SF (7.5% 砂灰)	石子	1030 kg/m <sup>3</sup>
飛灰	最多 10%	水	145 kg/m <sup>3</sup>
氯離子電滲量 (ASTM C1202)	< 1000 庫侖	減水劑	1.8 l/m <sup>3</sup>
含氣量	5-8% ( $\leq 230 \mu\text{m}$ )	強塑劑	3.2 l/m <sup>3</sup>
氯離子滲透係數	< $4.8 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$	含氣量	依需求
電阻係數	50k $\Omega$ -cm	坍度	180 $\pm$ 40mm

表 4-2 耐久性指標比較[77]

W/B	W/C	W/S (%)	Diffusion Coefficient( $10^{-11}\text{cm}^2/\text{s}$ )				Concrete Resistivity ( $\text{K}\Omega\text{-cm}$ )	Charge Passed (Coulombs)	Compressive Strength (MPa)	Remark
			Air Curing		Water Curing					
			N*	A**	N	A				
0.32	0.34	6.79	480		-		> 50	< 1000	60(91d)	Canada Confedreation
0.32					7.32	55.88	43	887.4	65.36	Ec(I)
0.32					6.21	32.83	65.5	525.6	65.51	Ec(M)
0.32							68	539.1	77.1	Ec(H)
0.36							45.5	942.3	64.64	Ec(I)
0.36							68	620.1	63.85	Ec(M)
0.36							74.5	778.5	69.29	Ec(H)
0.4			6.58	61.13			49	955.8	63.52	Ec(I)
0.4							80	501.3	59.68	Ec(M)
0.4							80	723.6	64.14	Ec(H)
0.4							10.3	8209.8	57.32	ACI(II)

表 4-3 本研究配比與加拿大跨峽大橋服務年限預測[77]

Cover Thickness,mm	W/B	Service Life, Prediction Years	Remark
40	0.4	103	Research
	0.32	129	
50	0.4	161	
	0.32	201	
75	0.4	364	
	0.32	455	
75	0.32	60	Canada

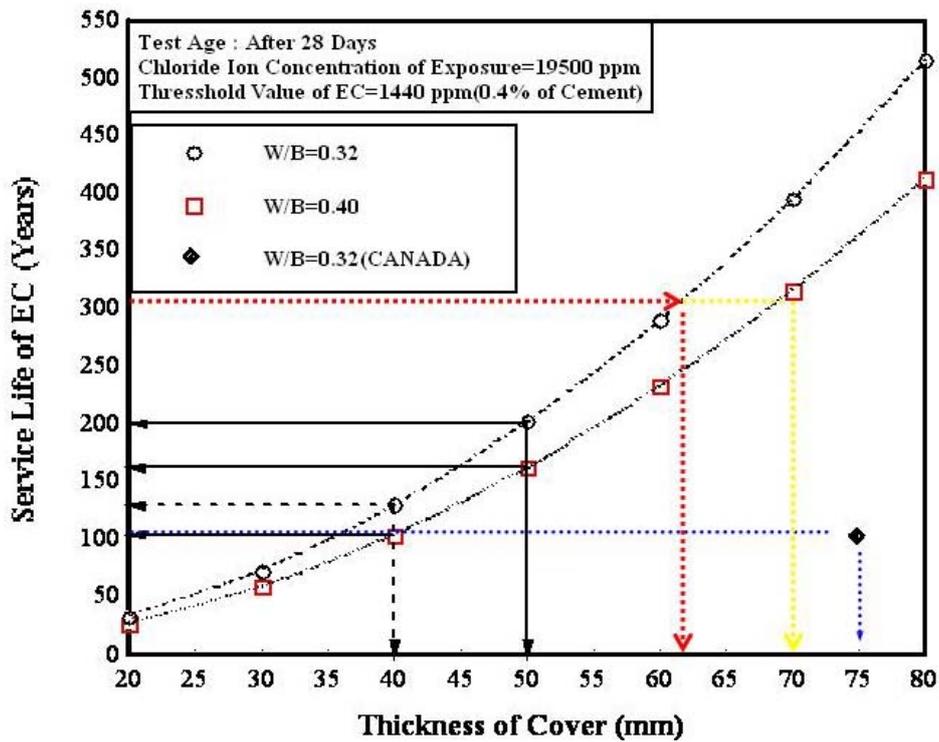


圖 4-1 不同保護層厚度與 EC 服務年限之關係[77]

#### 4-5 放射性廢棄物設施混凝土結構長期安全規範

現行的混凝土結構設計與施工規範，主要考慮荷載作用下結構承载力（強度）安全性與適用性的需要，較少顧及結構長期使用過程中由於環境作用引起材料性能劣化對結構安全性與適用性的影響。由於耐久性不足，不僅會增加使用過程中的修理費用，影響工程的正常使用，而且會過早結束結構的使用年限，嚴重浪費資源。尤其是放射性廢棄物設施混凝土結構，其耐久年限的考量更是不同於一般所謂重要結構（使用年限 100 年，目前歐美、大陸等國家設計最高年限）；放射性廢棄物處置結構端視放射性強度衰減期，其使用壽命至少 300 年（低放射性廢棄物半衰期）以上。為使放射性廢棄物混凝土結構設計能夠滿足我國放射性廢棄物混凝土結構的服務年限需求，企需儘快編訂安全規範，供設

計施工人員參考。由前述章節中所論述，結構的耐久性是結構及其構件在各種可能引起結構材料性能劣化的作用下長期維持其原有性能的能力。荷載與環境的長期作用都有可能引起材料性能的劣化。荷載長期作用下的材料性能劣化主要表現為材料強度的降低，在通常的結構承載力（強度）設計中已用相關設計參數予以考慮。本研究所指的耐久性，主要是環境作用下的耐久性。環境對混凝土結構材料的作用因素，主要是溫度和濕度及其變化（乾濕交替、凍融），以及環境中的水、氣、鹽、酸等介質。環境作用所造成的材料劣化則表現為鋼筋的銹蝕和混凝土的腐蝕與損傷。鋼筋銹蝕的產物在生成過程中體積膨脹，能導致混凝土順筋開裂和混凝土保護層剝落，損害鋼筋與混凝土之間的粘著力，減少鋼筋的有效截面積並使鋼筋變脆，從而影響結構的安全性（承載力降低）與適用性（裂縫、表面鏽跡等）。由於，放射性混凝土結構設計與場址、處置方式等有密切關係。現階段，相關條件並不明確。因此，本研究對於安全規範之研擬，以低放射性廢棄物混凝土盛裝容器為主。目前國內低放射性廢棄物係以鋼製桶盛裝後，分別置放於核能電廠內及蘭嶼貯置場暫存，隨貯存時間的加長及外在環境有害因子的影響，均造成廢棄物體本身之物性及化性起變化，因而引起盛裝桶毀損及崩裂。對於破損固化體及毀損盛裝桶的重整再包裝，將產生更多廢棄物體積及浪費更多的人力與物力，對於蘭嶼貯置場已滿載，及尚未有低放射性廢棄物最終處置場的我國，無異是雪上加霜。因此開發能提供長期性的穩定，以符合 10CFR Part 61 所規定的結構穩定性的保固桶乃當務之急。有關盛裝容器之安全性（強度）以符合 HIC 認證為基準；而

服務年限則以混凝土材料耐久性設計為「唯一」考量。就前述章節中所提及，混凝土材料其強度不等於耐久性（傳統認知強度＝耐久性）；當混凝土中組成材料的配比邏輯不當，即使具有高強度但不表示具有耐久性。但如果混凝土配比邏輯，符合耐久性考量（水膠比 $<0.4$ ；水灰比 $\geq 0.42$ ），則具有「高強度（ $\geq 42$  MPa）」是必然的結果。因此，有關於低放射性混凝土盛裝容器之一般材料規範及設計申請規範，詳如附件一、二所示。

#### 4-6 放射性廢棄物多種年限混凝土容器設計案例之建立

如前所述，混凝土容器或障壁之設計，如果將材料選擇、配比設計、施工等流程考慮在一起之品質保證觀念下，並進行嚴謹之 PDCA(計畫-執行-檢核-修正)流程，針對 5M(人機料財法) 及國外千禧年之資訊進行標準作業程序(SOP)，則依據過去的研究成果揭示[8,77,78]且根據擴散速率可描繪出設計年限-保護層厚度與水膠比(w/b)之關係圖(圖 4-1)。若以服務年限 100 年來估計，則在圖 4-1 上 100 年位置繪一水平線，以加拿大為例，W/B=0.32 時，保護層厚度至少需要 75mm。而根據研究所得，台灣地區之結果以高性能混凝土為設計依據，100 年限在水膠比 0.4 及 0.32 時，保護層厚度分別為 40mm 和 35mm，但同樣品質的混凝土如果要達到 300 年限，則保護層分別應為 69mm 和 62mm（以氯離子擴散實驗，氯離子達到鋼筋鏽蝕濃度計）。換言之，混凝土耐久性年限是依據擴散速率來估算，而擴散速率又以 W/B 來控制，W/B 愈低則品質愈佳，保護層厚度可相應減少（因為結果顯示，比依 ACI 配比方法設計之混凝土品質優良許多）。但是混凝土並非是產品而是材料，所以 QC 及 QA 工作自然非常重要。因為混凝土品質再好、保

護層再厚，當有裂縫產生則一切皆徒勞無功，而這些工作必須要考慮到人性化的施工，換言之必須要有高流動而自動化的施工為原則，而耐久性的設計必須溶入古羅馬建築長生不朽的「不老基因」-石灰+火山灰，將卜作嵐材料及強塑劑同時引入，而卜作嵐材料也要從物理及化學兩個面向，採用多組成配方由 mm- $\mu$ m-nm 層次的物理固化為架構。根據以上及前面章節所述，100 年限及 300 年限混凝土容器設計導則應包含表 4-4 資訊。

表 4-4 混凝土容器年限設計表[4]

	要求項目	設計年限	
		100 年	300 年
1	拌和水量	$\leq 150 \text{ kg/m}^3$	$\leq 140 \text{ kg/m}^3$
2	水膠比 (W/B)	$\leq 0.32$	$\leq 0.26$
3	水灰比 (W/C)	$\geq 0.5$	$\geq 0.5$
4	28 天抗壓強度	$\geq 420 \text{ kgf/cm}^2$	$\geq 560 \text{ kgf/cm}^2$
5	保護層厚度	$\geq 40 \text{ mm}$	$\geq 70 \text{ mm}$
6	氯離子滲透係數	$\leq 2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$	$\leq 2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$
7	56 天電阻值	$\geq 50 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	$\geq 80 \text{ K}\Omega\text{-cm}$
8	56 天氯離子電滲量	$\leq 1000 \text{ 庫倫}$	$\leq 300 \text{ 庫倫}$
備註： 1. 混凝土中應添加矽灰、飛灰及水淬爐石粉、鋼纖維和高性能減水劑。 2. 混凝土中粒料等固態材料配合之比率應達到最大密度，其配合比例按粒徑、粒徑分佈曲線緻密堆積。 3. 混凝土中坍度之調整只能摻加高性能減水劑。 4. 混凝土容器鑄造完成後必須進行濕養護至少 7 天。			

不同年限混凝土容器設計導則之設計基準，主要在拌和水量，水膠比及保護層厚度的差異性，材料製造方法、品管要求及測試檢驗方法大致上是一致地，如附件三。

## 伍、混凝土工程設施結構應力軟體評析

早期之結構設計，設計者通常依據個人經驗設計並進行測試，當測試結果不合要求則須變更設計，甚至重新設計，經過反覆的交替直到滿足工程需求為止，這種方法不但成本高且耗費時間；若遇到特殊之工程，其幾何形狀複雜、非線性或邊界條件受限，則結構分析困難，且分析結果可靠性與精確性也不佳。由於現代高速電腦及軟體工程快速發展，藉由電腦輔助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 的導入，以及建構「虛擬原型」(Virtual Prototype)，分析的工作全部交由電腦軟體作計算與模擬，設計者只須評估及依經驗判斷執行結果的可行性及合理性與否，即能協助其做出正確可靠的設計，而不需要再採用傳統的方式，利用迭代及試誤設計方式，故可大大地縮短設計所需的時間、降低設計與測試耗費之成本，以及提升設計與分析之可靠性。

電腦輔助工程 (CAE) 可應用的領域非常廣泛，包括結構分析、熱傳分析、流力分析及電磁分析等。隨著應用領域的不同亦有不同的數值方法，諸如有限元素法 (Finite Element Method, FEM)、有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、邊界元素法 (Boundary Element Method, BEM) 等。近年來，又伴隨高速電腦科技的迅速成長進步，記憶空間超過兆位元組，也已發展出許多結構分析軟體，以在許多消費產品、電子工業、微機電系統、航太工業、汽車工業、國防工業、醫學與生醫工程、化學工業、海洋與船舶工業及土木工程等中被採用與應用。

市售的結構分析軟體相當多，其中 ANSYS 為目前常被學術單位或業界拿來分析、設計與模擬之套裝軟體之一。ANSYS 軟體架構主要為前處理、求解、後處理三大階段。當在前處理階段時，

需要建立欲分析之幾何模型與邊界條件等步驟；求解階段交由電腦自動進行求解；後處理階段乃將求解得知資料經由平均值方法分析計算並繪出曲線圖或分佈圖，以方便分析。ANSYS 是融合了結構、熱、流體、電磁、聲學於一體的大型有限元素分析軟體，可以廣泛用於核能工業、鐵路工程、石化工業、電子、土木工程、機械、水利等工業及科學研究中。以鋼筋混凝土工程為例，即利用 ANSYS 進行國內中國鋼鐵公司鐵水運輸軌道系統動態分析評估（見圖 5-1 及圖 5-2），以作為混凝土軌枕結構預力、形狀尺寸與材料設計之參考[79]。ANSYS 公司成立於 1970 年，創辦人 John Swanson 博士為匹茲堡大學力學系教授[80]。其主要特點為：

#### 1、完備的前處理功能

提供了強大的實體建模及網格分割工具，可以方便地建構數學模型，且材料特性和邊界條件也一併完成於ANSYS的初步建模工作中，其內建近200種元素類型，能準確地建構出反映實際結構的仿真計算模型。

#### 2、功能強大的求解處理器

為跨領域的有限元素分析軟體，提供了各種物理場的分析(如結構、熱、電磁、流體、聲學等)。具備線性、非線性結構靜力分析、動力分析、結構線性及非線性挫屈分析等之求解功能。

#### 3、方便的後處理器

分一般後處理器(Post1)及時間域後處理器(Post26)兩部份。後處理結果有：應力、應變、剪力、彎矩、位移、速度、加速度等。

#### 4、具有二次研發之工具：

有巨集 (Marco)、參數化設計語言 (APDL)， ANSYS

Parametric Design Language)等工具；其中APDL 類似於Fortran 程式語言，內含循環命令、條件語法等。

SAP與ETABS也是常見之結構分析軟體。其中，SAP是「通用」的結構分析軟體，適用於模型比較複雜的結構，如橋樑、體育場、大壩、海洋平臺、工業建築、發電站、輸電塔、網架等結構形式，當然高層建築亦能很方便的用SAP建模、分析和設計；ETABS是「建築專用」的結構分析軟體，適用於各種建築結構體系，一般民用建築之分層模型，特別是高層建築，包括多塔、錯層、平面形狀不規則等均可以方便的建模。這兩個軟體的核心是一個共同的分析引擎，具有靜力和動力分析、線性和非線性分析、動力地震分析、橋樑車輛活荷載分析、幾何非線性、潛變、收縮和老化效應、穩態和功能譜密度分析、框架和殼單元，包括梁—柱、桁架、膜、板特性、三維實體單元等特性與功能，例如以SAP程式放大地震側力，求得結構物之擬彈性反應以及不同地震側力下之各桿件軸向受力情況[81]。一般步驟為：

- 1、創建或修改模型：定義結構的幾何、屬性、荷載和分析參數。
- 2、進行模型分析
- 3、查看分析結果
- 4、檢查和優化結構設計

比較兩軟體之間的差別，SAP重點在可以自由建模，依據需分析結構單元，只要模型建立出來即可；而ETABS則是已經有很多建築的元件（樑、柱或版）被建立，設計者只需依據既有元件去組件建築結構以分析力學行為。

針對土木領域關注的各種線性非線性力學問題，有關建築工

程、橋樑工程、岩土工程及水工工程等，ABAQUS皆常被用來作為結構分析，它是美國ABAQUS公司於1978年推出的有限元素分析軟體，其解題範圍廣泛，於一些研究單位或是實際工業應用單位皆常被使用。此應用程式具備下列分析能力與功能：

### 1、靜態應力分析

不考慮慣性效應的應力分析，其中非線性領域更是ABAQUS最擅長的問題，包括：

(1)材料非線性問題：包括塑性變形、黏塑性材料及非線彈性材料等。

(2)幾何非線性問題：包括物體受力產生大位移、大應變、過挫曲及潰壞等問題。

(3)邊界非線性問題：以有間隙的物體受力變形後產生接觸問題為代表。

### 2、動力分析

(1)線性系統動力分析：可分析穩態反應、時域反應、頻域反應、隨機反應等問題。

(2)非線性系統動力分析：可分析低速暫態反應、高速衝擊反應等問題。

### 3、熱傳分析

考慮物體表面熱交換、邊界溫度分佈及梯度、初始溫度分佈及梯度，並分析材料性質隨溫度變化、熱輻射、熱對流效應及非線性的邊界熱流。

### 4、破壞力學分析

可分析應力強度因子及裂縫成長問題。

## 5、自然振頻振模分析

可考慮固定負荷作用下的自然振頻。

6、其他包含有限元素之元素去除及填加問題、土壤與大地工程問題分析、扭曲分析、自然振頻振模分析、次結構/超元素分析、聲響與結構耦合分析、熱傳與應力耦合問題分析、流體與應力耦合問題分析、壓電耦合分析及機構運動分析等。

除了上述介紹之通用結構分析軟體外，其實尚有許多相關軟體，如適合分析線性、非線性靜力問題、振動、衝壓、耦合等等的真實結構行為之LS-DYNA分析軟體，其除了可以進行單CPU求解計算外，對於大型之工程問題，其優異的平行計算能力可以大大的縮減計算時間。LS-DYNA平行計算有SMP (Share Memory Parallel) 與MPP(massively parallel processor) 兩種平行計算。其主要特點如下：

一、精確的接觸演算法真實生活中的結構受力及變形行為往往是由於接觸所造成。LS-DYNA提供最完整的「接觸演算法」(Contact algorithm)，可讓使用者分析真實而複雜的結構問題。

二、兼具顯性演算法及隱性演算法

LS-DYNA適合以Implicit method求解線性及非線性的靜力問題、振動模態分析及挫屈模態分析；或是利用Explicit Method進行掉落、衝壓、爆破等暫態問題。更特別的核心技術在於LS-DYNA可任意地進行Implicit及Explicit的切換分析，例如當非線性靜態問題很難收斂的時候，程式會自動切換成Explicit method進行求解以避免收斂性問題，等數值穩定後，程式會再切換成Implicit Method計算。

三、豐富的材料模式

LS-DYNA擁有將近200種材料模式，提供彈性材料、延展性材料、脆性材料、橡膠、發泡材料、黏彈性材料、疊層材料、玻璃、焊材、異向性材料、土壤、混凝土、心臟瓣膜等材料模式及不同的破壞準則。針對耦合問題的應用，亦提供多種狀態方程式可供選擇。而使用者若計劃發展特定的材料模式，亦可利用自定材料模式的功能，具有十分強大的擴充性。

#### 四、平行運算處理

平行運算核心支援多種作業系統，包含 Windows2000/XP 及 Linux。讓使用者得以利用多 CPU 共同分析的優勢、大幅縮短分析時間。目前在台灣主要平行運算的應用領域為：產品掉落、衝壓、車體結構安全分析、土木建築耐震設計、金屬衝壓成型及液壓成型等。在國外，LS-DYNA 高效能的計算能力幾乎成為各大電腦主機、作業系統及 CPU 效能的評估指標，其操作流程如圖 5-3 所示。

另外擁有完整的前處理（所含之繪圖作業平台，可輕易描繪出複雜的模型，不須經由其他軟體先描繪構件模型再匯出）、後處理及分析功能之 AMPS（Advanced Multi-Physics Simulation），由 AMPS Solid 介面可提供使用者一個繪圖的作業平台，不論是各種形狀的物體都可以由不同的工具描繪出來，對於較複雜的模型，更可以分成不同區塊分別繪製，再由黏合或是挖空等功能來完成；對於元素的分割 AMPS Solid 也提供三種不同的方法，視使用者的需求可自行選擇，這在後續軟體的使用介紹中會詳細提到。若是慣用於一般繪圖的軟體，AMPS 也提供 IGES 檔的輸出，可以提供使用者作軟體間的轉換；再完成前處理之後，可直接由 AMPS

View 進行材料設定、邊界條件束制等步驟，最後由 AMPS Solution 分析，再回到 AMPS View 觀看分析結果。AMPS 除了有方便的操作介面與系統外，在分析方面包括了一般常見到的穩態分析、動態分析、流體力學分析與電磁學分析；對於不同材料性質、組成、力學行為上提供多種模式讓使用者選擇，如 von Mises plastic 或是 Mohr Coulomb plastic 等；對於非接觸兩物體之間的碰撞問題更能以 contact 之分析模式表現出問題真實發生的情形[82]。這些軟體於國內也都經常被拿來應用，如以 AMPS 軟體模擬分析低放射性廢棄物鋼纖維混凝土儲存筒（高完整性承裝容器）受墜落測試之應力分佈情況（見圖 5-4）[82,83]。隨著時代的演進，結構物愈來愈多樣化。以樑為例，其實際結構受力行為不單只有彎矩或是剪力，其實剪力、彎矩、軸力及扭矩是會同時發生，並且交互影響的；因此，混凝土工程設施結構，其力學行為也不能用一般理論來探討。利用電腦輔助工程（CAE）可以幫助工程師得到許多結構體受各種內外因素作用下產生之反應與力學行為資訊，如頂層變位、結構內部應力及支承反力等欲瞭解之相關數據結果；而且可利用 CAE 在電腦上可重複運算與變更參數的特性，除能協助工程師決定重要設計參數外，還可以變更材料設計與預測結構可能發生的問題。市售的結構分析軟體雖然很多，然而因為通用軟體功能差異不大、混凝土結構設施複雜性不同、設計者個人喜好不同或是所熟悉之軟體不同、工程需求不同、材料及結構設計參數不同等，無法絕對表示那一個軟體為最佳結構分析軟體。設計者應根據工程複雜程度與混凝土結構工程需求等，選擇

合適軟體進行評析與模擬，以確保所得之結果可靠度最佳，才有意義。另外，由於坊間分析軟體雖功能強大，但是實際所使用之功能並非如此多，且常有介面親和性不足，有使用不易的問題，以及需要相當程度的訓練才能運用自如，基本上都耗費大量時間與人力。故依據需求目的開發適合本身使用的分析程式，亦是目前常見之方式，如公路局即以自行開發的 Slab2 軟體進行橋面版分析與設計程式，Slab2 是利用 Visual C<sup>++</sup> 程式開發環境自行開發所得，它是專門針對橋面版所設計的分析程式，雖然功能簡單，但使用上也非常容易。它擁有中文介面與視窗功能，適用於 Windows 98、Me、2000、XP 等作業系統，並提供對話盒輸入功能，可將參數輸入介面圖形化，並使部分參數的輸入工作從文字輸入改為選擇式輸入，分析成果則是以文字視窗輸出，以便列印出分析成果報表，如圖 5-5 箱型梁之斷面分析與配筋設計[84]。

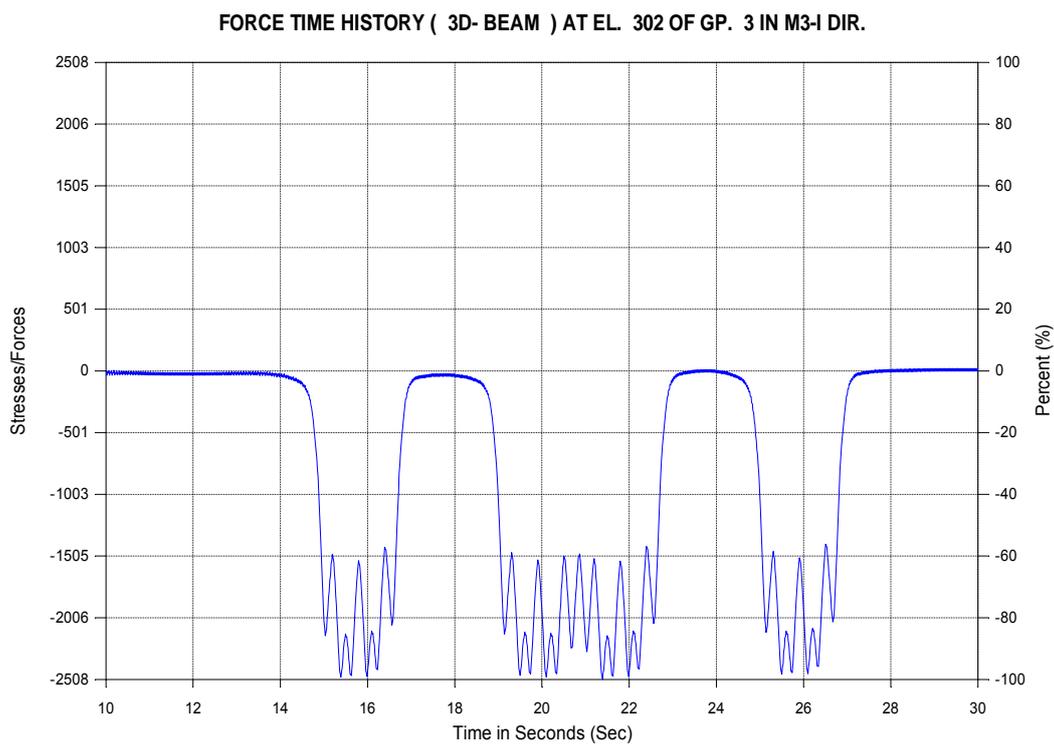


圖5-1 ANSYS分析中央軌枕彎矩[79]

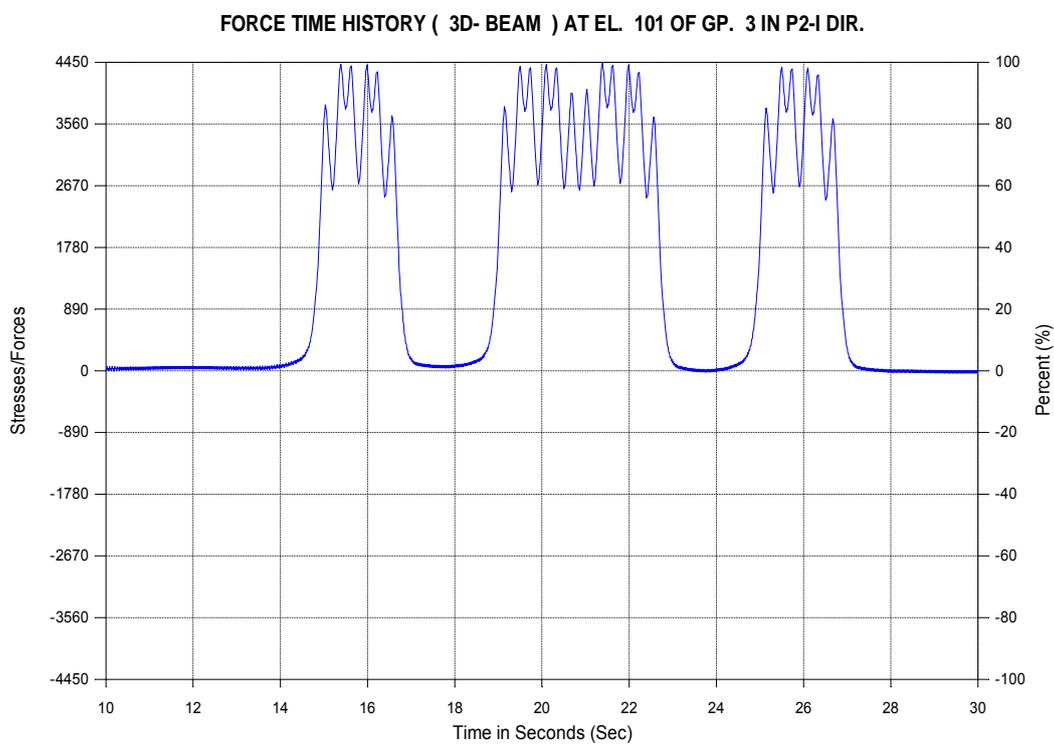


圖5-2 ANSYS分析中央軌枕剪力[79]

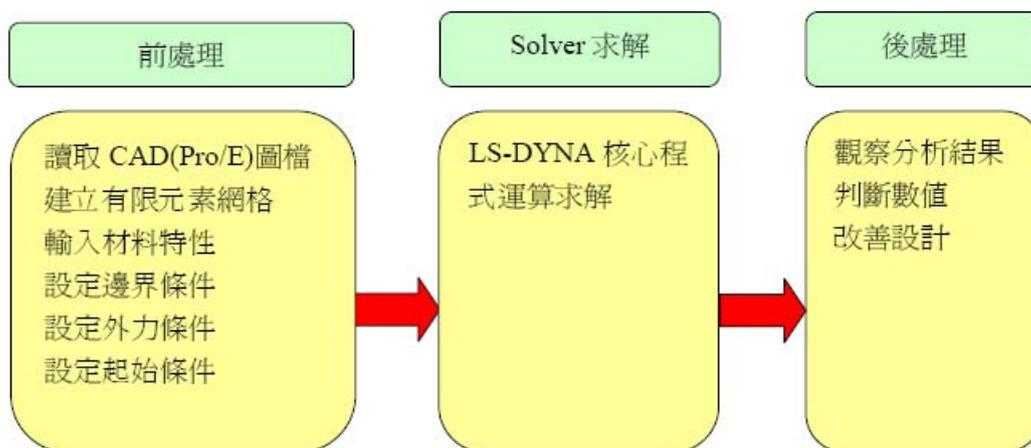


圖 5-3 LS-DYNA 操作流程[83]

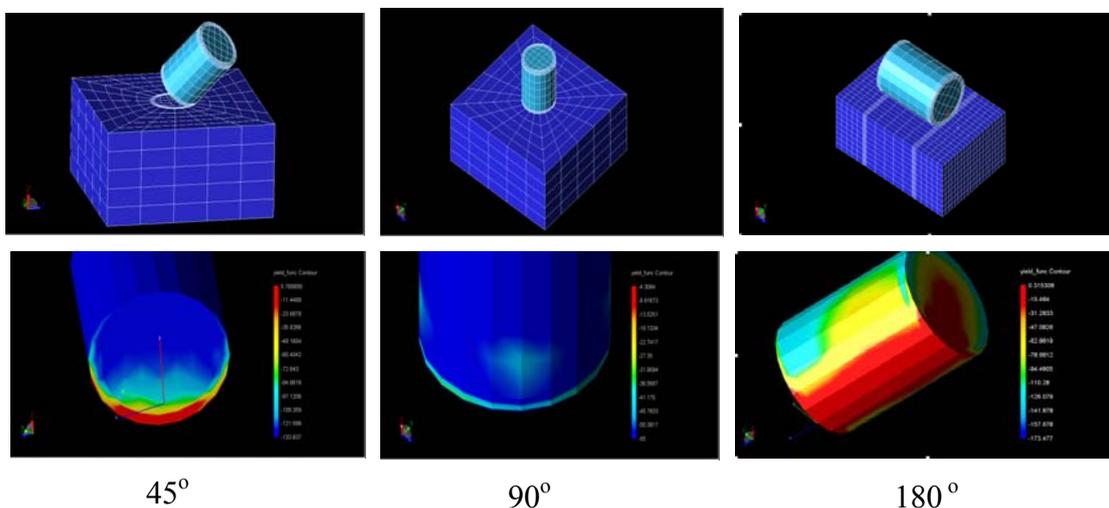


圖 5-4 AMPS 軟體分析高完整性承裝容器墜落測試之應力分佈[83]

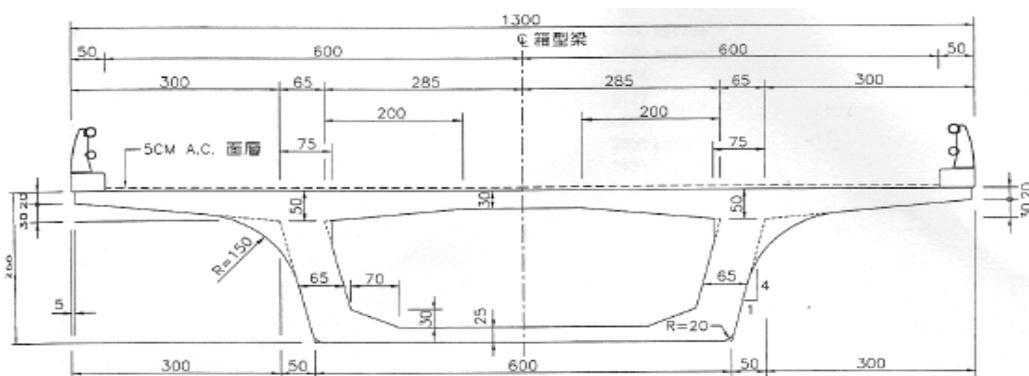


圖 5-5 Slab2 應用於箱型梁之斷面分析與配筋設計[84]

## 陸、 結論與建議

### 6-1 結論

本研究主要探討放射性混凝土結構工程之耐久性評估，針對影響耐久性之相關因子溶入古老千年建築之「不老基因」至混凝土結構年限設計上，進行評估。可得下列結論：

1. 混凝土材料最主要設計指標（水膠比、水灰比），水膠比應  $< 0.32$ ；水灰比應  $> 0.50$ 。
2. 善用卜作嵐材料（飛灰、爐石及矽灰），降低水泥用量（建議  $\leq 200\text{kg/m}^3$ ）及用水量（建議  $\leq 150\text{kg/m}^3$ ）有助於提升混凝土的耐久性質。
3. 爐石水泥的斥水現象使得混凝土有較大的乾縮量產生，且以中細度爐石水泥混凝土的乾縮量最大，在體積穩定性的考量下，用量須小心謹慎，建議用量為 20% 以下。
4. 水泥型別建議採用普通第 I 型水泥，採降低水泥用量以降低水化熱、硫酸鹽侵蝕及鹼骨材反應有關之  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{A}$ 、Alkali 總含量。雖然 II 型水泥有較低水化熱及中度抗硫之效果，但本土產量有限，而且如果其用量還依過去公共工程委員會規定（ $> 400\text{kg/m}^3$ ），則其效能反而不彰，這是過去對於水泥型別的迷失。因此，限制水泥總量，就是降低劣化基因。
5. 確保足夠的混凝土保護層厚度 100 年  $\geq 40\text{mm}$ ，300

年  $\geq 70\text{mm}$ ，應用緻密堆積方式，使用最大的骨材量、適當的卜作嵐材料、較少的水泥及水量，確保混凝土的耐久性。

6. 落實「常態」材料品質管制、PDCA 與施工管理，保障始終如一的品質。

## 6-2 建議

本研究現階段研究時程有限，對於放射性混凝土結構長期安全規範，乃須更進一步探討。

## 參考文獻

1. IAEA. (1982), Site Investigations for Repositories for Solid Radioactive Waste in Shallow Ground, Vienna: IAEA, Technical Report Series No.216.
2. IAEA. (1993), The Radioactive Waste Management Glossary, Vienna: IAEA.
3. 陳式，馬明燮(1998)，中低水平放射性廢物的安全處置，pp.139~143，原子能出版社，北京。
4. 黃兆龍(2003)，高性能混凝土理論與實務，詹氏書局，台北。
5. 盧雪卿，黃兆龍(2000)，「漿量及水量對混凝土體積穩定性之影響」，中國土木水利工程學刊，第十二卷，第三期，第 621~626 頁。
6. 黃兆龍，湛淵源(2001)，「混凝土電阻性質與氯離子電滲行為之探討」，中國土木水利工程學刊，第十三卷，第二期，第 293 ~302 頁。
7. 陳建成，黃兆龍(2002)，「鋼筋混凝土腐蝕機理與耐蝕策略」，中國工程師學會會刊，第七十五卷，第三期，第 54~63 頁。
8. 黃兆龍，洪盟峰，湛淵源(2002)，「ACI 混凝土規範與緻密配比在防蝕耐久性設計之差異評估」，防蝕工程，第十六卷，第四期，第 281~296 頁。
9. Li, L.S., and C.L. Hwang (2002), "A Quality Assurance System of SCC in Taiwan," The Proceedings of First North American Conference on the Design and Use of Consolidating Concrete, ACBM, pp.275-280.
10. Hwang, C.L., C.T. Tsai, L.S. Li, and Y.Y. Chen(2004), "Durability Design and Application of Eighth High-Volume Fly Ash Fiber

- Reinforced Concrete Composites in Taiwan,” The Supplementary Volume Of CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and natural Pozzolans in Concrete, pp. 572-586, Las Vegas.
11. 黃兆龍(1997)，低放射性硫酸鈉固化廢棄物高性能容器研發，行政院原子能委員會專案研究計劃，期末報告。
  12. 「我國低放最終處置場選址現況」，核能簡訊，編輯室，No.113，pp.5-6，2008，8。
  13. S. Komarneni and D.M. Roy, “Mechanisms of Immobilization of Nuclear Waste Elements by Cement Minerals”, Cement and Concrete Research, Vol. II, pp.789-794, 1981.
  14. P. Faucon, F. Adenot, J.F. Jacquinet, J.C. Petit, R. Cabrillac, and M. Jorda, 1998, “Long-Term Behaviour of Cement Pastes Used for Nuclear Waste Disposal: Review of Physico-Chemical Mechanisms of Water Degradation”, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 6, pp. 847–857.
  15. N. K. Ghattas, S. B. Eskander, and T. A. Bayoumi, 1992, “Improved Cement Barriers Applied in Nuclear Wastes“, Cement and Concrete Research, Vol. 22, pp. 311-318.
  16. C. Perlot, J. Verdier, and M. Carcass`es, 2006, “Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage“, Materials and Structures.
  17. R. Atabek , P. Bouniol , P. Vitorge , P. Le Bescop , and J.M. Hoorelbeke , 1992, “Cement Use for Radioactive Waste Embedding and Disposal Purposes“, Cement and Concrete Research, Vol. 22, pp. 419-429.
  18. K. Sakr, M.S. Sayed, and N. Hafez, “ Comparison Studies Between

- Cement and Cement-Kaolinite Properties for Incorporation of Low-Level Radioactive Waste“, Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 12, pp. 1919-1926.
19. I.B. Plecas, A.D. Peric, J.D. Drijaca, and A.M. Kostadinovic, 1991, “Mathematical Modeling of Physico-Chemical Characteristics of Concrete in Immobilization of Radioactive Waste“, Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp. 941-946.
20. L.D. Wakeley, and D.M. Roy, 1983, “Experimental Concretes for Sealing Radioactive-Waste Repositories in Evaporate Strata“, Cement and Concrete Research, Vol. 13, pp. 97-106.
21. Toshiari, Saegusa, Genki Yagawa, and Masanori Aritomi, 2008, “Topics of Research and Development on Concrete Cask Storage of Spent Nuclear Fuel”, Nuclear Engineering and Design 238 (2008) 1168–1174.
22. P. DAWSON, “Some Considerations of The Use of Concrete for Radioactive Waste Repositories“, Nuclear Engineering and Design 116 (1989) 45-55.
23. 國家標準，「建築結構可靠度設計統一標準CGB50068-200D」，北京，中國建築工業出版社，2001。
24. 國家標準，「建築結構設計通用符號計量單位和基本術語(GBJ83-85)」，北京，中國計畫出版社，1984。
25. 黃興隸編著，「工程結構可靠性設計」，北京，人民交通出版社，1989。
26. 李田，劉西拉，「混凝土結構的耐久性設計」，土木工程學報，1994，27(2) pp.47-55。
27. 羅福午主編，「建築結構缺陷事故的分析及防止」，北京，清

- 華大學出版社，1996。
28. Kilaeski, W. R., "Failure of reinforcement concrete structure due to corrosion", *Material Performance*, 1980(3).
  29. 盧術，「混凝土耐久性研究現狀和研究方向」，*工業建築*，1997，27(5)，pp.1-4。
  30. 日本土木學會編，張富春譯，「混凝土構築物的維護、修補與拆除」，北京，中國建築工業出版社，1990。
  31. 莫斯克文等著，倪繼森譯，「混凝土和鋼筋混凝土的腐蝕及其防護方法」，北京，化學工業出版社，1990。
  32. Isecke, B., "Failure Analysis of the Collapse of the Berlin Congress Hall", *Corrosion of Reinforcement Concrete Construction*, 1985.
  33. 黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，科技圖書網，2007。
  34. 牛荻濤，混凝土結構耐久性與壽命預測，北京，科學出版社，2003。
  35. 阿列克謝耶夫著，黃可信，吳興祖等譯，「鋼筋混凝土結構中鋼筋腐蝕與保護」，北京，中國建築工業出版社，1983。
  36. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N., "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation", *ACI Materials Journal*, 1991(88), pp.363~373.
  37. 岸穀孝一著，「鐵筋Concrete耐久性」，日本，鹿島建設技術研究所出版部，1963。
  38. 朱安民，「混凝土碳化與鋼筋混凝土耐久性」，*混凝土*，1992(6)，pp.18~22。
  39. 焦本健人，高田良章，「Concrete中性化速度及要因」，土木

- 學會論文集，1992.8，17(451)， pp.119~128。
- 40.許麗萍，黃士元，「預測混凝土中碳化深度的數學模型」，上海建材學院學報，1991.4(4)，pp.347~356。
- 41.Lesage-de-Contenay C., “Deterioration and Repair”, Bahrain Proc., 1995(6), pp.467~483.
- 42.Smolczyk, H. G., Proc., RILEM, Sypm., “Testing of Concrete”, 1962, pp.485~489.
- 43.邱小壇，周燕，「混凝土碳化規律研究」，中國建築科學研究院，1995。
- 44.張譽，蔣利學，「基於碳化機理的混凝土碳化深度實用數學模型」，工業建築，1998.28(1)，pp.16~19。
- 45.Adam Neville, “Chloride attack of reinforced concrete, An Overview”, Material and Structure, 1993, p. 28.
- 46.Lightcon DP2-7 Peport, “Service Life Model for Concrete Structure Exposed to Marine Environment-Initiation Period”, SINTEF Structure and Concrete”, Norway, 1995.
- 47.JTJ 275-2000，「海港工程混凝土結構防腐蝕技術規範」，北京，人民交通出版社，2001。
- 48.Mehta, P. K., Burrows, R. W., “Builiding Durable Structure in the 21<sup>st</sup> Century”, Concrete International, March, 2001, pp.57~63.
- 49.交通部第一航務工程局，「北方港口水工建築物鋼筋混凝土的腐蝕報告」，港口工程，增刊第一號，1986。
- 50.Krauss, P. D., Rogalla, E. A., “Transverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks”, NCHRP, Report 380, Transporation Rsearch Board, Washington, D. C., 126 pp, 1996.
- 51.DuraCrete, 1999, “General Guidelines for Durability Design and

- Redesign”, Task 7, CUR, Gouda.
52. Coumes, Céline Cau Dit, Simone Courtois, Didier Nectoux, Stéphanie Leclercq, and Xavier Bourbon, 2006, “Formulating a Low-Alkalinity, High-Resistance and Low-Heat Concrete for Radioactive Waste Repositories”, *Cement and Concrete Research* 36 2152–2163.
53. Evans, N.D.M., 2008, “Binding mechanisms of radionuclides to cement”, *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 543–553.
54. Kendall, Alissa, Gregory A. Keoleian, Michael D. Lepech, “Materials design for sustainability through life cycle modeling of engineered cementitious composites”, *Materials and Structures* (2008) 41:1117–1131.
55. Coumes, Céline Cau Dit, Simone Courtois, Didier Nectoux, Stéphanie Leclercq, and Xavier Bourbon, 2006, “Formulating a Low-Alkalinity, High-Resistance and Low-Heat Concrete for Radioactive Waste Repositories”, *Cement and Concrete Research* 36 2152–2163.
56. Perlot, C., J. Verdier, and M. Carcass, 2006, “Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage”, *Materials and Structures*.
57. Iriya, K., Y. Itoh, M. Hosoda, A. Fujiwara and Y. Tsuji, 1992, “Experimental Study on The Water Permeability of A Reinforced Concrete Silo for Radioactive Waste Repository”, *Nuclear Engineering and Design* 138 (1992) 165-170.
58. Glasser, Fredrik P., Jacques Marchand, and Eric Samson, 2008, “Durability of concrete- Degradation Phenomena involving Detrimental Chemical Reactions”, *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 226–246.

59. Khatri, R.P., V. Sirivivatnanon, “Characteristic Service Life for Concrete Exposed to Marine Environments”, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 745–752.
60. Khatri, R.P., V. Sirivivatnanon, and P. Heeley, “Critical Polarization Resistance in Service Life Determination” ,*Cement and Concrete Research* 34 (2004) 829–837.
61. Browne, R. D., “The mechanisms of Corrosion of Steel in Offshore in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structure”, *Proc., of Inter., Conf., on Performance of Concrete in Marine Environment*, Ed., by Malhotra, V. M., ACI SP65-11, April 1980, pp.169-204.
62. Sloot, H.A. van der, “Comparison of The Characteristic Leaching Behavior of Cements Using Standard (EN 196-1) Cement Mortar and an Assessment of Their Long-Term Environmental Behavior in Construction Products During Service Life and Recycling”,*Cement and Concrete Research* 30 (2000) 1079-1096.
63. Basheer, L., S. V. Nanukuttan, P. A. M. Basheer, 2007, “The influence of reusing ‘Formtex’ controlled permeability formwork on strength and durability of concrete”, *Materials and Structures*.
64. 姜海波，車惠民，錢永久，「一座既有鐵路混凝土梁的承載力可靠性評估」，*橋梁建設*，1998。
65. 韓光東，王傳喜，李創弟，「鋼筋混凝土結構隨機時變抗力及其可靠度分析」，*廣西工學院學報*，11(3)，pp.16-20，2000。
66. 趙尚傳，趙國藩，貢金鑫，「抗力隨時間變化非承載力因素對結構可靠性影響」，*大連理工大學學報*，42(5)，pp.574-579，2002。
67. 貢金鑫，仲偉秋，趙國藩，「工程結構可靠性基本理論的發展與應用」，*建築結構學報*，23(6)，pp.2-9，2002。

68. 李清富，劉晨光，張豔麗，「混凝土碳化耐久性模糊分析」，鄭州工業大學學報，17(3)，pp.7-12，1996。
69. Ah Beng Tee， “The Application of Fuzzy Mathematics to Bridge Condition Assessment”， A Thesis Submitted to the Faculty of Purdur University, December, 1988.
70. Guide to Durable Concrete ACI Committee 201, ACI materials Journal, 88(5), 1991.
71. Bing Jiang, Henry Lau, Felix T. S., Chan, “A Process Planning Expert System Based on a Flexible Digit Length Coding Scheme”， Expert Systems with Application 14, pp.291-301, 1998.
72. K. M. Abd , El-Ghany, M. M. Farag, “Expert System to Automate to the Finite Element Analysis for Non-destructive Testing”， NDT&E International 33, pp.409-415, 2000.
73. M.E. Yahia, R. Mahmood, N. Sulaiman, ”Rough Neural Expert Systems”， Expert Systems with Applications 18, pp.87-99, 2000.
74. 楊陽，「專家系統在評估鋼筋混凝土結構破損中的運用」，四川水利發電，20(4)，pp.122-126，2001。
75. 侯小美，黃賽超，「應用神經網絡評估疊合結構的耐久性」，中南工業大學學報，33(2)，pp.125-128，2002。
76. 張玉敏，王鐵成，「基於 BP 網絡響應面的海水侵蝕混凝土強度可靠性分析和耐久性評價」，工業建築，32(2)，pp.12-15，2002。
77. Bakker , R.F.M. in Proceedings , 1th International Conference on the Use of Fly Ash , Silica Fume , Slag , and other Mineral By-Products in Concrete , Montebello 1983. Canada ACI, Publication sp-79 , pp.589.”Permeability of Blended Cements”.
78. 黃兆龍，「台灣高速鐵路箱型結構混凝土初步研發及驗證」，大

- 陸工程委託，國立台灣科技大學，1999。
- 79.黃兆龍、陳希舜、潘誠平、李隆盛、廖克弘，中鋼鐵路道岔預力 PC 軌枕開發結案報告，中國鋼鐵股份有限公司委託，2007。
- 80.ANSYS User's Manual, Swanson Analysis System, Inc.
- 81.楊榕晟，RC 構架桁架化之耐震能力擬彈性分析，台灣大學土木工程所碩士論文，2007。
- 82.潘子瑜，結構有限元素分析：理論與 AMPS 套裝軟體之應用，台灣科技大學營建工程所碩士論文，2007。
- 83.黃兆龍，高完整性承裝容器製程自動化研究結案報告，行政院原子能委員會委託，2007。
- 84.孔垂昌、李志隆、謝滄海，「RC 橋面版結構分析與設計程式」，臺灣公路工程，第 34 卷，第 6 期 pp.2-31，2008。
- 85.李嘉銘（黃兆龍指導），「添加 PP 纖維對優生混凝土體積穩定性之影響」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程技術研究所，台北（2000）。
- 86.O. Bjontegaard , T.A. Hammer and E.J. Sellevold , "Cracking in HPC before Setting Concrete" , Interational Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes , Vol. 1 , pp.1~16 (1998).
- 87.楊偉奇（黃兆龍指導），「優生混凝土耐久性質之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程技術研究所，台北（1999）。
- 88.Hansson, I.L.H. and C.M. Hansson, "Electrical Resistivity Measurements of Portland Cement Based Materials" , Cement and Concrete Research , Vol. 13, pp.675~683 (1983).
- 89.郭金祥（黃兆龍指導），優生混凝土抗蝕行為之研究，碩士論文，

國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北（1996）。

90.朱惕之（黃兆龍指導），高性能混凝土材料組成特性及早期性質之研究，碩士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北（1995）。

91.林家全（黃兆龍指導），黃氏富勒緻密配比設計法於鋼纖維混凝土高完整性承裝容器應用之研究，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程系研究所，台北（1997）。

## 附件一

### 鋼纖維混凝土盛裝容器一般規範書

#### 一、前言：

本規範範圍包括\*\*公司（以下簡稱本公司）低放射廢棄物鋼纖維混凝土盛裝容器（簡稱 HIC）之用料、製造設備、製程、試驗、收料標準、標識、驗收、保固等。

#### 二、供給材料

1. 材料，包括水泥、卜作嵐材料（飛灰、爐石、矽灰等）、鋼纖維、粗細粒料、強塑劑等項目，均由承包廠商（以下簡稱承包商）負擔。
2. 按試驗規定，完成相關試驗費用由承包商負擔。

#### 三、製造工廠設備

1. 承包商必須為工廠登記者。
2. 承包商必須自備鋼模，並備有檢驗規，以檢驗模板及成品，且鋼模必須封緊，以防漏漿。
3. 混凝土澆鑄時，承包商必須備有震動機等搗實設備。
4. 混凝土養護必須備有蒸汽養護設備，並配有溫度控制設備，以嚴格控制溫度（蒸汽養護必須徐徐加熱，最高溫度不得超過 60°C，以避免裂縫產生）。
5. 混凝土必須使用全自動拌合機及材料自動計量器計量。
6. 以上各項設備，必須在\*\*公司派員實地勘查合格後，始得製造盛裝容器。

7. 承包商如有優於以上各項規定設備或更新穎之製造設備，必須經本公司認可後，方可使用。

#### 四、材料施工規範

1. 水泥必須符合 CNS 61R1 卜特蘭水泥第 I 型規定。
2. 卜作嵐材料中，爐石粉必須符合 CNS 12594 之規定，其細度必須為  $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$  以上；飛灰必須符合 CNS 3036 規定之 F 類飛灰；矽灰必須符合 ASTM C1240-03 規定之濃縮矽灰。
3. 粗粒料品質必須符合 CNS 1240 之規定，面乾內飽和（SDD 狀態）之比重必須為  $2.65 \pm 0.05$ ，最大粒徑 9.5cm，料源取自大安溪及大甲溪河域。
4. 細粒料品質必須符合 CNS 1240 之規定，面乾內飽和（SDD 狀態）之比重必須為  $2.65 \pm 0.05$ ，料源取自大安溪及大甲溪河域之機製砂。
5. 鋼纖維品質必須符合 CNS 12892 之規定，其形狀必須為兩端彎勾型，長度為 30mm， $L/D=50\sim60$ ，配比中之使用量至少為體積比 1.5%。

#### 五、盛裝容器尺寸圖、安裝配置圖與標誌圖

鋼纖維混凝土盛裝容器斷面及各部份尺寸圖、安裝配置圖及標誌圖必須符合\*\*公司相關圖面規定。

#### 六、製造

1. 鋼纖維混凝土盛裝容器模具必須使用鋼模，鋼模組合必須正確，接縫處不得漏漿。澆鑄前必須塗覆脫膜油，以利拆模。
2. 鋼模必須依據詳圖，預留相關吊裝所須扣件。

3. 粒料必須先以水洗篩淨，以除去雜質，使配比能達到設計要求。
4. 澆鑄鋼纖維混凝土時，必須使用震動器配合施工。
5. 鋼纖維混凝土澆鑄時，視需要進行坍度試驗，每一盛裝容器在混凝土初凝前，必須連續澆鑄一次完成。控制用圓柱試體必須與盛裝容器一同蒸汽養護。
6. 鋼纖維混凝土澆置完成後，進行蒸汽養護（初凝後，溫度必須小於 60°C，持續 8 小時養護），當抗壓強度達 420kgf/cm<sup>2</sup> 以上時，以繼續濕治養護為之。
7. 試體必須隨同軌枕加以蒸汽養護，其抗壓強度 24 小時內必須達 420kgf/cm<sup>2</sup> 以上，28 天必須達 840 kgf/cm<sup>2</sup>（暫定）以上。
8. 混凝土拆模後，表面必須無蜂窩現象、突出部或膨脹處。

## 七、 監造

1. 承包商必須於簽約後 30 天內，先做一組成品（樣品），由\*\*公司檢驗其外觀尺寸，合格後再行製造。如經檢驗不合格時，在 30 天內再製造送驗一次，如送樣逾期或經二次檢驗不合格時，以無法承製論處，必須予解除合約。
2. 製造期間，\*\*公司指派之人員得隨時進出工廠，以利監製。
3. 承包商除依設計圖說提出製程說明外，並必須備妥檢查設備。
4. 所有製作盛裝容器材料必須經檢驗合格後，始得使用。
5. 所有盛裝容器運費及檢驗費均由承包商負擔。
6. \*\*公司對軌枕品質有質疑時，可要求承包商作試驗，所有試驗費用由承包商負責。

## 八、 承包商必須提出資料

1. 鋼纖維混凝土盛裝容器品保計畫書。
2. 粒料之粒徑分佈曲線圖及鋼纖維混凝土配比表。
3. 鋼纖維混凝土 28 天之抗壓強度試驗報告。
4. 盛裝容器每日生產品質控制試驗結果表。
5. 盛裝容器品質驗證試驗結果表。
6. 製造規範內，\*\*公司要求承包商必須作之試驗表。

## 九、 驗收與搬運

1. 製妥後之盛裝容器檢驗必須符合製造規範要求，檢驗費由承包商負擔。
2. 交貨地點由\*\*公司指定適當位置交貨，並由現場派員點收。
3. 經檢驗合格之盛裝容器，必須以 0.025mm 的 PE 膠膜包封，裝運時必須作適當防護以免翻落；運達\*\*公司指定地點後如發現有下列明顯製造上之缺陷時，承包商必須負責更換完好之盛裝容器，運至\*\*公司指定位置，所需運費由承包商負擔。
  - (1) 盛裝容器表面不得發現任何龜裂。
  - (2) 盛裝容器如有碰傷（擊傷）致表面脫落者。
  - (3) 盛裝容器面不得有大於 5% 總表面積的氣泡。

## 十、 保固

鋼纖維混凝土盛裝容器成品驗收後，五年內如發現任何用料不當，製程上的瑕疵及一切可歸責於承包商之缺失時，承包商自接獲通知之日起，必須於一個月內製交新品運至施工現場辦理更換，所需費用均由承包商負擔。

附件二

## 低放射性廢棄物混凝土盛裝容器設計導則

### 壹、前言

一、	使用目的 敘述保固桶的使用目的與用途。
----	------------------------

說明：保固桶之使用目的與用途，必須符合「低放射性廢棄物保固桶管制規範」之規定。

二、	適用範圍 敘述所盛裝廢棄物之種類與特性。
----	-------------------------

說明：說明欲盛裝廢棄物之種類及特性，但應符合「低放射性廢棄物保固桶管制規範」之第二條之規定。

三、	名詞定義 申請書中專有名詞與用語應明確定義並加註原文，以利查詢及對照。
----	--

說明：申請書之專業用詞應以國家標準(CNS)或習用名詞為基準，不常用或自行編譯之詞彙應按工程習慣用語，明確定義並加註原文。

四、	引用法規 詳列保固桶設計、製造及測試所採用之相關法規、標準或技術規範。
----	--

說明：敘述引用法規之目的在確保保固桶之設計、製造及測試等作業均有所依循。

### 貳、保固桶之設計

一、	功能說明
----	------

	說明保固桶設計之功能及要求。
--	----------------

說明：配合使用目的，說明保固桶之設計能符合其功能要求。

二、	<p>設計圖說</p> <p>提供保固桶之設計圖說、詳細計算書及必要之說明事項。設計圖說應標明保固桶詳細尺寸、材料材質及規格、密封方式、淨容量及空重、容許最大承重，並應詳述吊卸及運輸時注意事項。</p>
----	---

說明：保固桶的設計圖說必須能清楚說明詳細尺寸、使用材質及規格，及一切相關設計功能。

三、	<p>設計壽命評估</p> <p>依據保固桶使用之內外環境條件，以適宜的試驗規範與學理，分析保固桶之可能侵蝕，並以可信賴及機率概念模式 (REALIBILITY AND STOCHASTIC MODEL)，評估保固桶之壽命。</p>
----	--

說明：保固桶使用壽命之評估有不同理論及方法，其中可信賴及機率概念評估方法是目前最可靠之壽命評估方法，本導則特別引用之。

四、	<p>移動及固定裝置設計</p> <p>敘述保固桶之吊裝、搬運與固定方式，並做符合安全設計之說明。</p>
----	---

說明：保固桶在吊卸及搬運的過程中，必須特別注意

安全，採取必要的防護及固定措施，避免碰撞或受損。

五、	負載與強度設計 敘述保固桶所須承受之負載，包括盛裝、吊卸、搬運、堆疊、貯存及最終處置等各階段作業之負載，並設計符合安全所需之機械強度。
----	--

說明：保固桶各階段可能承受載重必須經合理的計算，據以設計保固桶各部分尺寸和需求的機械強度。

六、	密封設計 說明保固桶之密封方式、密封材料及密封評估方法，以確保保固桶於吊卸、裝載、貯存等各階段作業之密封性。
----	---

說明：保固桶頂蓋密封設計，必須能負荷設計載重，尚能維持在密封狀態。

### 參、保固桶之製造

一、	製造程序及設備 詳細說明保固桶製造設備、場區配置、人員編組、製造程序、操作方法、品管檢查要點以及暫存空間之規劃等。
----	--

說明：保固桶的製造程序及設備必須依 5 個 M 詳細說明其規畫內容。

二、	製造技術之自我評量
----	-----------

	詳細說明製造廠的相關軟硬體設備、專業技術能力、人員教育訓練等之自我評量。
--	--------------------------------------

說明：產製技術的自我評量工作在說明生產者所採用的軟、硬體設備和技術能力，是否能勝任穩定生產符合保固桶設計功能需求的任務。

三、	製造材料之管制 詳細說明製造保固桶之材料來源、相關的性質檢驗及依據之方法或規範，並應有最近半年以上的常態性品質管制詳實記錄。
----	---

說明：常態性的品質管制資料，係指材料供應廠商於供料點所進行之經常性及例行性之自我品質檢驗數據。

四、	<p>混凝土配比驗證</p> <p>詳細說明混凝土配比設計之方法及流程，以及達到所需設計性能的相關事項及其驗證結果。而達成 100 年及 300 年之混凝土年限設計其規定如下：</p> <p style="text-align: center;">混凝土容器年限設計表</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th rowspan="2">要求項目</th> <th colspan="2">設計年限</th> </tr> <tr> <th>100 年</th> <th>300 年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>拌和水量</td> <td><math>\leq 150 \text{ kg/m}^3</math></td> <td><math>\leq 140 \text{ kg/m}^3</math></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>水膠比 (W/B)</td> <td><math>\leq 0.32</math></td> <td><math>\leq 0.26</math></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>水灰比 (W/C)</td> <td><math>\geq 0.5</math></td> <td><math>\geq 0.5</math></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>28 天抗壓強度</td> <td><math>\geq 420 \text{ kgf/cm}^2</math></td> <td><math>\geq 560 \text{ kgf/cm}^2</math></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>保護層厚度</td> <td><math>\geq 40 \text{ mm}</math></td> <td><math>\geq 70 \text{ mm}</math></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>56 天電阻值</td> <td><math>\geq 50 \text{ K}\Omega\text{-cm}</math></td> <td><math>\geq 80 \text{ K}\Omega\text{-cm}</math></td> </tr> </tbody> </table>		要求項目	設計年限		100 年	300 年	1	拌和水量	$\leq 150 \text{ kg/m}^3$	$\leq 140 \text{ kg/m}^3$	2	水膠比 (W/B)	$\leq 0.32$	$\leq 0.26$	3	水灰比 (W/C)	$\geq 0.5$	$\geq 0.5$	4	28 天抗壓強度	$\geq 420 \text{ kgf/cm}^2$	$\geq 560 \text{ kgf/cm}^2$	5	保護層厚度	$\geq 40 \text{ mm}$	$\geq 70 \text{ mm}$	6	56 天電阻值	$\geq 50 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	$\geq 80 \text{ K}\Omega\text{-cm}$
	要求項目			設計年限																											
		100 年	300 年																												
1	拌和水量	$\leq 150 \text{ kg/m}^3$	$\leq 140 \text{ kg/m}^3$																												
2	水膠比 (W/B)	$\leq 0.32$	$\leq 0.26$																												
3	水灰比 (W/C)	$\geq 0.5$	$\geq 0.5$																												
4	28 天抗壓強度	$\geq 420 \text{ kgf/cm}^2$	$\geq 560 \text{ kgf/cm}^2$																												
5	保護層厚度	$\geq 40 \text{ mm}$	$\geq 70 \text{ mm}$																												
6	56 天電阻值	$\geq 50 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	$\geq 80 \text{ K}\Omega\text{-cm}$																												

7	56 天氣離子電滲量	$\leq 1000$ 庫侖	$\leq 300$ 庫侖
8	氯離子滲透係數	$\leq 2 \cdot 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$	$\leq 2 \cdot 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$
備註： 1. 混凝土中應添加矽灰、飛灰及水淬爐石粉、鋼纖維和高性能減水劑。 2. 混凝土中粒料等固態材料配合之比率應達到最大密度，其配合比例按粒徑、粒徑分佈曲線緻密堆積。 3. 混凝土中坍度之調整只能摻加高性能減水劑。 4. 混凝土容器鑄造完成後必須進行濕養護至少 7 天。			

說明：混凝土配比設計必須依據 ACI 318-95 和中國土木水利工程學會 402-88 配比設計之精神，設計三種配比，並測試所需達到性能。

五、	製程控制 詳細說明保固桶之製作過程及品質管制方法，並應具體說明達到品質均勻性及穩定性要求的方式。
----	---

說明：混凝土品質深受材料的變動而有顯著的變化。製程中應力求材料的穩定來源，混凝土則需定期測試混凝土品質的均勻性和穩定性，保證品質的重現率一致。

六、	成品品質控制 說明符合混凝土保固桶設計功能所需之檢驗項目、程序與頻率、成品貯放環境與安全貯放方法。
----	--

說明：每一個保固桶應依照檢驗項目和頻率施予必要

的非破壞和破壞性檢測，印證是否達到設計品質功能的需求。受檢後應有妥善的儲存和保護。

七、	混凝土保固桶之標誌 保固桶製作完成後應於外部依放射性廢棄物包裝容器之相關規定明確標示，並說明標誌之標示方法及位置，標誌至少包括保固桶持照者與製造者名稱、製造批號、製造日期。
----	---

說明：製作並檢驗完成後，保固桶應於表面明顯標示製作批號、日期、和製造者名稱等供辨識。

#### 肆、保固桶成品之檢驗

一、	檢驗項目 依據保固桶管制規範之要求，進行相關之檢驗與測試，以驗證保固桶符合設計功能。
----	---

說明：檢測項目均需依照保固桶管制規範之規定，逐一完成檢測，確保達到設計功能。

二、	檢驗方法 說明保固桶設計目標及功能驗證方法，包括檢驗項目、檢驗步驟及相關法規。
----	--

說明：檢驗方法若依照標準規範應列出規範名稱和編號。若無標準規範，則需列出引用的方法或文獻及學理依據供參考。

三、	合格標準
----	------

	依保固桶之設計功能列表詳細說明各項檢驗之合格標準。
--	---------------------------

說明：檢驗合格標準均須依照保固桶管制規範之規定和設計功能目標，詳列合格標準的管制值。

四、	檢驗記錄 檢驗報告應包括結果之記錄，包括檢驗單位、檢驗時間、檢驗項目及原始數據。
----	---

說明：每一項檢驗項目都應完整記載檢測時間、地點、檢驗單位、取樣時間、地點、批號、送驗人員、檢測項目和檢測數據。

五、	檢驗結果分析 統計分析各項檢驗數據，並以圖表顯示檢驗結果及品質穩定性。
----	--

說明：經常性和例行性檢測項目應按取樣時間和順序逐筆記載，使用統計圖表分析變異性，回饋生產單位參考修正。

六、	品質檢驗報告 依據檢驗方法、品質合格標準與檢驗結果及分析資料作成書面報告，證明保固桶品質符合設計功能。
----	--

說明：保固桶所經歷各項檢驗工作，應按檢驗項目逐一彙整分析後裝訂成冊，做成書面報告書供審核。

#### 伍、品質保證

一、	<p>品質保證</p> <p>為確保保固桶達到設計功能，應參照 CNS 14001 品質保證標準，撰寫品質保證計劃書，明確定義品管用語，詳列參考準則，建立共同架構。</p>
----	--

說明：為確保保固桶能符合設計功能，必須有完善的品保架構，建議參照 ISO 14000 品質保證標準，撰寫相關的品保計劃書，並明確正義品管用語，詳列引用參考準則，以建立共同之品保架構。

二、	<p>材料品質管制</p> <p>為確保保固桶之品質穩定性，必須進行材料品質管制，包括料源規模與品質穩定性分析、進料管制檢驗、貯存使用，並且建立材料品質管制資料，確保料源長期品質之穩定。</p>
----	---

說明：製造保固桶所使用之材料，從來源至貯藏都必須確實詳加記錄，以確保材料品質之穩定性。

三、	<p>配比驗證</p> <p>為確保保固桶達到設計功能，應依照選定使用之材料及設計之配比，進行混凝土配比試拌，驗證混凝土品質及其穩定性。</p>
----	--

說明：製作保固桶之混凝土材料，於澆置前必須先

經配比驗證，包括工作性、抗壓強度等相關試驗，確保品質及穩定性。

四、	<p>製程管制</p> <p>為確保保固桶符合設計功能，應以計畫-執行-檢核-修正(PDCA)的管理模式，進行量產之製程與設備穩定性測試，以確保生產之品質。</p>
----	--

說明：保固桶之生產製作過程，應有完善的產製計劃，最好以戴明循環(PDCA)的管制模式，進行產製設備、方法等之穩定性測試以保證品質。

五、	<p>成品管制</p> <p>為確保保固桶符合設計功能，必須逐個進行目視檢查與非破壞性檢測，並以隨機抽驗方式測試保固桶性能。隨機抽驗採逐批按比例進行，每批抽驗之比例不得少於該批生產個數之百分之一，且不得少於一個。抽驗不合格時應整批銷毀，並製作銷毀記錄備查。</p>
----	--

說明：保固桶製作完成後，為確保品質，須逐個經目視及非破壞檢測後，再以隨機抽樣的方式進行相關性能檢測。對於檢驗不合格者，該批次應完全銷毀，並必須備檔存查。

六、	<p>品管制度</p> <p>品質管制應參考 CNS 12681 之規定，建立品管組織架構及制度。</p>
----	---

說明：保固桶產製單位，應有完善的品管制度，建議參照類似 ISO 9001 之相關規定以建立其品保組織及架構，以利品保作業之進行。

七、	品管組織 保固桶生產廠商應設立適當之品管組織，以執行產製過程相關品質管制工作，品質管制人員應經過相關品保訓練並取得證明。
----	---

說明：保固桶產製單位依其品管制度，建立適當的品保組織，執行料源至產製過程之相關品管工作，品管人員之遴選，應以俱有品保專長或經相關品保訓練並取得證明為主。

八、	品保文件 標準品保文件包括品質手冊、標準作業程序書、標準表單等。
----	-------------------------------------

說明：保固桶從料源至成品管制，所有相關的品質文件，應依 CNS 之規定建立，並確實執行登錄。

九、	文件管制 各項品保文件應妥善編號建檔保存，並編索引，以供隨時查核、抄錄或複製，而品管文件應按規定長期保存。
----	--

說明：為落實品質稽核，所有相關品質文件應妥為編碼建檔，並應有詳細之目錄可供查詢和查核，對於品管文件之保存應依規定妥善保存

至管制年限或長期保存。

#### 其他相關資料

一、	參考文獻 本申請書所引用的法規及文獻，應註明名稱、來源、日期及引用頁數等。
----	--

說明：書寫本申請導則各章節所需引用的文獻應註明出處。

二、	分析報告 應提供保固桶設計及分析之詳細計算書，包括使用程式說明書、保固桶設計所輸入之參數及輸出之報告。
----	--

說明：引用電子計算機輔助分析保固桶相關性能時，必須附程式說明書，並載明輸入參數及輸出結果。

三、	其它國家認證資料 保固桶若已獲得其他國家認證者，乃應依本申請書導則提出申請，並檢附認證國家之認證證書及相關文件備查。
----	---

說明：已領有其它國家認證之保固桶，乃需依照本申請書則提出申請。相關認證文件應備齊做為附件備查。

#### 附件三

# 鋼纖維混凝土盛裝容器製造規範

## 簡介

本規範的目的在提供鋼纖維混凝土盛裝容器製造之指引，盛裝容器適用於處置低放射性廢棄物。混凝土盛裝容器，採用美國 HIC 測試程序。本規範內容包括材料標準、製造程序與品質測試驗證方式。

## 1 一般說明

### 1.1 範圍

本規範適用於處置低放射性廢棄物鋼纖維混凝土盛裝容器相關之組成材料、混凝土品質、製造和模型、混凝土拌和、澆置和養護、脫模、搬運和儲存、品質保證、每日生產品質控制和品質驗證等。

1.2 混凝土配比審查，混凝土配比設計依服務壽命須符合「設計導則」之規定

### 1.3 盛裝容器設計

混凝土盛裝容器之設計，係能符合淨容量能直接置入，現有 200 公升低放射性廢棄物處置鋼桶之鋼纖維混凝土盛裝容器。

### 1.4 盛裝容器組成和尺寸

1.4.1 混凝土盛裝容器使用高耐久性鋼纖維混凝土，不設置鋼筋。

1.4.2 混凝土盛裝容器尺寸、依申請單位需求詳繪設計圖。

## 2 材料

### 2.1 卜特蘭水泥

卜特蘭水泥必須為符合 CNS 61 規範規定之卜特嵐 I 型水泥。

## 2.2 卜作嵐材料

爐石粉必須符合 CNS 12594 規定且細度必須達到  $6000\text{cm}^2/\text{g}$  以上；飛灰必須符合 CNS 3036 規定之 F 類飛灰；矽灰必須符合 ASTM C1240-03 規定之濃縮矽灰。

## 2.3 混凝土粒料

粗細粒料必須淨潔、堅硬、強固、耐久並且沒有污染物質，並符合 CNS 1240 A2029 混凝土粒料規範規定，粗粒料必須包括壓碎的粒石或碎石，粗粒料級配的建議篩號為 3/8" 到 #4。

## 2.4 水

混凝土的拌和水必須適於飲用而且不含油類、酸類、鹼類、鹽類、有機物，或其他對混凝土或鋼筋有害的物質，除此之外，拌和水中氯離子含量不得超過 500ppm。

## 2.5 高性能減水摻料

高性能減水摻料必須符合 CNS 12283 A2219 混凝土化學摻料規範中 F 或 G 級，且不得含有氯化物的成份。

## 2.6 鋼纖維

鋼纖維材料必須符合 CNS 12892 A2247 鋼纖維混凝土用鋼纖維要求，鋼纖維形狀為兩端彎勾形，其長度為 30 mm， $(L/D)=50\sim 60$ ，或經由試驗證明有相同效果之  $(L/D)$  纖維，

但形狀限制均為兩端彎勾形，配比用量至少為混凝土體積比之 1.5%。

### 3 混凝土品質的確保

#### 3.1 混凝土品質

3.1.1 含水量必須能符合強度需求及澆置需要最低的稠度，混凝土配比設計以生產 28 天設計抗壓強度，100 年服務壽命須  $\geq 420 \text{ kgf/cm}^2$ ；300 年服務壽命須  $\geq 560 \text{ kgf/cm}^2$ ，試驗採用  $100\phi \times 200\text{mm}$  的標準圓柱試體（見 3.4 節）。

#### 3.2 混凝土配比

3.2.1 除非「申請者」資料足以證明其混凝土配比可滿足混凝土盛裝容器的生產，否則混凝土配比設計必須經由試拌以確立達到規範要求強度的混凝土配方。

3.2.2 水泥含量每立方公尺不得超過 200kg。

3.2.3 粒料最大的尺寸應為 9.5 至 12.5mm 範圍。

3.2.4 水膠比（水 / 水泥加上卜作嵐材料重量比），100 年服務壽命須應  $\leq 0.32$ ；。300 年服務壽命須應  $\leq 0.26$ 。

3.2.5 試拌配比使用粒料、水、水泥和摻料以組成製造盛裝容器之混凝土必須使用至少 3 種不同的水膠比以產生涵蓋 3.1 節規定強度範圍的水膠比，每個試驗齡期至少必須製作 3 個試體，經養護後試驗之（見 3.4 節）。此強度試驗必須在 28 天的齡期時進行試驗，並且據以繪製水膠比及抗壓強度的關係曲線，而由曲線找出混凝土所容許的最大水膠

比，可產生如 3.1 節中註明強度的 110% 為平均強度，而水膠比必須小於 3.2.4 節中所要求。

3.2.6 本規範提供表 3.2.6.1 之鋼纖維混凝土參考配比。參考配比混凝土品質係依據 3.1.1 之規定；配比限制條件符合 3.2.1 至 3.2.4 之規定。此外，參考配比使用之材料符合本規範 2.1 至 2.6 之規定，粒料與膠結料之料源部分必須符合表 3.2.6.1 之註 2 之規定料源，否則必須加以驗證通過才能使用。

3.2.7 為確保混凝土品質，「主管單位」可不定時抽驗混凝土配比。將新拌混凝土取適量以水洗法方式洗淨，檢查固含量（包含粗、細粒料及纖維等）比例，必須與原始配比相近。

表 3.2.6.1 鋼纖維混凝土盛裝容器參考配比（單位：kg/m<sup>3</sup>）

水泥	爐石粉	飛灰	矽灰	細粒料	粗粒料	鋼纖維	水+強塑劑
328	109	93	32	833	915	58.5	135

註：1.本配比水膠比（w/b）<0.26；鋼纖維用量為整體體積 1.5%。

2.材料料源：

(1) 水泥：台灣水泥公司生產的普通卜特蘭 I 型水泥

(2) 粗細粒料：中部地區大安溪及大甲溪所開採之碎石及河砂。

(3) 爐石粉：中聯爐石處理資源化股份有限公司之細度 6000(cm<sup>2</sup>/g)爐石粉。

(4) 飛灰：台電興達火力發電廠符合 CNS 3036 規格之 F

級飛灰。

(5) 矽灰：採用 Elkem Materials 公司符合 ASTM C1240-03 規格之矽灰。

### 3.3 混凝土配比和稠度

配比中之粒料和水膠比，必須使混凝土能迅速地填滿盛裝容器模型的邊緣和角落，且以適當的震動機具助其澆置，但不允許材料析離或表面產生泌水現象。

### 3.4 混凝土抗壓強度測試

3.4.1 抗壓強度試驗被用來確認拌和配比是否適當及可否被接受的基礎，抗壓試體的取樣必須依照 CNS 1174 「新拌混凝土樣品取樣方法」，而養護必須依照 CNS 1231 A3044 「混凝土抗壓和撓曲強度試體製作及養護方法」施行之。強度測試必須依照 CNS 1232 A3045 的指示使用  $100\phi \times 200\text{mm}$  的圓柱試體，依據圓柱混凝土試體之抗壓強度測試規定，混凝土拌和當天至少必須製作 6 個試體，其中 2 個用來確定承裝容器可搬運時的強度，另外 2 個用來量測 56 天強度，剩餘 2 個備用。

3.4.2 撓曲強度測試必須用來確認拌和配比是否適當，及當作配比設計接受與否的基礎，撓曲試驗試體的製造必須依據 CNS 1231 A3044 規定製造和養護混凝土撓曲強度試體的相關規範為之。

撓曲強度測試必須用  $150 \times 150 \times 500\text{mm}$  的梁，依照相關之

CNS 「混凝土撓曲強度測試方法」(使用 3 分點荷重法)。此撓曲強度測試在 28 天時必須超過 84 kgf/cm<sup>2</sup>。

### 3.5 表面電阻試驗

採用 C.N.S Electronics LTD 所生產之 Concrete Resistivity Meter 或相同功能之四極式電阻儀，於齡期 56 天進行試驗；100 年服務壽命須  $\geq 50\text{K}\Omega\text{-cm}$ ；300 年服務壽命須  $\geq 80\text{K}\Omega\text{-cm}$ 。

### 3.6 混凝土氯離子電滲試驗

依 ASTM C1202 或 CNS 14795 「混凝土抗氯離子穿透能力試驗法-通過電荷量表示法」規定，於齡期 56 天進行試驗。100 年服務壽命須  $\leq 1000$  庫侖；300 年服務壽命須  $\leq 300$  庫侖。

### 3.7 混凝土氯離子擴散試驗

依 NEL 法於齡期 56 天進行試驗；100 年服務壽命須  $\leq 2*10^{-13}\text{m}^2/\text{s}$ ；300 年服務壽命須  $\leq 2*10^{-14}\text{m}^2/\text{s}$ 。

## 4 製造和模型

### 4.1 製造方法

盛裝容器必須以實際生產線製程製造之。

### 4.2 模型

4.2.1 模型必須為鋼模，且達成圖面設計盛裝容器所需的形狀、線條和尺寸，而且公差不得超過  $\pm 2\text{mm}$ 。

4.2.2 盛裝容器的模型組立，必須足以承擔鋼纖維混凝土之側壓

力及澆置時之工作應力，並且要求不損及盛裝容器。

4.2.3 模型必須以凹入或凸起的字母或數字提供適當的標誌，以標明製造商和生產年代，標誌必須放置在盛裝容器中間的頂端表面或靠近盛裝容器末端。

## 5 混凝土的拌和、澆置和養護

### 5.1 混凝土澆置前的準備

在混凝土澆置前，所有用來拌和混凝土的設備必須清除淨潔。模型必須徹底塗上脫模油，並詳細檢查確認模型的接縫的緊密性以及埋置物件等位置之尺寸是否準確。

### 5.2 材料組成配比

5.2.1 粗粒料、細粒料、水泥及卜作嵐材料必須以重量為計量，粒料的重量必須以面乾內飽和為基礎。

5.2.2 水和高性能減水摻料可以重量或體積計量。

5.2.3 混凝土組成成分的量測精度必須依照 CNS 3039 之規定，並符合下列量測精度範圍內：

水泥	1%
水	1%
卜作嵐材料	1%
其他摻料	1%
細粒料	2%
粗粒料	2%

### 5.3 混凝土的拌和

5.3.1 混凝土拌和必須能在規定的時間內藉著拌和設備，完成均

勻混合為目的，且卸料時不會產生析離現象。

5.3.2 所有的混凝土必須拌和直到均勻分佈，且於後續加料前將混凝土完全卸出。

5.3.3 最恰當的拌和時間，必須事先加以測試，建議每 0.75 立方公尺配方以下的一組拌和時間最少需 1 分鐘，其後每增加 0.75 立方公尺則至少增加 15 秒。

#### 5.4 輸送

5.4.1 混凝土必須以最快且可以防止析離和流失的方式，自拌和器輸送到最終卸料的地點。

5.4.2 瀉槽、幫浦和氣壓式混凝土輸送設備的尺寸和設計必須能確保混凝土的流動，而沒有析離現象。

#### 5.5 堆置

5.5.1 混凝土堆置必須在靠近最終的適當位置，以避免由於再移動或混凝土的流動而產生析離，混凝土若有部份硬化或被外來物質污染時不得再使用。

5.5.2 混凝土澆置之氣溫應在 10°C 至 33°C 間，當周圍溫度是 33°C 或更高溫時，必須做些特殊處理，如立即在表面上覆蓋薄膜或儲水，以防混凝土快速乾燥。

#### 5.6 搗實

5.6.1 混凝土澆置時，必須藉震動達到完全搗實的目的，且必須在預力組件和預埋套管周圍及模型的角落充分搗實。

5.6.2 如必要時可在外部模型加裝震動裝置，以確保混凝土均勻

性。

5.6.3 當混凝土在搗實時必須保護模型不受到損害。

## 5.7 養護

5.7.1 混凝土澆置後可以低壓蒸氣、輻射熱和水分，或是其他可接受的方法進行養護，以加速混凝土增加強度，以便可提早拆模和堆置。

5.7.2 養護的程序必須達到如 3.1 節所述的混凝土強度要求。

## 6 脫模

6.1 盛裝容器自模型中移出，必須避免受到損傷。

## 6.2 整飾

6.2.1 所有完成的盛裝容器表面必須有一個均勻緊密的表面，盛裝容器墊端的表面必須平滑，表面氣孔及蜂巢現象不得超過 2%，且最大氣孔直徑不得超過 6mm。

## 7 搬運和儲存

### 7.1 搬運

盛裝容器在製造過程中的脫模、搬運和堆存時必須防止盛裝容器受到切傷、剝落、裂痕或其他損害。

### 7.2 儲存

當盛裝容器多層堆存時，每層間必須使用適當厚度的小木塊來隔離盛裝容器，避免容器邊緣受損。

## 8.品質保證—驗收測試

### 8.1 設計認定測試

#### 8.1.1 基本測試要求

混凝土盛裝容器承包商經過認可後，必須依據本規範驗收測試要求，提出「鋼纖維混凝土盛裝容器製作品保計畫書」，內容包括材料進料管制、材料配比管制、盛裝容器製作標準作業程序等。依此規範生產的盛裝容器，由「管制單位」派員選取盛裝容器試體進行實驗測試。

#### 8.1.2 設計測試的程序（盛裝容器墜落試驗）

高完整性承裝容器墜落測試前，須準備三個承裝容器，並各於容器中裝填濕砂至離容器頂部約 8 cm 處，而後以混凝土封閉頂部，當齡期達 28 天時，始可進行墜落測試，步驟如下：

於鋪設 50 cm 厚之混泥土地面上，以吊裝設備將承裝容器垂直 90 度提起約 150 cm（100 年服務壽命為 100cm；300 年服務壽命為 150cm）（見圖 8.1）。鬆拖吊裝承裝容器上之鎖扣，使承裝容器依自重墜落地面。觀察承裝容器之損壞程度，若目視有明顯破壞或是裂縫出現，則該批承裝容器不合格；反之，若目視無損傷或是不影響承裝容器結構品質者，方為合格。依據前三項步驟，分別再進行承裝容器 45 度及 180 度之墜落測試。

### 8.2 高壓滲漏試驗

墜落試驗後，經目視檢測合格者，5kgf/cm<sup>2</sup> 之水壓力檢測容器有無滲漏問題。有滲漏則為不合格。

## 9.每日生產品質控制測試

試驗頻率：每 50 個盛裝容器或每日同一批澆置盛裝容器隨機抽測一個進行前述試驗。試驗不合格則 50 個或該生產批次容器視為無效，產製單位不得異議。

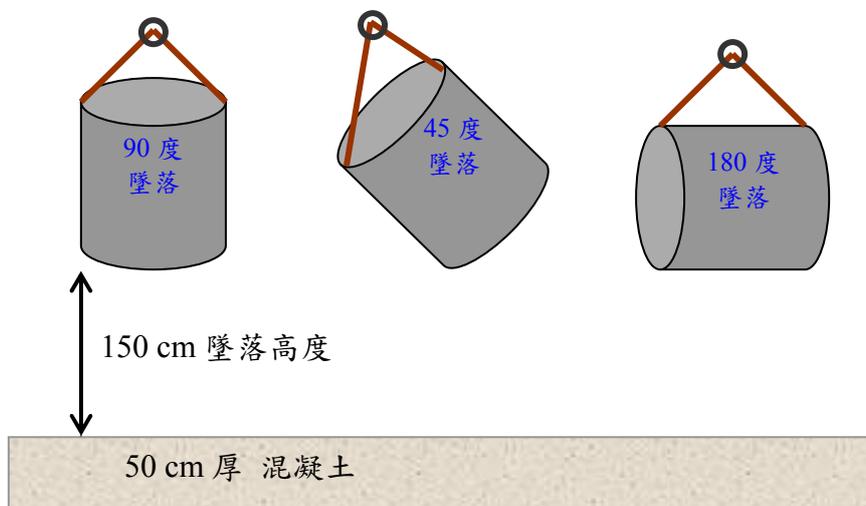


圖 8.1 盛裝容器墜落測試示意圖

查意見表

審查日期：97年11月12日

審查意見：共4頁7項

編號	01	章節	綜合	頁碼		行數	
審查意見							
關於主要工作項目「1.國際放射性廢棄物設施及現存古蹟混凝土結構長期安全相關技術成果與研究文獻之蒐集研析：蒐集國際間低放射性廢棄物設施及具代表性之古蹟混凝土結構物之設計基準、材料與施工品管要求及測試方法等之蒐集及研析。」經97年8月8日期中查訪，其蒐集相關文獻篇數共計52篇，此點符合當時所訂進度，值得嘉許。但於此篇報告中提及查訪時所蒐集之文獻並不多，請說明原因。另請再增述國外低放最終處置場混凝土工程障壁耐久性相關設計資料，並提供參考資料來源。							
答覆說明							
文獻蒐集係以 keyword 「耐久性及核廢棄物」搜尋，蒐集了五十餘篇文獻。詳閱內容後，關於低放最終處置場混凝土耐久設計相關資料較少；不過已經儘量將蒐集之資料加入。							

編號	02	章節	綜合	頁碼		行數	
審查意見							
關於主要工作項目「2.混凝土工程設施結構應力分析軟體評析：針對現有混凝土工程設施結構應力分析軟體的功能、操作介面、適用性及可靠性等加以蒐集研析，以備供低放射性廢棄物處置場設施混凝土結構工程設計分析之參考。」本篇研究報告中並未提及此項工作項目，請補正。							
第二次審查意見							
修正二版報告中提及 ANSYS、SAP、ETABS、ABAQUS、LS-DYNA、AMPS、SLAB2 等軟體進行評析。其中對於 ANSYS、SAP、ETABS、ABAQUS 有較為詳細之描述，但對於 LS-DYNA、AMPS、SLAB2 僅概略提及，將請計畫主持人再加以詳盡描述之。							
答覆說明							

已於相關章節中說明。

編號	03	章節	綜合	頁碼		行數
審查意見						
<p>1. 關於主要工作項目「3.放射性廢棄物各種年限混凝土盛裝容器設計導則之建立：至少包括 100 年及 300 年兩種使用年限之混凝土盛裝容器之設計基準、製造材料方法與品管要求及測試檢驗方法。」本篇研究報告僅提及數種增加混凝土耐久性之方法，並未提及 100 年及 300 年兩種使用年限之混凝土盛裝容器之各項相關項目，請補正。</p> <p>2. 本項計畫主持人黃兆龍教授曾協助研析 89 年核能研究所「低放射性廢棄物高完整性盛裝容器（HIC）品質及檢驗規範之研擬」，且該項研究對本計畫極具參考價值，故請參酌該項研究之成果報告力求精進。</p>						
第二次審查意見						
<p>1. 已於修正二版報告 4-6 節中提及 100 年、300 年兩種使用年限之混凝土容器各項相關項目（含拌合水量、水膠比、水灰比、28 天抗壓強度、保護層厚度、56 天電阻值、56 天氣離子電滲量）。但各項數值的由來均未說明，且一般建物之梁、柱等構件保護層厚度均已要求至少須 40mm，使用年限 100 年之混凝土盛裝容器保護層厚度僅要求 40mm 是否足夠？將請其詳細說明之。另外，抗壓強度之單位為 <math>\text{kgf/cm}^2</math>，而非 <math>\text{kgf/m}^3</math>，將請其更正。</p> <p>2. 修正二版報告已將前項 100 年、300 年兩種使用年限之混凝土容器各項相關項目（含拌合水量、水膠比、水灰比、28 天抗壓強度、保護層厚度、56 天電阻值、56 天氣離子電滲量）納入設計導則之「混凝土配比驗證」項目，另外將請計畫主持人針對主要工作項目 3.中之 100 年及 300 年兩種使用年限之混凝土盛裝容器之設計基準、製造材料方法與品管要求及測試檢驗方法等進行補充。</p>						
答覆說明						
<p>1. 於附件三中補充說明。抗壓強度之單位為 <math>\text{kgf/cm}^2</math> 已於本文中更正。</p> <p>2. 由於混凝土水膠比低，品質優良，故保護層厚度至少 40mm 足夠。</p> <p>3. 說明中之相關數據，以過去研究成果與「加拿大跨峽大橋」之設計數據比較後所建立。</p>						

編號	04	章節	綜合	頁碼		行數	
審查意見							
一般而言，混凝土試驗均會參照 ACI 及 ASTM 規範，但本研究之內容參照上述二規範者極少，請說明原因。							
答覆說明							
在內文中常引用說明 ACI 318-89 或 ACI 318-95 混凝土設計規範，雖然 ACI 318-95 以後之規範開始採水膠比(W/B)設計，容許配比中加入卜作嵐材料，並且建議考量耐久性設計時最大水膠比(W/B)之限制，但是其配比邏輯係以工作性來決定用水量導致漿量可能偏高一樣會衍生耐久性問題。所以本文針對混凝土設計除不直接參考其規範，並加入用水量及水泥量之限制，以確保混凝土耐久性。至於材料之試驗，當然應依標準規範進行並以 CNS 為主，CNS 沒有規定者才參考 ASTM，會於檢驗規範中說明。							

編號	05	章節	3-3	頁碼	66	行數	
審查意見							
因混凝土結構耐久性要求，又沿海區域須考慮防蝕之原因，報告中建議水膠比應小於 0.4 (強度 > 350kg/cm <sup>2</sup> )，係基於結構體暴露於海水、鹽霧等氯離子環境中之設計值，今若為非暴露於海域環境之坑道式低放最終處置場者，其水膠比、強度要求及鋼筋保護層厚度應為何？							
答覆說明							
在台灣四面環海的環境下，又地處亞熱帶區域，是個潮濕燠熱的環境，加上混凝土受到工業造成的酸雨之侵蝕，混凝土之結構物可能產生嚴重劣化，尤其核廢棄物之存放處置場必須有更高的標準及要求，其水膠比、強度要求及保護層厚度等要求如第四章所示。							

編號	06	章節	6-1	頁碼	131	行數	
審查意見							

本節第 4.項提到「水泥型別採用普通第 I 型水泥」，然而第 II 型水泥（改良水泥）產生之水化熱較第 I 型水泥為低，且具中度抗硫能力（即抗硫能力亦較第 I 型佳），請說明水泥採用第 I 型而不採用第 II 型之原因。

答覆說明

本研究所指混凝土耐久性之設計係採用低水泥量及低水量之策略配比，基本上即可大量減少水化熱與硫酸鹽侵蝕的水泥熟料礦物(C<sub>3</sub>S 及 C<sub>3</sub>A)之總量，並且因為添加卜作嵐材料，反而需要 Ca(OH)<sub>2</sub> 等鹼質物的激化作用，產生水化產物 C-S-H/C-A-H 之膠體，進一步消耗會造成硫酸鹽侵蝕的 Ca(OH)<sub>2</sub> 的量，也因為消耗了其他鹼質物(Na, K)，更可減低鹼骨材反應之風險。當然 I 型水泥為普遍即大量生產的水泥，生產技術好，品質佳又穩定，所以採用 I 型水泥比 II 型水泥更適宜。

編號	07	章節	伍	頁碼	123~125	行數	
審查意見							
內容修正：p.123 最後 1 行「兆元」建請修訂為「兆位元組」；p.124 倒數第 2 行「求解處理器功能強大」建請修訂為「功能強大的求解處理器」；p.125 第 3 行「後處理器方便」建請修訂為「方便的後處理器」。							
答覆說明							
已修正。							