

混凝土材料大氣曝露試驗⁺

林維明*

摘 要

鋼筋混凝土結構物因材料、設計、施工與使用不當，容易發生腐蝕而影響其耐久性。最適切的方法為利用長期曝露實驗，以便能發掘耐久性問題。本文主要目的為概述國內外混凝土材料在大氣曝露試驗之研究計劃及部份試驗結果。同時檢討大氣曝露試驗場設置和試驗應注意之事項；探討曝露之方法及大氣因子蒐集之方法。透過曝露試驗結果將更能瞭解新產品及新建結構物之性能，且對現行規範採行或修正較有更有有力之依據可循。

一、前言

鋼筋混凝土為主要建材之一，具可塑性、經濟性、耐火性，及耐久性等優點，然而如果材料配比不當，施工不良或超載等現象發生時，則容易造成混凝土表面發生龜裂，大氣中所含之氯離子和氧氣易穿透裂縫至鋼筋處而造成鋼筋腐蝕，因而鋼筋會發生體積膨脹而加速混凝土龜裂之擴張，如此惡性循環，將降低其耐久性。

鋼筋混凝土之耐久性可定義為具有抵抗其性質變化之能力。即可長久保持其原狀，品質與服務性。由於混凝土為一種複合材料，其組成材料之性質與配比會影響混凝土性質，因此使用之水泥種類、骨材、拌合水、摻料、氯化物含量等都需加以規定。另外對單位水泥用量、水灰比、空氣含量等配比都必須合理。而在工程設計方面如保護層厚度、裂縫寬度限制，混凝土強度等應加注意，同時在施工階段如養生條件、夯實性佳，或使用熱浸鍍鋅鋼筋，環氧樹脂鋼筋或安裝陰極防蝕，混凝土表面塗裝防水材料等都是可確保長

期使用耐久性之影響參數。參考文獻 1 列有日本、美國、英國、法國及挪威等先進國家制定之海洋混凝土結構物耐久性規範。

由於混凝土之物理及化學性質隨時間與環境之天候、物性、化性及生物性之作用而變。在長期環境作用下，則混凝土本身會與腐蝕因子作用而產生腐蝕生成物，可能阻止或加強其破壞性。因此充分瞭解現地材料之耐久性，最合理的方法為有計劃地進行曝露試驗，以便能清晰地瞭解混凝土材料之長期性能變化，並可提供工程設計之依據。這是近年來各先進國家投入大量財力、物力及人力進行大氣曝露試驗之原因，也是本文研討之目的。

二、國內外混凝土材料大氣曝露試驗介紹

以下就台灣省交通處港灣技術研究所、美國陸軍工兵署、美國拉貴腐蝕技術中心、日本運輸省港灣技術研究所、日曹專精營建公司、日產化工公司、日本建設省建築研究所及英國能源部等

*省交通處港灣技術研究所研究員

⁺本文已發表於材料大氣腐蝕研討會（民國80年6月）

單位所進行之混凝土材料大氣曝露試驗作扼要之介紹。

(一)台灣省交通處港灣技術研究所

港研所為探討混凝土耐久性於民國75年7月開始進行「港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究」計劃，而於民國77年初規劃曝露試驗工作，並邀請各界專家學者研商，同年10月陸續投入龐大的人力製作試體。試體擺放情形如下：

1. 本所海水循環水槽：海中區擺置1305個試體，潮汐帶擺放1017個試體。
2. 台中港3號碼頭（貯水池碼頭斜坡上）潮汐帶擺放81個試體。
3. 本所試驗大樓三樓平房屋頂上，距台中港碼頭約250公尺處之大氣區共擺放270個試體。

本研究仍在初期執行階段，現階段尚無試驗數據，僅就大氣曝露試驗之規劃工作要項說明如后：

1. 試體大小：直徑15公分，高度30公分之圓柱體
2. 保護層厚度：在圓柱試體配置三支鋼筋，其保護層厚度分別為2公分、4公分及7公分。
3. 鋼筋：有些試體不加鋼筋而埋設鋼筋者採用直徑1公分、長度27公分，表面刨光之圓型鋼筋，其兩端亦加工磨光並以丙酮清洗鋼筋表面之油脂及稱重。
4. 水灰比：採用0.4、0.5及0.7三種。
5. 水泥種類：卜特蘭水泥ASTM一型，二型及五型三種。
6. 摻料：加飛灰(20%)、矽灰(10%)或不添加任何摻料。
7. 混凝土配比與澆置依美國混凝土學會及美國材料與試驗學會(ASTM)之規範執行。澆置完成後之試體置於養生室控制溫度在 $23 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 下，經28天後，再置於大氣養生4至5天後，在試體兩端上下各約2公分及底側均塗上環氧樹脂，避免海水由兩底端滲進混凝土試體，密封

完成後將試體搬運至試驗大樓屋頂上擺放（圖一）。

8. 測試：將擺放於曝露現場之試體，按時取回試驗室分析腐蝕速率，劈裂試體以便觀測腐蝕型態並以複製膜求出腐蝕面積，而以鋼筋軸向兩側各12公分共24公分之範圍為量測區域。將鋼筋表面之鐵銹以化學藥品清洗，稱重並與試驗前磨光無銹之鋼筋比較，可得鋼筋銹蝕之重量損失量。

另外沿混凝土試體表面往內1, 2, 3, 3-5, 5-10, 10-15公分之深度切割，每一段試體依ASTM規範磨成細粉，測定各段所含之氯離子含量，因此可推算氯離子之滲透速率。

經過長期曝露，按時試驗分析結果則可研判使用何種保護層厚度、水灰比、水泥種類和摻料等參數對鋼筋混凝土銹蝕之影響性。

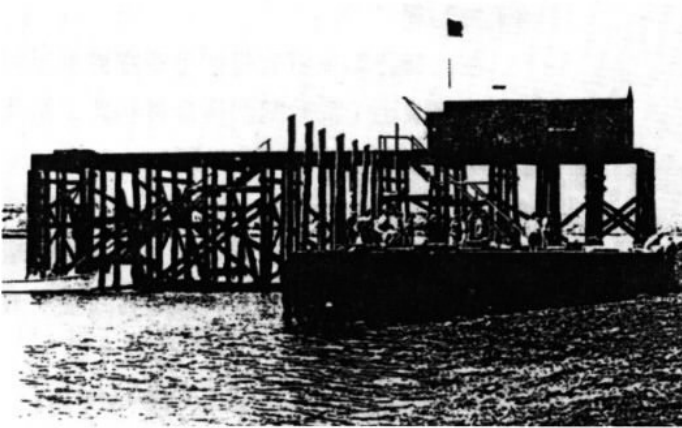
(二)美國崔特島曝露試驗場研究情形

1. 選址理由：本地區之均潮差為5.5公尺，最高可達9.15公尺，每年平均凍融循環有135次，有時可達242次，在如此嚴酷的乾濕與凍融反覆作用下，混凝土材料容易因破壞而失去其強度（圖二）⁽²⁾



圖一 港灣技術研究大氣曝露試體擺置情形
Fig.1 The natural weathering exposure station, Institute of Harbor and Marine Technology, R.O.C.⁽²⁾

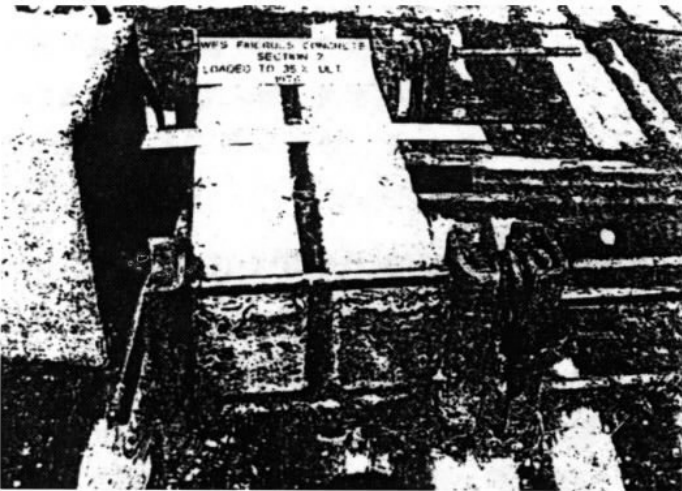
混凝土材料大氣曝露試驗



(2a) 崔特島上置放試體與停泊檢視船之木製平台



(2b) 置放於海灘上之混凝土試體



(2c) 施加應力之纖維混凝土樑之耐久性試驗



(2d) 長年試驗後混凝土破損情形之比較。

圖二 美國崔特島曝露試體擺放及破損情形⁽²⁾

Fig.2 The natural Weathering exposure station, Treat Island, U.S.A.⁽²⁾

2. 研究範圍：在此地有美國陸軍工兵署，美國墾務局，Mobil石油公司及加拿大礦業與能源技術中心等四個單位進行研究⁽²⁾、其研究範圍分別概述如下：

(1)美國陸軍工兵署

本單位所進行之研究包括鋼筋及預力混凝土、纖維混凝土、高分子混凝土、硫磺含漏混凝土、混合材及強塑劑等，歸納代表性結果如下⁽³⁻⁵⁾：

- a. 使用C₃A含量高與鹼含量高之水泥及使用具鹼性反應之骨材和未添加波索蘭材料之條件下，在自然曝露情況下，顯示有嚴重之破壞現象。
- b. 使用骨材種類對混凝土之抗海水性有顯著之影響。
- c. RC 與 PC經過25年之曝露試驗結果，發現持續荷重與破壞荷重無關，保護層厚度大於20公分則不會發生腐蝕。使用鋁粉之膨脹性水泥漿由於氫脆，會降低PC鋼材之韌性，導致相當危險之腐蝕現象。
- d. 用輸氣劑對抗凍融有良好之效果。
- e. 使用高爐石水泥可節省35%水泥含量，而且可增加抗硫酸鹽侵蝕及鹼性骨材反應之能力。

(2)美國墾務局

在此進行二項研究包括①注膠混凝土與高分子混凝土，②船閘門修復材料與工法及③水壩保固結構等之耐久性研究。

(3)Mobil石油公司

進行有門關高強度輕質混凝土在海岸環境下之長期行為是北海重力式平台建造所最關切之問題。

(4)加拿大礦業與能源技術中心(CANMET)

CANMET自1978年起曾與加拿大之New Brunswick大學合作進行九個階段之研究、其目的在決定填加高爐石、飛灰、矽灰與強塑劑後之混凝土耐久性之達到節省水泥與減少公害之效果。研究範圍如表一所示^(2,6)。

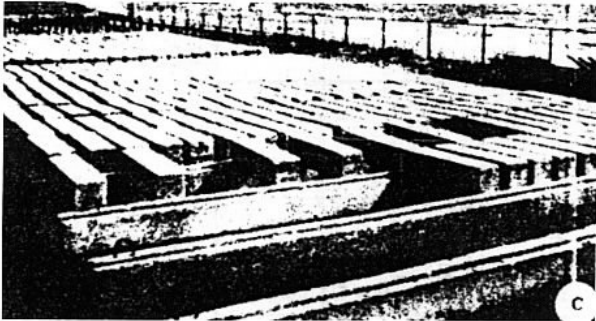
(二)美國拉貴腐蝕技術中心(LaQue Center for Corrosion Technology Inc. U.S.A.)

本單位在美國北卡州 Kure 海灘上，設置兩個大型的大氣曝露試驗場佔地約15,000m²，分別距海岸線25公尺及250公尺，可承受嚴酷之海洋大氣條件及大量之日曬與溫和之海岸曝露條件。自1935年就有各種試體在此進行曝露試驗，而在1961年8月開始有各項鋼筋混凝土之海洋大氣曝

表 1 CANMET在崔特島曝露試驗場進行之研究計畫概況[2,6]
Table 1 CANMETS research program of natural weathering exposure station, Treat Island, U.S.A [2,6]

期 別	關 始 時 間	水 泥 種 類 (ASTM型別)	使 用 摻 料	骨 材
1	1978	1	高爐石、輸氣劑	卵石
2	1979	1, II, V	飛灰、輸氣劑、高爐石	卵石
3	1980	1, V	飛灰、輸氣劑	膨脹性頁岩
4	1981	1, V	飛灰、輸氣劑、矽灰	白雲石之石灰岩石
5	1982	1	矽灰、輸氣劑	白雲石之石灰岩石
6	1983	II	矽灰、輸氣劑、矽灰、強塑劑	膨脹性頁岩
7	1984	1	矽灰、輸氣劑、強塑劑	膨脹性頁岩
8	1985	1	飛灰、輸氣劑、強塑劑	卵石
9	1986	1	飛灰、高爐石、矽灰、輸氣劑、強塑劑	卵石

露試驗進行，圖三為試體擺放情形，表二及圖四為經過11年曝露試驗後所顯示之結果，顯示使用



圖三 美國拉貴腐蝕技術中心大氣曝露試驗情形⁽⁷⁾

Fig.3 The natural weathering exposure station, La-Que Center of Corrosion Technology Inc., U.S.A.⁽⁷⁾

ASTM A615和低合金鋼之鋼筋與鋼筋上面有塗上一層金屬塗料比較，前者會造成嚴重之色裂與剝落現象，而有塗膜者，防蝕效果較佳⁽⁷⁾。

(四)日本運輸省港灣技術研究所

1. 鹽害實況調查

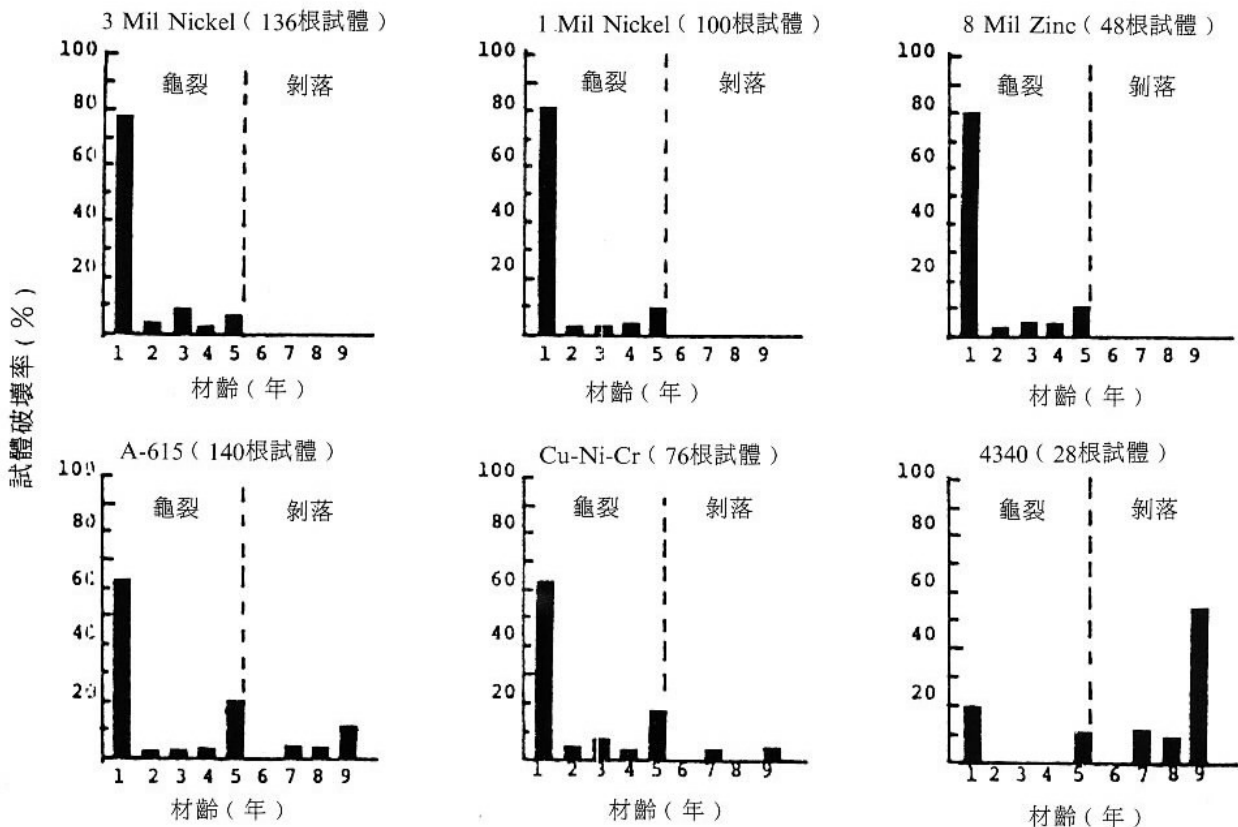
棧橋式碼頭較容易受鹽害，碼頭上之樑約有27%受鹽害。

2. 大氣曝露試驗

· 地點：離日本港研所護岸約10公尺之海岸地方。

· 十年齡期之曝露試驗結果^(8,9)

a. 拌合水、水泥及保護層厚度對腐蝕面積



說明 1 未破壞 4 中度龜裂 7 有點剝落
 2 細微裂紋 5 嚴重龜裂 8 中度剝落
 3 有點龜裂 6 細微龜裂 9 嚴重剝落

圖四 混凝土試體埋設各種不同型態之鋼筋及塗佈後經十一年大氣曝露後之破壞情形⁽⁷⁾

Fig.4 The failure phenomenon of RC specimens for eleven years natural weathering exposure.⁽⁷⁾

表 2 鋼筋混凝土試體，大氣曝露試驗結果 [7]
Tbale 2 Natural weathering exposure testing results of reinforcing concrete specimens. [7]

鋼筋使用材料	塗 3mil 厚鍍材		塗 1mil 厚鍍材		塗 8mil 厚鍍材		ASTMA615 鋼材		Ni-Cu-Cr 合金鋼材		4340 型鋼材	
	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋
混凝土保護層厚度	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋	1/2 英吋	1 1/2 英吋
I 型水泥 7.4 加侖， 加摻料	嚴重龜裂 (6-40)	未龜裂 (1)	嚴重龜裂 (25-45)	未龜裂 (0-9)	—	—	嚴重龜裂 (25-60)	未龜裂 (1-25)	些微剝落 (50-75)	未龜裂 (0-2)	嚴重剝落 (10-50)	—
I 型水泥 8.0 加侖， 加摻料	嚴重龜裂 (40-60)	未龜裂 (0-25)	嚴重龜裂 (15-65)	未龜裂 (3-6)	—	—	嚴重龜裂 (75-95)	未龜裂 (0)	嚴重龜裂 (85-95)	未龜裂 (5-35)	嚴重剝落 (75-95)	未龜裂 (0-5)
I 型水泥 7.4 加侖， 未加摻料	非常細微 之裂紋 (0)	未龜裂 (0-13)	嚴重龜裂 (10-20)	未龜裂 (0)	嚴重龜裂 (1)	未龜裂 (1)	嚴重龜裂 (5-25)	未龜裂 (2-25)	—	未龜裂 (1-10)	—	—
I 型水泥 8.0 加侖， 未加摻料	些微龜裂 (15-30)	—	嚴重龜裂 (10-25)	未龜裂 (0-3)	嚴重龜裂 (1-5)	未龜裂 (0)	嚴重剝落 (60-75)	未龜裂 (0-10)	嚴重龜裂 (55-70)	—	嚴重剝落 (30-80)	—
II 型水泥 7.4 加侖， 加摻料	非常細微 裂紋 (5-35)	未龜裂 (0)	—	—	—	—	嚴重剝落 (30-90)	未龜裂 (1-10)	—	—	—	—
II 型水泥 8.0 加侖， 加摻料	中度龜裂 (40)	未龜裂 (0-1)	—	未龜裂 (1-4)	—	—	嚴重剝落 (95)	未龜裂 (30-50)	—	—	—	—

說明：1. 龜裂或剝落為對混凝土試體整體外觀結果。

2. 括號內之數據為在試體中抽取四支鋼筋發現其生銹之百分率。

表 3 各種腐蝕因子對腐蝕之影響性[8,9]
Talbe 3 The effect of various corrosion factor. [8,9]

拌合水	腐蝕面積率	水 泥 種 類	腐蝕面積率	保護層厚度	腐蝕面積率
自來水	19%	普通卜特蘭	40%	2 公分	82%
海 水	43%	早強卜特蘭	60%	4 公分	8%
		中庸熱卜特蘭	22%	7 公分	4%
		B型高爐石卜特蘭	3%		

率之影響性如表三所示。水泥種類與保護層厚度影響性較大，尤其是使用 B 型高爐水泥與自來水拌合，保護層厚度為 7 公分情況下之腐蝕量為最少。

b. 混凝土中氯化物含量隨保護層厚度增加而遞減，就使用水泥種類而言，以高爐石水泥中之氯化物含量為最少。

c. 混凝土中，鋼筋之自然電極電位，在各種卜特蘭水泥種類中以 B 型高爐石水泥與高鋁水泥在齡期10年時分別為-470~-520mV及-240~-270mV。而其他則在-710~-850mV，發現使用高爐石水泥具有良好之防蝕效果（圖本五）^(8,9)。

綜合而言，在拌合水、保護層厚度及水泥種

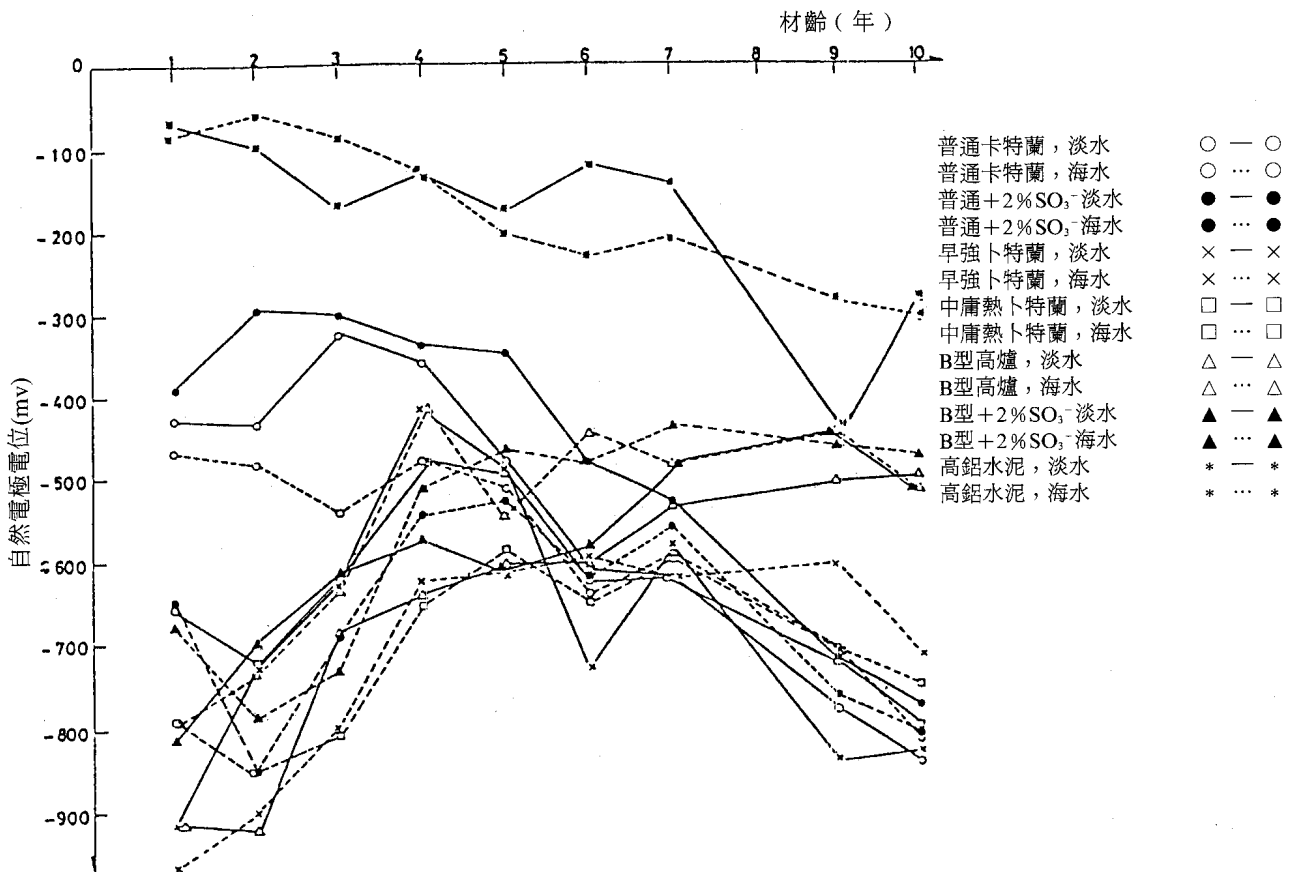


圖 五 各種混凝土試體中鋼筋之自然電極電位之逐年變化特性⁽⁸⁾

Fig.5 The electrochemical corrosion potential of rebar in the various concrete specimens.⁽⁸⁾

類之腐蝕影響因素中，以後者最為顯著。

(五)日曹專精營建公司(Nisso Master Builders Co. Ltd.)

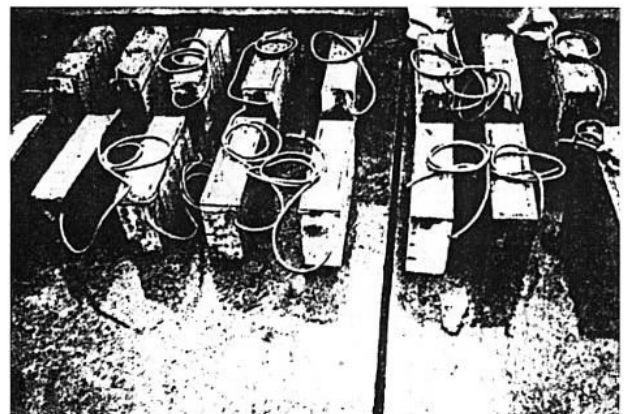
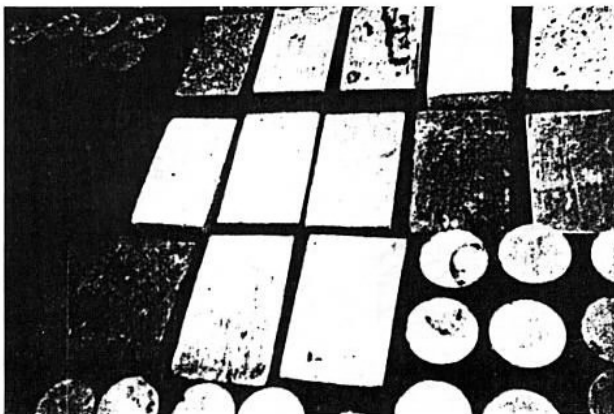
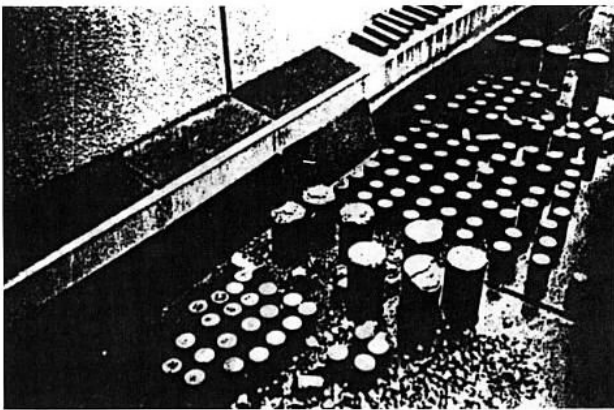
該公司中央研究所設於日本神奈川縣茅ヶ崎市靠近Sagami海灣。在試驗室屋頂上擺放許多鋼筋混凝土試體，測試各種蝕抑制劑抑制鋼筋腐蝕之效果（圖六），將測試20年，定期進行試驗。

(六)日產化學工業株式會社

近年來，在混凝土製作及結構物施工，為確保產品及結構體之使用性能優越，常需添加混凝土摻料(Concrete admixture)，另外為混凝土體

內含鹽量或受海風及海浪侵襲所造成鹽害亦需使用摻料防制。因此日產化工公司發展CANI及SMF在市場上行銷，CANI為一種不含氯化物及鹼類之硝酸鈉(Calcium Nitrite)，其主要功能為可保持鋼筋防銹及使混凝土速凝。有溶液及粉狀兩種形態可依需要作適當使用。SMF為一種高性能之減水劑，主要含磺化三聚氰胺甲醛樹脂(Sulfonated Melamine Formaldehyde Resin)。因為具有如減水性能，早期强度高，少氣泡，較為緩凝，因此製作之混凝土之性能較佳。

混凝土結構物由於受鹽害、碳化、凍傷和鹼性骨材反應，易於加速惡化，當發現惡化時，應儘速補修，使其恢復使用功能。日產化工公司發



圖六 日曹專精營建公司大氣曝露試驗情形

Fig.6 The natural weathering exposure station, Nisso Master Builders Co. Ltd., Japan.

展RF-100，LINI-25及LINI摻料等產品在市面上行銷。

RF-100為碳化惡化之修理材料，係使用無機性高分子矽酸鋰(Lithium Silicate)水溶液。施工之方法稱為REFRETE法，首先灌注RF-100於混凝土中，增強惡化混凝土之表面強度及改進保護材料之黏著性，除外具有使鋼筋周界之混凝土恢復鹼性，因此具有防蝕效果之功能。

同時在曝露之鋼筋周界之混凝土上塗刷RF防銹劑(RF Rust-Proof Paste)及含有腐蝕抑制劑之SBR(Styrene Butadiene Rubber，苯乙烯丁烷橡膠)之高分子水泥(polymer Cement)以利防蝕。然後再使用RF水泥砂漿，SBR基高分子水泥等含有防蝕劑者作為補修剝落混凝土之材料，最後在混凝土表面塗刷RF防銹劑，保護整個混凝土表面受鹽害或碳化之侵襲。

LINI為銷酸鋰(Lithium Nitrite)具有防制混凝土中含氯化物造成鋼筋腐蝕及抑制鹼性體材反應之功能，修理之方法為先剝落之混凝土處及曝露鋼筋塗刷LINI劑或SBR基高分子水泥含大量之硝酸鋰，而損壞之部位用LINI水泥砂漿填補或用LINI-SBR高分子水泥砂漿補修防制再度劣化，然後依劣化結構物劣化情況，有時混凝土表面需再塗刷LINI水泥砂漿為面漆，以確保修理材料能維持長久之功效⁽¹⁰⁾。為了能夠對其產品及補修工法充分的瞭解，應進行曝露試驗及加速試驗，圖七為填加CANI-30與未加防銹劑之試體在親不知進行曝露之情形以及在該公司中央研究所試驗室所進行之混凝土試體塗裝LINI加速試驗之試體情形。

(七)日本建設省建築研究所 (Building Research Institute, Japan)

本研究所之曝露試驗場在其正門之右側，佔地1萬平方公尺，分為建材，建材構件、結構單元及加速條件等四個區域，並有400m²之試驗場

管理大樓概述如下：

1. 建材區(Area for building materials)

- (1)建築材料直接受到風雨及日光作用，評估其耐久性。
- (2)試體大小70×70~150×300mm²，厚度為100mm。
- (3)試體置於鋁製試驗架固定或嵌入，視向陽光之需要而面向南或北，地面成0°(水平)，30°，45°，60°，90°(垂直)。
- (4)材料種類有各種外裝磚造塗裝系統、防蝕塗料系統、塗裝鋼板、住宅修飾材、外裝用金屬板、防水材、油漆塗料、塑膠板及有機屋頂材料等。
- (5)混凝土試體擺放於本區之地面上。

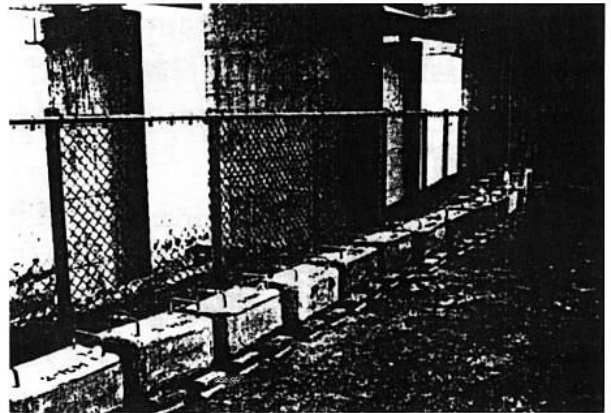
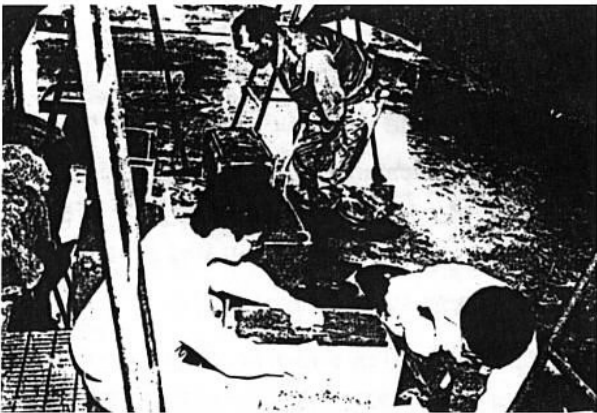
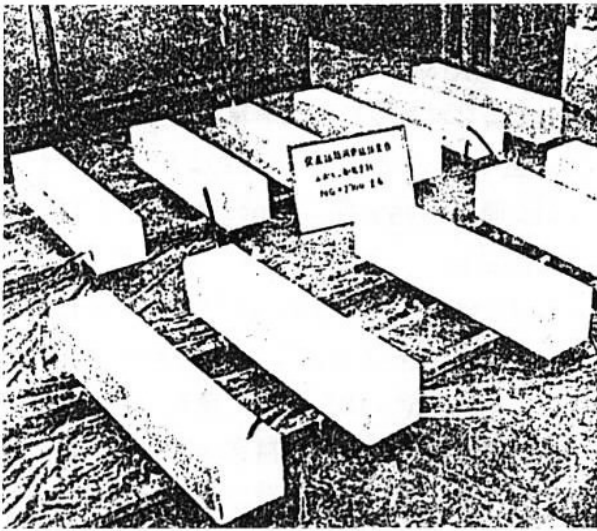
2. 建材及結構構件(Area for building and structural elements)

曝露之試體包括各種日本瓦片、石棉板和金屬板之屋頂，住宅所使用各種材料之外壁與門窗按實際大小安裝在試驗場中。

3. 加速條件區(Area under accelerated condition)

- (1)特別安裝太陽光追蹤器試驗架可隨太陽光之方位和角度而移動。
- (2)人工海水試驗臺為外徑5m，內徑約5m的圓環狀水槽(深為80cm)。水槽中充滿人工海水，其中有各種海洋結構物材料，在流速約5knots情況下，測試全部或部份浸於海水中之性能。
- (3)反覆負荷，施加應力之裝置，利用不同金屬熱脹冷縮的差異性，施力於試片上，可反映氣候溫度之變化。
- (4)控制大氣溫濕度條件，如結露現象為鋼板發生劣化之要因，會發生有機塗料表面惡化和鋼板提早發生腐蝕之現象。

(八)英國能源部及水泥與混凝土學會(Department of Energy, Cement and Concrete Association U.K.)



圖七 日產化工公司所進行之加速與曝露試驗情形

Fig.7 The accelerated and exposure testing, Nissan Chemical Industries, Ltd., Japan.

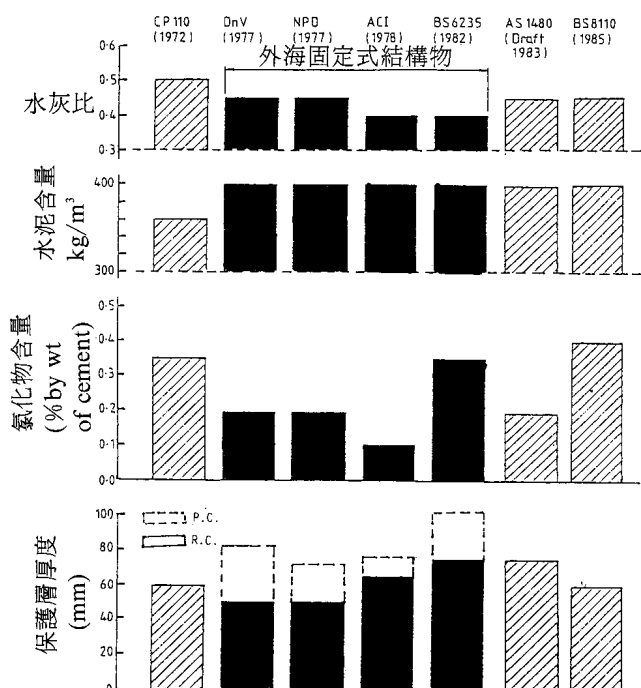
英國能源部與34個工業界單位贊助，於1976年開始執行海中混凝土(Concrete in the Ocean)研究計畫，其目的在解決有關海洋混凝土之石油生產平台，及其他結構物設計施工及長期使用之結構行為上之問題，研究計劃成果現已用於修正海洋混凝土設計與施工規範，本研究計劃曾在英國Portland及Loch Linnhe兩地作混凝土試體之海水中曝露試驗。

試驗結果發現龜裂方向與鋼筋同向，若裂縫寬度小於0.6mm，則腐蝕不嚴重，若與鋼筋排列垂向，則若裂紋寬度大於1mm保護層厚度4公分

亦無顯著之腐蝕現象發生。試驗結果可供修正現行規範，如圖八所示，在英國標準規範中1982年與1985年比較，大氣區之水灰比自原來之0.4更正為0.45，RC保護厚度自7.5公分修正為6公分，而PC之保護層厚度自10公分修正為6公分，而氯化物含量自原限制為水泥重0.35%放寬至水泥重之0.4%，這些都是經過曝露試驗證實之結果才採用的⁽¹¹⁾。

三、曝露試驗之檢討

由於各地曝露條件不同，因此必須要有現場



圖八 各種海洋混凝土結構物設計規範建議值比較⁽¹⁾
Fig.8 Comparison of various design guideline for various marine concrete structures.

實測之資料才能建立可靠之規範數據，在進行曝露試驗應注意之事項，曝露方法以及大氣因子之蒐集方法分別檢討如下：

(一)曝露場設置與曝露試驗應注意事項

(1)曝露試驗固定架

混凝土試體較為粗重，固定架應保持穩定與避免銹蝕。

(2)周圍環境之變化

例如附近樹木太高或地上物之建造等可能會遮避陽光或影響受風力之作用。

(3)儀器維護

儀器設備必須有人手管理，故障時應立即修理以維持正常之運轉與測試。

(4)大氣曝露影響參數

主要影響參數如受飛砂之磨損，海風挾帶之含鹽量，金屬表面之潤濕時間與溫度等。而這些都與距海岸線之遠近，風浪方向與大

表 4 影響塗裝選擇之因素
Fabel 4 The influence factors for selecting coating methods

性質	影響因素說明
1) 保護性	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂, Cl⁻, O₂, SO₂ 等之擴散 • 對酸性之阻抗 • 水汽之滲透性 • 水滲透性 - 吸收性及在壓力下
2) 應用	<ul style="list-style-type: none"> • 對表面處理不良之容忍度 • 對應用時濕氣之容忍度 • 對在養生期間濕氣之容忍度 • 鹼性表面情況下之阻抗 • 易於應用 • 有毒性 • 易燃性
3) 耐久性	<ul style="list-style-type: none"> • 證實可使用於混凝土結構物上 • 在相似之曝露條件下之個案 • 能柔性跨過鈍態裂縫 • 能填封活動性之龜裂 • 在下列條件下： 很強之紫外線 風 / 雨 / 凝結 溫度循環 乾濕循環 凍融 鹽結晶
4) 費用	<ul style="list-style-type: none"> • 特殊應用需求，在使用之塗裝厚度下之相對費用及利益，維護期間易於再塗裝。

小、降雨、濕度與遮避性等因素有關，設置時應詳加考慮。

(5)測試與評估

評估與解釋鋼筋混凝土大氣腐蝕資料包括量測重量損失，腐蝕速率、侵蝕深度與目視外觀等方法將係詳細實測試資料判斷⁽¹⁾。

(6)測試之影響因素必須考慮週密

例如英國Tavwood公司曾試驗200種不同RC防腐蝕塗料之性能測試，考慮之影響因素如表四所示，若無詳實之調查（如Cl⁻或CO₂之擴散），則產品之有效性與其使用價值將受置疑⁽¹⁾。

(7)試驗方法必須可靠

試驗室之加速試驗與現場曝露試驗可以數學模式建立良好相關聯性關係，兩者之惡化形態與範圍必須相似，才可供預報之用。

(8)鋼筋混凝土劣化程度與速率之建立

影響混凝土材料之劣化程度與速率之環境因子如表五所示，而其中最重要者如濕氣、溫度、Cl⁻、CO₂等而造成腐蝕。劣化速率與程度將依曝露環境隨時而異，建立劣化機構可預測有害因子侵入量，在設計與施工時可事先加以考慮。

(二)曝露方法之探討

- (1)按實際大小安裝於曝露試驗場中，試體之形狀大小以及擺放之角度、方向等都應詳細評估後採用。
- (2)加速劣化試驗：例如施加應力或預先龜裂等，可容易了解劣化機理。
- (3)需在現場條件下，混凝土試與養生情況下，量測氯化物侵入之特性以證實在使用期間

內，是否充分保護。

- (4)評估在不同天候條件下，不同材質及構件之劣化速率。

(三)大氣因子蒐集方法檢討

觀測劣化因子氣溫、濕度、降雨量、風、日照時間、日射量、SO₂、O₃、照射角度、試體溫度及結露時間等資料輸入於資料處理系統使之定量化，可供評估建物耐久性與氣候因子之關聯性及其所佔之比重（圖九）。天候與環境對混凝土結構物耐久性之影響性必須徹底地檢討，因此蒐集之資料必須包括日、月、年等之平均、最高、最低值，以供研判其關聯性。

四、結論與建議

1. 腐蝕作用之機理與環境，溫濕度相關，台灣地處亞熱帶，四面環海，氣候潮濕，鋼筋混凝土結構物容易發生腐蝕，加上台灣地窄人稠，未來對空間之需求勢必朝海域空間發展。因此對鋼筋銹蝕導致混凝土結構之破壞及混凝土材料在海域下之行爲等之充分瞭解必須建立曝露試驗場從長期試驗才能解決耐久性問題。
2. 曝露試驗與加速試驗兩者均為提供新產品的可靠度及結構材料性能評估的有力證據。
3. 對於曝露試驗場設置以及試驗應注意事項和曝露方法，大氣環境因子之蒐集及建立環境因子與劣化現象之相關性應加以詳細檢討。
4. 曝露試驗為制定國家材料的設計與施工規範之必要工作，必須產、官、學三方面之專家學者共同配合投入研究。

表 5 材料及構件惡化之影響因素

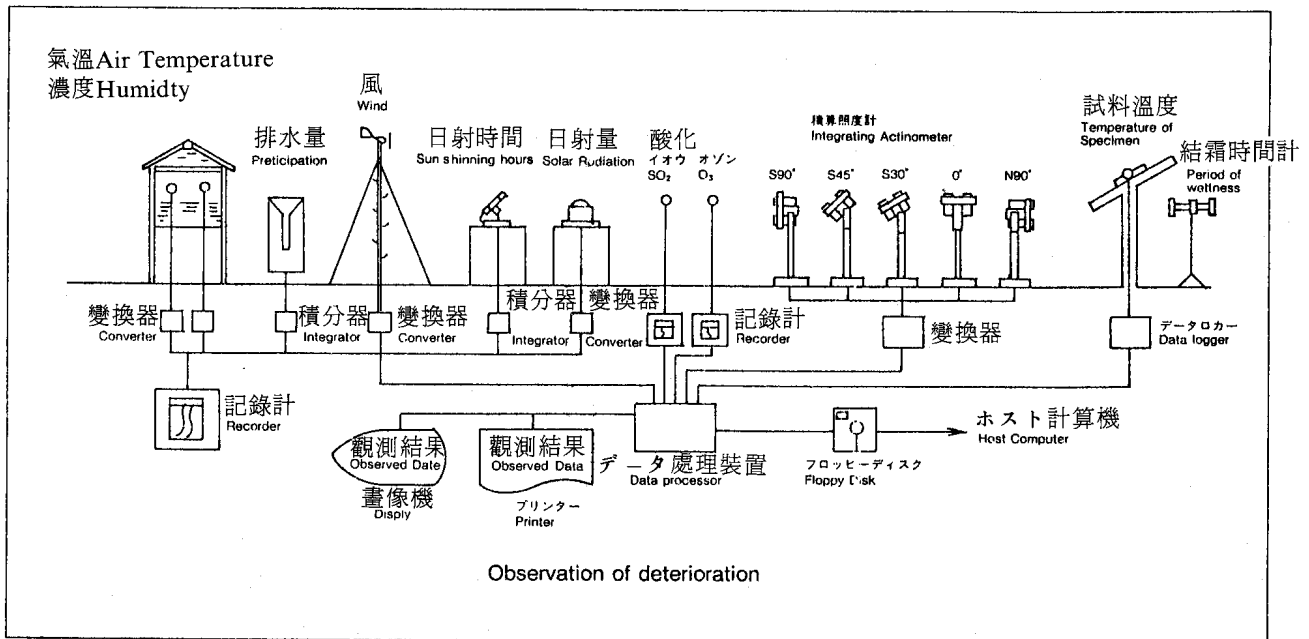
Table 5 The influence factors for the determination of materials and structural members.

因素類別	影 響 因 素 說 明
1) 風化性	<ul style="list-style-type: none"> • 輻射：太陽、核能、溫泉。 • 溫度：上升、下降、循環。 • 水：冰雪、雨、凝結、駐水、相對濕度。 • 正常空氣含量：O₂、臭氧、CO₂。 • 空氣污染：氮及硫磺之氧化氣體、煙、鹽、酸和鹼等溶解於水中，如砂、灰塵、垃圾等微粒狀物。 • 凍融
2) 生物污著性	<ul style="list-style-type: none"> • 微生物 • 黴菌 • 細菌
3) 應力因素	<ul style="list-style-type: none"> • 週期性、及支撐應力 • 隨機性應力：雨、雹、雪等物理作用。風之物理作用。風雨等合成作用。沈陷或車輛超載等因素之作用。
4) 物理上或化學上不相容	<ul style="list-style-type: none"> • 不同金屬之偶合 • 不同塗料或材料之接合
5) 使用性	<ul style="list-style-type: none"> • 系統之設計。 • 安裝及維修程序。 • 正常磨耗和破裂。 • 使用者濫用。

參考文獻

1. 林維明“海洋混凝土結構物耐久性之檢討”海洋混凝土工程研討會資彙刊，港變技術研究所刊第38號，民國76年10月，pp.1/51~1/56。
2. 陳振川“由崔特島曝露場談混凝土材料之長期現地耐久實驗”結構工程第3卷4期，民國77年10月，pp.107~112。

混凝土材料大氣曝露試驗



圖九 日本建築研究所在大氣曝露試驗場設置之氣象因子測試系統

Fig.9 The weather factor monitoring system, Building Research Institute, Japan.

3. Mehta P. K. "Durability of Concrete in Marine Environment-A Review" in Performance of Concrete in Marine Environment edited by Malhotra V. M., American Concrete Institute. ACI SP-65. 1980. pp.1~20.
4. U.S. Army Corp. of Engineering "Natural Weathering. Exposure Station. Treat Island" Structural Laboratory. Waterways Experiment Station. U.S.A.. Aug 1988.
5. 林維明 " 混凝土耐化學性作用之檢討 (下)" 結構工程第四卷2期, 民國78年6月, pp.93-114。
6. Malhotra V.M. et al.:Current Status of CANMET Studies on the Durability of Concrete Containing Supplementary Cementing Materials in Marine Environment American Concrete Institute. SP-109. pp. 31-72. 1988.
7. Baker E.A. et al.. "Marine Corrosion Behavior of

- Bare and Metallic Coated Steel Reinforcing Rods in Concrete"ASTM, SP-629, 1982, pp.30-50.
8. 大即信明 " ユンクリートの劣化に關する最近の研究 " 日本運輸省港灣技術研究所講演集, Dec, 1987, pp.155-212。
9. 林維明 " 港灣結構物之鹽害現象與對策(-)" 結構工程第五卷4期, 民國79年12月, pp.97-115頁。
10. Nakajima. H. and Hori, T. "Prevention of Salt Damage by Corrosion Inhibitors"proc. of seminar on the Corrosion preventive Technique of R.C. Structures". Taichung. Taiwan. R.O.C. Oct. 3-4. 1989, pp.279-299.
11. 林維明 " 海洋混凝土結構物防蝕規範及使用壽命預測之檢討 " 海洋混凝土工程研討會資料彙刊, 港灣技術研究所專刊第38號, 民國76年10月, 第10/1-10/46。