

# 國立臺灣科技大學

National Taiwan University of Science and Technology



## 專題製作



高氯離子建築(海砂屋)腐蝕鋼筋之力學性質

專 題 生：劉澄洲

指導教授：歐昱辰博士

中華民國 102 年 3 月 8 日

## 摘要

本研究的目的是在於研究現地高氯離子建築(俗稱海砂屋)腐蝕鋼筋之力學行為，以供工程師進行海砂屋結構承载力分析使用；並探討實驗室加速腐蝕鋼筋與現地海砂屋腐蝕鋼筋力學性質之差異，以瞭解實驗室加速腐蝕方法能否真實模擬海砂屋腐蝕狀況。本研究現地腐蝕鋼筋採集自新北市三芝海灣新城高氯離子鋼筋混凝土建築。實驗室加速腐蝕鋼筋試驗採通電腐蝕，藉由電化學原理來快速達成鋼筋腐蝕。腐蝕鋼筋取得後，再利用萬能試驗機進行鋼筋的拉力試驗，求取腐蝕鋼筋之力學性質折減係數，實驗結果提供真實腐蝕鋼筋降伏應力、應變硬化應力與應變、極限應力、極限應變與彈性模數折減係數公式，可為工程師模擬腐蝕鋼筋混凝土建築結構行為使用。實驗結果亦顯示現地腐蝕鋼筋與實驗室加腐蝕鋼筋有相似之降伏強度、應變硬化應力、極限應力與彈性模數的折減係數。惟就極限應變而言，實驗室加速腐蝕鋼筋之折減係數遠大於現地腐蝕鋼筋，此因實驗室加速腐蝕鋼筋有較嚴重的孔蝕，造成相同腐蝕量下較顯著的極限應變折減，此發現顯示實驗室加速腐蝕試驗可得較保守的腐蝕鋼筋力學性質，意即實驗室加速腐蝕試驗可安全地用於模擬真實結構腐蝕行為。本研究為台灣第一次對海砂屋腐蝕鋼筋進行力學試驗，獲得全國首筆海砂屋腐蝕鋼筋力學資料，奠定海砂屋結構分析之重要基礎。



參賽學生與新北市三芝海砂屋



海砂屋切取之腐蝕鋼筋

## 一、研究背景

高氯離子混凝土建築，俗稱海砂屋，海砂屋的出現，是因為過去有不肖建商，使用未適當處理之海砂來製作混凝土，導致房屋興建完成之後，數年內出現鋼筋嚴重鏽蝕，混凝土塊大面積剝落的情形，影響居民之作息，剝落之混凝土亦可能使居民受到傷害，影響房屋之服務性。鋼筋腐蝕亦危害房屋之結構安全，使在遭遇到地震時，發生倒塌的危險性增加。若依據中國國家標準 CNS 3090 A2042 預拌混凝土及 CNS 13465 新拌混凝土水溶性氯離子含量試驗法規定檢測氯離子含量，經檢驗後所得之水溶性氯離子含量如超過 0.3 kg/以上，該建築物即屬高氯離子鋼筋混凝土建築物。

鋼筋腐蝕會造成體積膨脹，破壞彼此間的握裹，導致保護層混凝土突出或剝落，腐蝕也造成鋼筋斷面積減少，並可能在局部地區產生孔蝕，降低構材承载力與韌性。然而，目前工程界在進行鋼筋混凝土建築結構承载力或耐震能力評估時，皆未適當的將鋼筋腐蝕對構材承载力或耐震行為的影響納入評估。其主要原因為工程界欠缺模擬腐蝕鋼筋混凝土構件之方法，其中一重要關鍵為腐蝕鋼筋力學行為之模擬。又目前學術界常用電化學加速腐蝕鋼筋之方法，模擬現地海砂屋腐蝕之鋼筋，但目前仍不清楚加速試驗所得之腐蝕鋼筋與真實腐蝕鋼筋力學行為之差異，此為電化學加速腐蝕試驗研究常受質疑之處

## 二、研究目的

- 1.研究現地真實腐蝕鋼筋之力學性質
- 2.瞭解實驗室加速腐蝕鋼筋與現地真實腐蝕鋼筋力學性質之差異

## 三、研究方法

### (一)現地踏勘

現地踏勘主要分為兩棟高氯離子建築的建物，一棟是位在新北市三芝，另一棟則是位在台中市梧棲，這兩棟建築皆採集混凝土塊進行氯離子含量檢測，另外新北市三芝的海砂屋亦採集腐蝕鋼筋回實驗室做鋼筋拉力試驗，採集鋼筋需準備砂輪機、發電機、梯子、鐵鎚、破碎機等重型機具，台中梧棲因為距離甚遠，因此不進行鋼筋之採集。

### 1.新北市三芝海灣新城

主要的現地踏勘於位在新北市三芝一代-海灣新城(如圖一(a))，此棟建築為

民國六十六年完工的大規模集合住宅，目視可見此建築有嚴重、大面積鋼筋腐蝕現象，具有海砂屋典型特徵。鋼筋腐蝕造成體積膨脹，破壞與混凝土間的握裹，導致保護層混凝土突出或剝落，腐蝕也造成鋼筋斷面積減少，並在局部地區產生孔蝕，降低構材承載力與韌性。此建築經過三十多年氯離子的侵蝕，腐蝕鋼筋已嚴重至造成整片樓版崩落(如圖一(b))，結構體多處有混凝土表面突出或脫落之現象(如圖一(c))，此集合住宅多數單元已無人居住，但少數仍有居民，安全堪慮。圖一(d)為參賽學生與現地建築的合照。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖一、現地海砂屋：(a)外觀照；(b)樓版崩落；(c)保護層突出、脫落；(d)學生與建築合照

這次的踏勘主要位置有一樓內梁、一樓外柱、一樓外牆、二樓內梁、二樓外梁、以及三樓內柱，因為此棟建築為海砂屋，所以結構體內的鋼筋皆已腐蝕且造成大量的裂縫產生，有些甚至造成保護層的剝落，所以在取樣的位置中若保護層已剝落的結構體，我們直接以砂輪機切斷鋼筋及採集些許的混凝土塊，並標示記

錄主筋與箍筋的位置；若保護層未剝落，則先量測因鋼筋腐蝕所造成的各裂縫寬度大小，再使用破碎機敲除保護層，然後量測此結構的主筋間距、箍筋間距、主筋保護層厚度及箍筋保護層厚度，最後再切斷鋼筋與混凝土塊的採集。在切鋼筋時要注意的是若鋼筋是縱向的，為了安全起見必須先切鋼筋下面，然後在切上面。此結構體雖然已嚴重腐蝕，但其結構體在某些部份還是存在著承載此結構的力量，故在切除鋼筋時要考慮到力量重分配的情形，若在過程中發現其餘鋼筋有產生變形時，由其是柱，則須立即停止，否則會造成結構體的崩落。

## 2. 台中梧棲臨港路海砂屋

此棟海砂屋位在台中市梧棲區臨港路三段 664 巷(如圖二)，約民國七十年代建造，此棟建築與三芝海砂屋皆位於海邊，因此除受混凝土中海砂之氯離子侵蝕外，亦遭受海風所夾帶的氯離子侵蝕，使鋼筋更易腐蝕，不過此棟海砂屋鋼筋腐蝕的程度比三芝海砂屋稍輕微，三芝海砂屋的樓版已大量崩落，此棟建築至少樓版都還在，但是大部分的樓版下部保護層皆已剝落，而且與樓版相連接的梁、柱，其保護層幾乎也剝落了，致使大量鋼筋裸露在外。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖二、現地海砂屋-台中梧棲

## (二)現地氯離子含量與腐蝕現況

本研究所使用之氯離子量測儀為 Metorhm 公司所生產的 905 Titrande 電位差自動滴定儀，利用滴定過程中電位之改變，繪出滴定反應圖，自動找出滴定終點，並計算出溶液之濃度，並依據 AASHTO T260-97 量測水溶性自由氯離子濃度之含量，**下錯誤! 找不到參照來源。**為三芝海灣新城氯離子檢測出來的數據值。我們在現地量測六個位置，在一樓外柱其氯離子含量為  $0.9 \text{ kg/m}^3$ ，所相對應到的腐蝕鋼筋重量損失百分比約為 8%，其鋼筋號數為主筋 5 號箍筋 3 號；在一樓外牆其氯離子含量為  $15.9 \text{ kg/m}^3$ ，所相對應到的腐蝕鋼筋重量損失百分比約為 38.4%、其鋼筋號數為主筋 4 號箍筋 3 號；在一樓內梁其氯離子含量約為  $5.5 \text{ kg/m}^3$ ，所相對應到的腐蝕鋼筋重量損失百分比為 37%，其鋼筋號數為主筋 6 號箍筋 3 號，保護層厚度為 35mm，主筋間距為 12cm、箍筋間距為 32cm；在二樓外梁其氯離子含量約為  $4.8 \text{ kg/m}^3$ ，所相對應到的腐蝕鋼筋重量損失百分比為 38.5%，其鋼筋號數為主筋 5 號箍筋 3 號，保護層厚度為 45mm，主筋間距為 7cm、箍筋間距為 31cm，最大裂縫寬度為 27cm；在二樓內梁其氯離子含量約為  $6.6 \text{ kg/m}^3$ ，所相對應到的腐蝕鋼筋重量損失百分比約為 28.7%，其鋼筋號數為主筋 5 號箍筋 3 號，保護層厚度為 35mm，主筋間距為 6cm、箍筋間距為 39cm，最大裂縫寬度為 6cm；在三樓外柱其氯離子含量約為  $11.6 \text{ kg/m}^3$ ；在三樓內柱其氯離子含量約為  $3.2 \text{ kg/m}^3$ ，所相對應到的腐蝕鋼筋重量損失百分比主筋約為 35.8%、箍筋約為 16.6%，其鋼筋號數為主筋 5 號箍筋 3 號，保護層厚度為 35mm，主筋間距為 10cm、箍筋間距為 27cm，最大裂縫寬度為 3.5cm。台中梧棲之海砂屋氯離子含量約為  $3.9 \text{ kg/m}^3$ 。

表 1、三芝現地氯離子含量與相對應的鋼筋腐蝕量

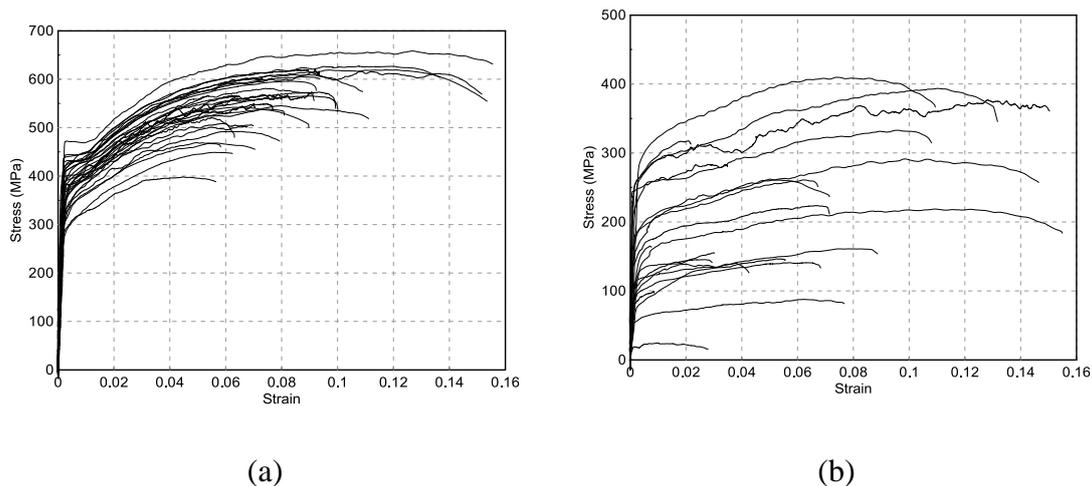
位置	氯離子含量( $\text{kg/m}^2$ )	腐蝕鋼筋重量損失(%)	保護層厚度(mm)	主筋/箍筋號數	最大裂縫寬度(mm)	主筋與箍筋間距(cm)
一樓外柱	0.9	主:8	-	#5/#3	-	-
一樓外牆	15.9	主:38.4	-	#4/#3	-	-
一樓內梁	5.5	主:37	35	#6/#3	-	主:12/箍:31
二樓外梁	4.8	主:38.5	45	#5/#3	27	主:7/箍:31
二樓內梁	6.6	主:28.7	35	#5/#3	6	主:6/箍:29
三樓外柱	11.6	-	-	-	-	-
三樓內柱	3.2	主:35.8 箍:16.6	35	#5/#3	3.5	主:10/箍:27

本研究初步建立目視與鋼筋腐蝕量之資料庫，未來目標為發展目視粗估測鋼筋腐蝕量之方法。又依據民國 87 年 6 月 25 日修訂公佈之 CNS 3090 A2042(預拌混凝土)第 19 節(新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量規定)表 10 規定「鋼筋混凝土須小於  $0.3 \text{ kg/m}^3$  (依水溶法)」。然而本研究測出最低氯離子含量為  $0.903 \text{ kg/m}^3$ ，在此含量下使用 35 年後，鋼筋腐蝕重量損失達約為 8%(腐蝕鋼筋重量損失百分比= $(\text{腐蝕後鋼筋重量}/\text{原始鋼筋標稱重量})\times 100\%$ )，導致保護層嚴重剝落，鋼筋裸露在外。未來將研究建立腐蝕量與裂縫寬度、箍筋及主筋間距、保護層厚度之關係。

### (三)腐蝕鋼筋力學性質

由於腐蝕之不均勻，造成腐蝕鋼筋之整體應力應變曲線不同於原始鋼筋應力應變曲線。本研究透過鋼筋拉力試驗，求取鋼筋腐蝕量與鋼筋應力應變曲線參數之關係，以供腐蝕結構分析所用。所使用的儀器為 100 頓萬能試驗機，在進行試驗同時，透過 NDI 紅外線光學位移量測系統來追蹤鋼筋的長度變化量。

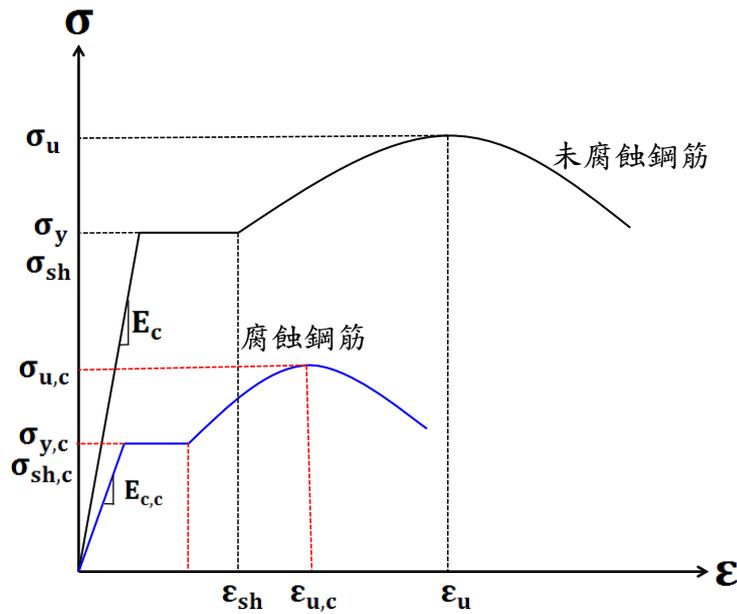
從實驗室所得到的數據值為外力與位移，我把外力去除鋼筋的標稱面積進而得到該鋼筋的應力值，然後把得到的位移與初始位移相減，在去除以初始位移進而得到應變值，以應力為縱軸應變為橫軸作圖，得到現地鋼筋與實驗室加速腐蝕之應力應變曲線圖(如下圖三所示)，從下圖三的應力應變曲線圖觀察得知，實驗室加速腐蝕鋼筋之應力應變曲線有較明顯的降伏平台。



圖三、應力應變曲線(a)實驗室加速腐蝕；(b)現地海砂屋腐蝕

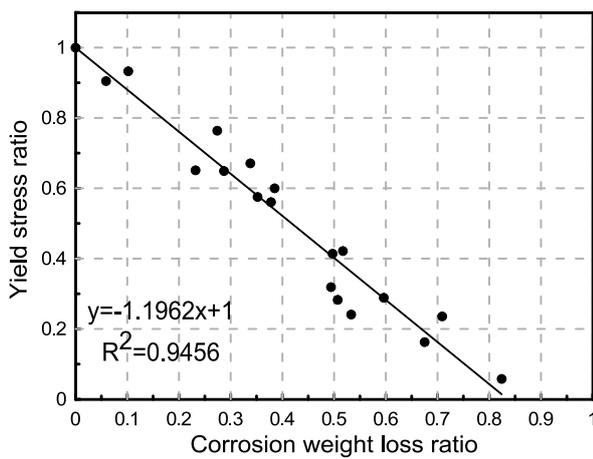
得到圖三的結果後，我們模擬未腐蝕鋼筋與腐蝕後鋼筋之應力應變曲線模型(如錯誤! 找不到參照來源。所示)，接著建構我們所需要的參數，這些參數有降

伏應力比(Yield stress ratio,  $\sigma_y$ )、初始應變硬化應力比(Strain-hardening stress ratio,  $\sigma_{sh}$ )、初始應變硬化應變比(Strain-hardening strain ratio,  $\varepsilon_{sh}$ )、極限應力比(Ultimate stress ratio,  $\sigma_u$ )、極限應變比(Ultimate strain ratio,  $\varepsilon_u$ )以及彈性模數比(Elastic modulus ratio,  $E_c$ )，然而這些參數皆是與未腐蝕鋼筋所得到的力學性質做比值，再以參數比為縱軸，腐蝕鋼筋重量損失百分比做橫軸，得到現地腐蝕鋼筋各個參數圖(如圖五)與實驗室加速腐蝕鋼筋各個參數圖(如圖六)。

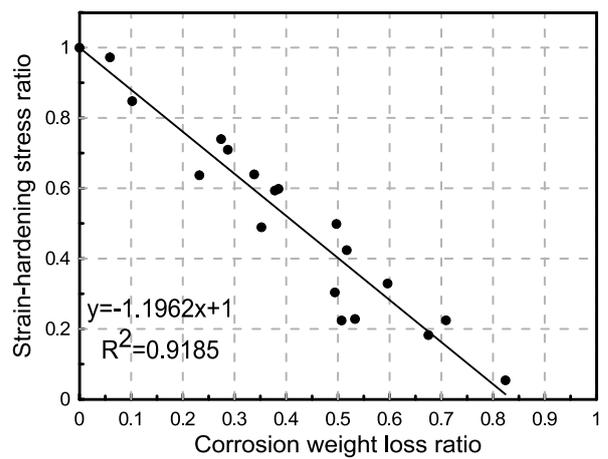


圖四、應力應變曲線模型

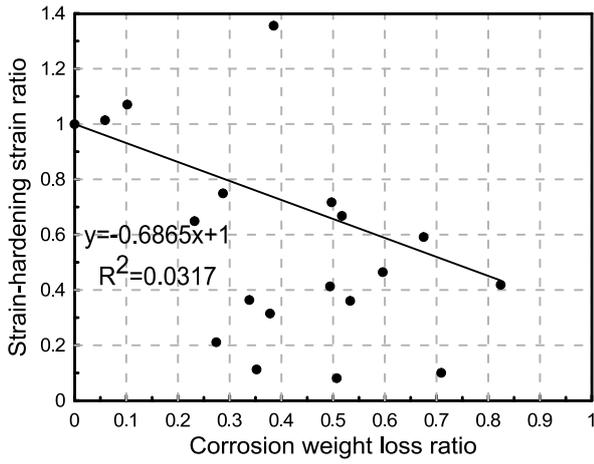
1. 現地腐蝕鋼筋



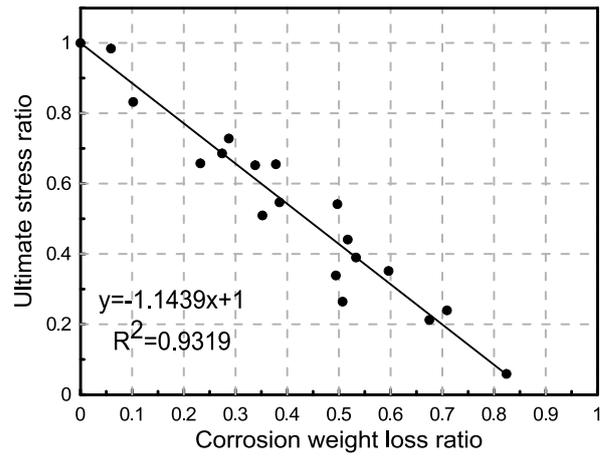
(a)



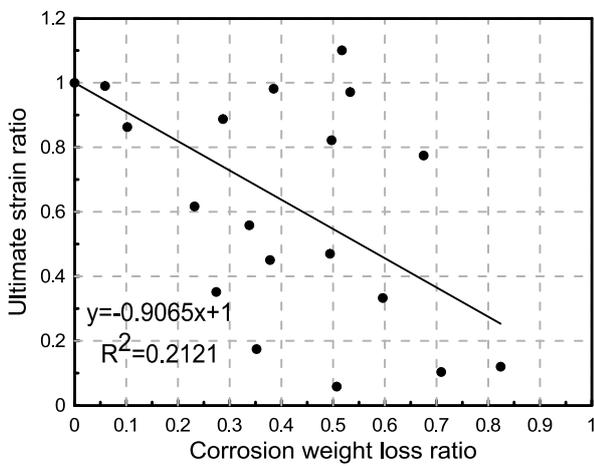
(b)



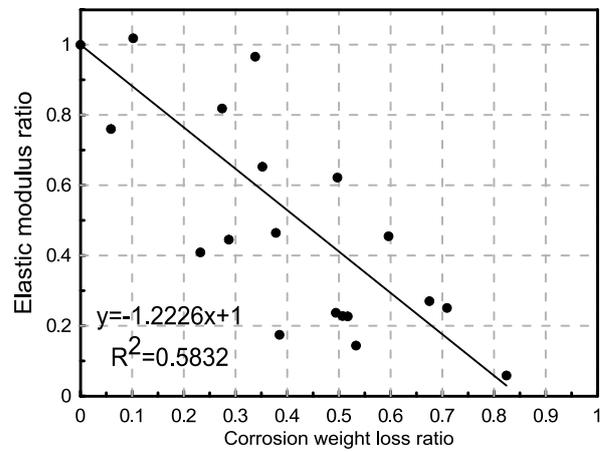
(c)



(d)



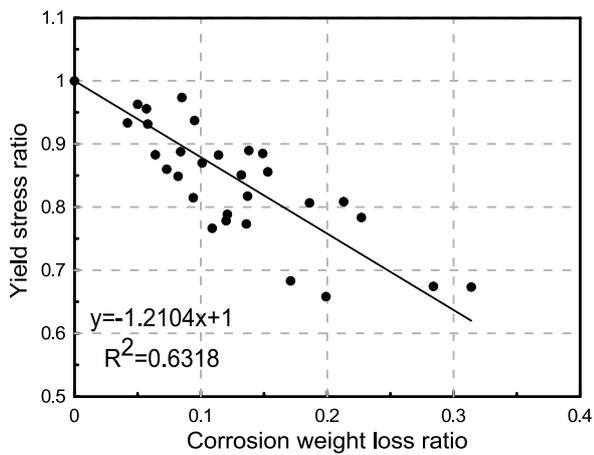
(e)



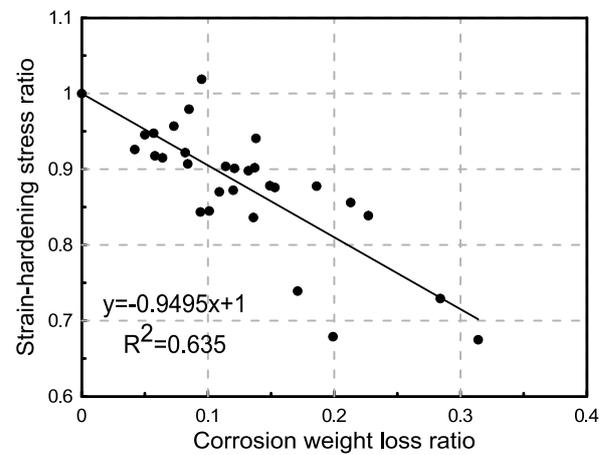
(f)

圖五、現地腐蝕各力學性質與腐蝕量之關係：(a)降伏應力；(b)應變硬化應力；  
(c)應變硬化應變；(d)極限應力；(e)極限應變；(f)彈性係數

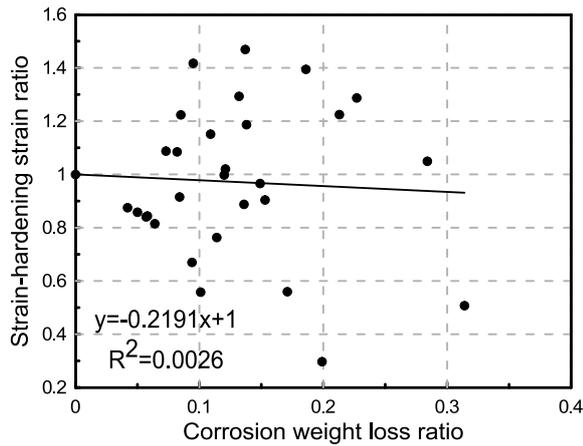
## 2. 實驗室加速腐蝕



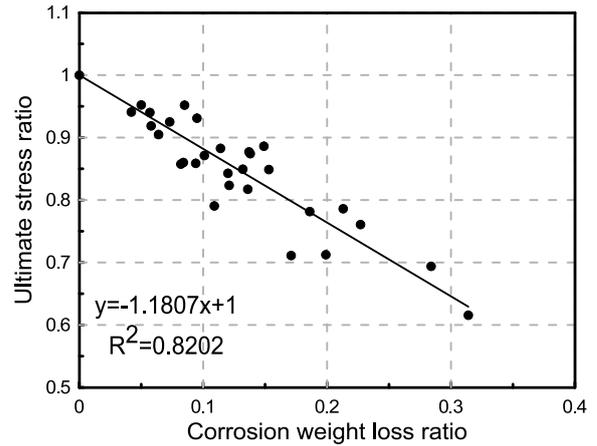
(a)



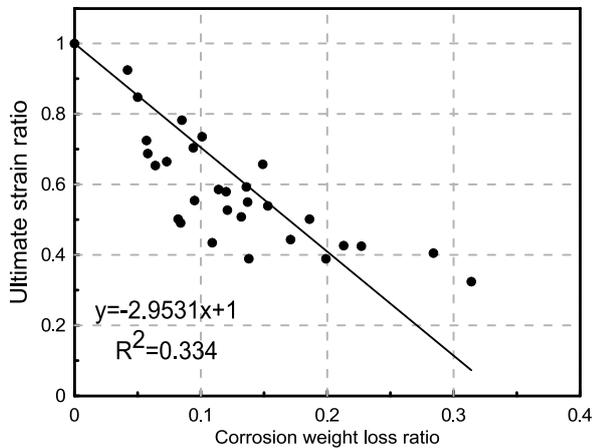
(b)



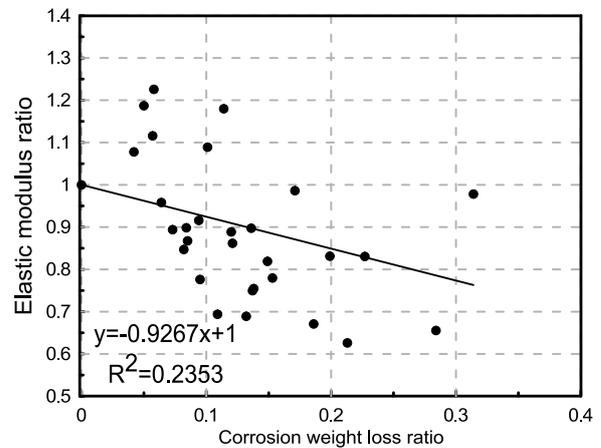
(c)



(d)



(e)



(f)

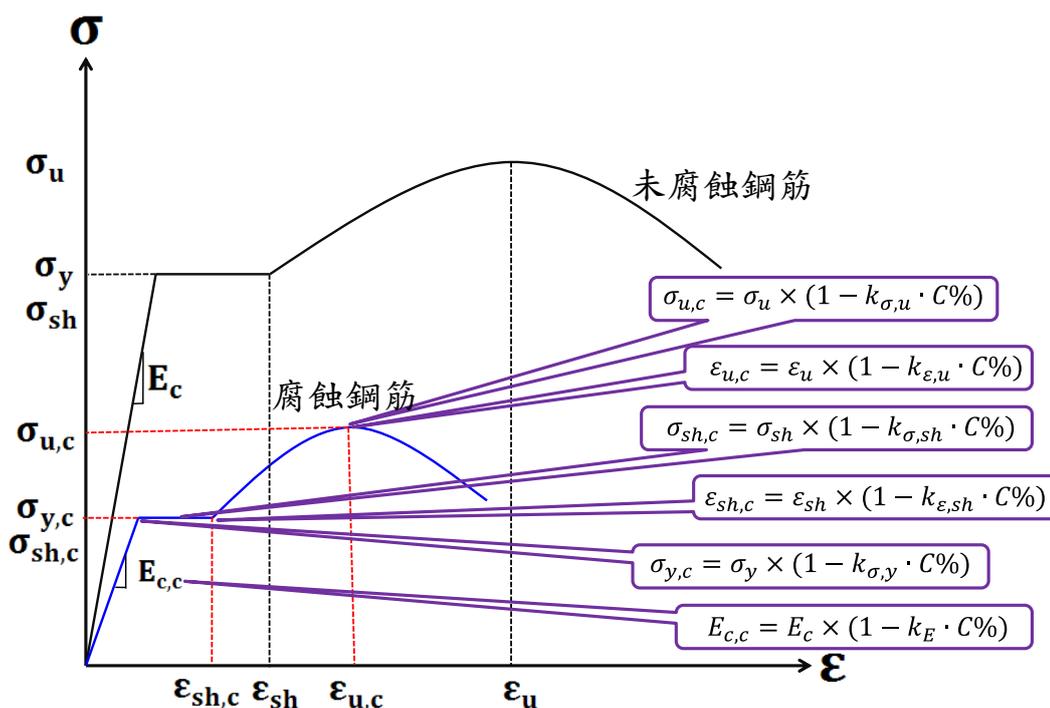
圖六、加速腐蝕各力學性質與腐蝕量之關係：(a)降伏應力；(b)應變硬化應力；  
(c)應變硬化應變；(d)極限應力；(e)極限應變；(f)彈性係數

#### (四)力學行為比對

現地鋼筋拉力實驗所得鋼筋力學行為參數(如表 2)，可提供工程師現地腐蝕鋼筋力學性質之折減係數，以供工程師進行海砂屋結構承载力或耐震行為分析使用。表 2 亦顯示實驗室加速腐蝕鋼筋之力學性質資料，把兩筆資料做比對，我們發現在相同的腐蝕量下，兩種鋼筋有相似的勁度(彈性模數)與強度(降伏應力)，但實驗室加速腐蝕鋼筋有顯著較低的變形能力(極限應變)，此為孔蝕所造成的影響，在實驗室加速腐蝕鋼筋有較嚴重的孔蝕，這也就造成了加速腐蝕的鋼筋有較低的變形能力，相對的現地鋼筋腐蝕較均勻。這代表著實驗室加速腐蝕鋼筋會得到較保守之結果。我們利用表 2 之 k 值折減係數，並配合圖七的公式得到腐蝕後鋼筋之力學性質(應力應變曲線)。

表 2、各力學性質之 k 值折減係數比較

	降伏應力 $k_y$	應變應 化應力 $k_{\sigma,sh}$	應變應 化應變 $k_{\epsilon,sh}$	極限應力 $k_{\sigma,u}$	極限應變 $k_{\epsilon,u}$	彈性模數 $k_E$
現地	1.19	1.19	0.68	1.14	0.90	1.22
實驗室	1.21	0.94	0.21	1.18	2.95	0.92



圖七、腐蝕鋼筋之力學性質

#### 四、結論

本研究為台灣第一次對海砂屋腐蝕鋼筋進行力學試驗，獲得全國首筆海砂屋腐蝕鋼筋力學資料，奠定海砂屋結構分析之重要基礎。本研究提供海砂屋真實腐蝕鋼筋之力學行為，包括腐蝕鋼筋的降伏應力、應變硬化應力與應變、極限應力、極限應變與彈性模數的折減係數公式，工程師只需知道鋼筋之腐蝕程度（重量損失率），套用前述之折減係數公式，即可建構腐蝕鋼筋之應力應變曲線，以供模擬海砂屋承载力或耐震行為使用。真實腐蝕鋼筋力學行為與實驗室加速腐蝕鋼筋力學行為比較顯示，兩者有相似之降伏強度、應變硬化應力、極限應力與彈性模數的折減係數。惟就極限應變而言，現地真實腐蝕鋼筋之折減係數遠小於實驗室加速腐蝕鋼筋，代表相同腐蝕量下，現地真實腐蝕鋼筋之極限應變大於加速腐蝕鋼筋。此因實驗室加速腐蝕鋼筋有較嚴重的孔蝕，造成鋼筋的韌性較快速下降，此發現顯示實驗室加速腐蝕試驗可得較保守的腐蝕鋼筋力學性質，意即實驗室加

速腐蝕試驗可安全地用於模擬真實結構腐蝕行為。

## 五、致謝

本研究由衷感謝三芝海灣新城之居民提供本研究許多的協助，包括研究場地的提供，以及對於本研究採集鋼筋與混凝土所產生的噪音等不便之包容。本研究承蒙行政院國家科學委員會專題研究案 100-2628-E-011-019-MY3 提供研究經費，特此致謝。

## 六、參考文獻

1. 卓奕杉，2012 年，「RC 梁鋼筋腐蝕之剪力行為評估與縱向鋼筋腐蝕之耐震行為」，營建工程系，國立台灣科技大學，碩士論文
2. Yokota and Shimomura, Nov. 2006, Report of research project on structural performance of deteriorated concrete structures by JSCE-331. International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures, Nagaoka, Japan,
3. Kato, E.; Iwanami, M.; Yokota, H.; and Moriwake, A., "Variation of Chloride-Induced Deterioration in Existing RC Decks," *Proc. Of the Japan Concrete Institute*, V. 28, 2006, pp. 911-916. (in Japanese)
4. Kashiwabara, S.; Tanimura, Y.; Izuminami, R.; and Kimura, M., "A Study on Evaluation Method of the Tensile Yield Strength of Corroded Reinforcing Bar Cut Out from Structure," *Proc. Of the 55th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, V. 357, 2000, pp. 716-717. (in Japanese)
5. Li, H.S.; Tomosawa, F.; and Noguchi, T., "Effect of Corrosion on Degradation of Mechanical Performance of Reinforcing Bar," *Proc. Of the Japan Concrete Institute*, V. 17, 1995, pp. 877-882. (in Japanese)
6. Li, H.S.; Tomosawa, F.; Noguchi, T.; and Kage, T., "Finite Element Analysis of Reinforcement Concrete Beam Damaged by Rebar Corrosion," *Proc. of the Japan Concrete Institute*, V. 19, 1997, pp. 1147-1152. (in Japanese)
7. Iwanami, M.; Yokota, H.; Okuyama, K. and Toni, K., "Mechanical Behavior of RC Columns Damaged by Alkali-Silica Reaction and Proposal of Strengthening Method," *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, V. 704, No. 55, 2002, pp. 129-142. (in Japanese)
8. Yamakawa, T.; Iraha, S.; Tamaki, Y.; and Ohta, T., "An Experimental Study on Aseismic Behavior of R/C Columns Subjected to Electro-Chemical Corrosion Damage," *Proc. Of the Japan Concrete Institute*, V. 16, pp. 805-810. (in Japanese)
9. Shinzato, H.; Yamakawa, T.; Morishita, Y.; and Tamayose, Y., "An Experimental Study on Seismic Performance of RC Columns Damaged by Exposure Test," *Proc. Of the Japan Concrete Institute*, V. 25, 2003, pp. 259-264. (in Japanese)
10. Nakahodo, H.; Yamakawa, T.; and Yamada, Y., "Experimental and Analytical Investigation of RC Columns Damaged in Exposure Field," *Proc. Of the Japan Concrete Institute*, V. 26, 2004, pp. 1657-1662. (in Japanese)
11. Uematsu, S.; Yamakawa, Nakahodo, H.; and Yamada, Y., "Cyclic Loading Test of RC Columns Damaged Due to Exposure at the Coast in Okinawa," *Proc. of the Japan Concrete Institute*, V. 27, 2005, pp. 1483-1488. (in Japanese)