

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(二)
(鄉土)教材獎

052416

船體結構外板腐蝕監控

學校名稱： 國立東港高級海事水產職業學校

作者：	指導老師：
職三 林泰亦	蕭守進
職三 顏悠安	
職三 周敬祐	

關鍵詞： 腐蝕曲線、鋅板、經驗公式

摘要

本研究探討船體結構外板在海洋環境中的腐蝕行為，並建立預測模型以提升防護與維護效率。由於船舶長期處於高鹽分、高濕度環境，結構易受腐蝕，影響安全與成本。研究採用不同厚度鋅板實驗，結合經驗公式預測腐蝕，並與實測數據比對。結果顯示模型在初期具高準確性，隨時間誤差增大，推測與環境因子如氣溫、鹽度、pH值等變化有關。厚鋅板（5mm、6mm）具良好耐蝕性，適用長期防護，薄鋅板（1mm、2mm）僅適合短期應用。此模型有助於材料壽命評估與優化結構設計，提升船舶安全與經濟效益。

壹、前言

隨著船舶長期航行於鹽分濃度高、腐蝕性強的海洋環境中，鋼質船體極易因腐蝕而導致結構強度衰退。鋅板作為陽極犧牲材料，能有效延緩鋼板腐蝕，已廣泛應用於船體防護。但現行鋅板使用規範多以經驗為主，缺乏明確依據與動態監測資料，導致鋅板厚度選擇不當或更換不及時，影響船體安全與維修成本。因此，本研究擬延續先前腐蝕實測成果，深入探討不同厚度鋅板之腐蝕行為，並結合數據分析與預測技術，建立鋅板壽命與鋼板保護效益之動態評估機制，以供船舶維護決策之依據。

貳、研究設備與器材

為探討鐵板與各種厚度鋅板所構成試片在屏東沿海漁港海水環境中浸泡後之腐蝕情形，並準確量測其剩餘厚度，實驗採用以下主要設備與測量工具(如圖2.1所示)：

（一）分厘卡尺

為獲得高準確度厚度數據，採用高精度分厘卡尺量測試片厚度變化。透過定期測量，可掌握腐蝕程度，並作為建立腐蝕曲線與後續分析的重要依據，提升整體實驗數據品質。

(二) 測厚儀

針對難以直接量測或需高精度測量的部位，採用超音波測厚儀進行非破壞量測。將探頭接觸乾淨試片表面，每面各量測三次取平均，即可獲得較準確的現有厚度數據資料。

(三) 數據記錄儀及分析軟體

測量過程中搭配數據記錄儀，自動記錄海水環境變因（如水溫、酸鹼值、鹽度等），並利用分析軟體處理數據，協助研究人員進行腐蝕趨勢判讀與經驗公式之建立。

(四) 高清晰微距相機

為分析試片表面腐蝕損傷，使用高清微距相機進行拍攝。可觀察腐蝕產物與表層變化，深入瞭解不同鋅板厚度在腐蝕防護上的表現與影響，特別有助於評估局部腐蝕現象。

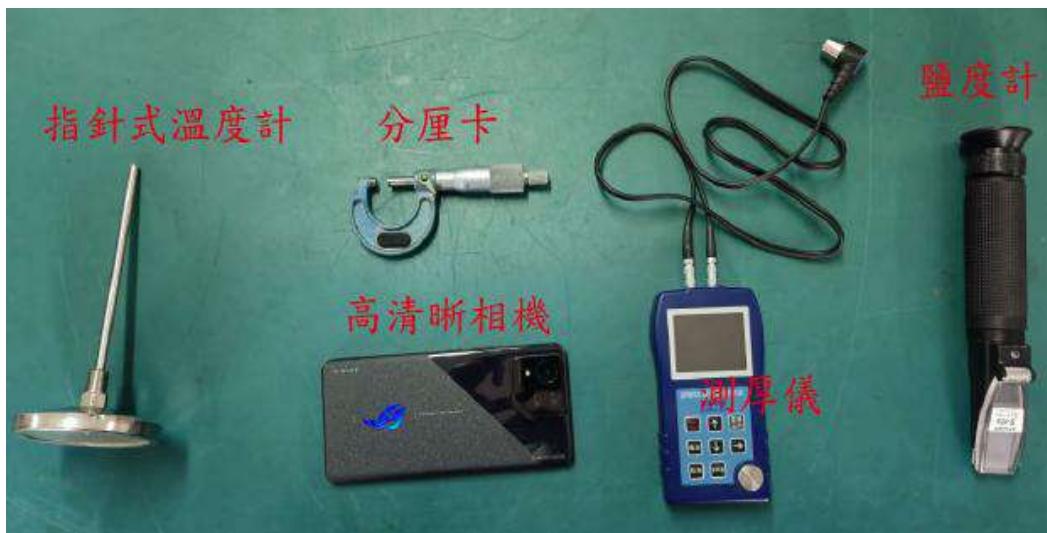


圖2.1 研究設備與測量儀器 (來源：作者拍攝及製作)

依據研究目的，規劃完整流程，設計試板放置方式與腐蝕實驗步驟，觀察不同初始鋅板厚度對腐蝕速率影響，並記錄鋅板消耗完後鐵板加速腐蝕的情形，進而利用實驗量測數據擬合數學模型，作為日後船舶保養、鋅板更換及鋼板厚度監測等工程決策依據。

參、研究過程與方法

依據既定研究目標，規劃整體實驗流程，設計適用於漁港碼頭環境的試板與腐蝕測試方式，觀察不同初始鋅板厚度對腐蝕速率的影響，並探討當鋅板接近完全消耗時，鐵板是否出現腐蝕加劇的現象。透過這些實驗數據，進行數學模型擬合分析，作為日後船體保養、鋅板更換時機與鋼板厚度監控等實務維修計畫的參考依據。

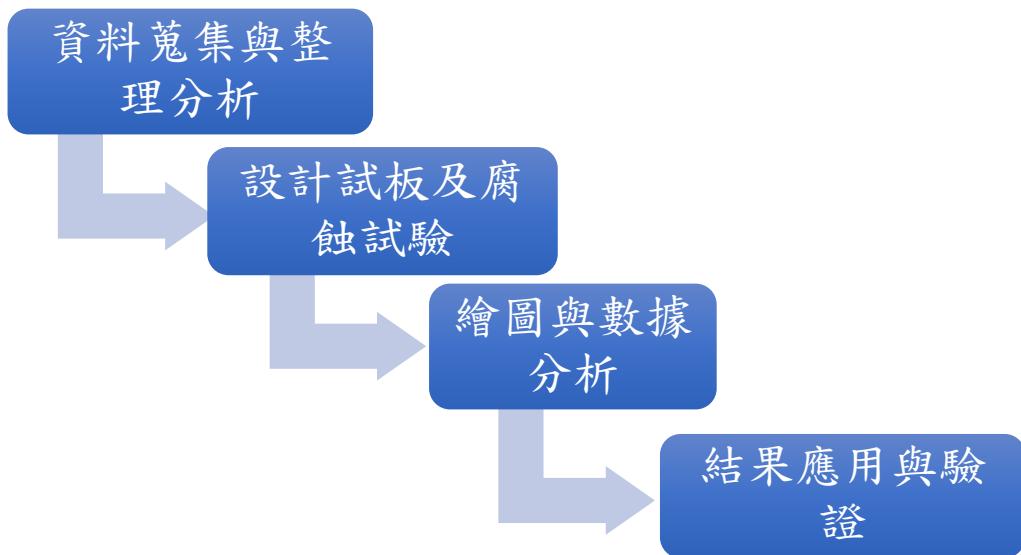


圖3.1 研究流程 (來源：作者自製)

一、實驗設計

- 材料選取與試片製作：挑選不同厚度的鋅板與固定厚度的鐵板(厚度6mm)進行組裝，模擬實際船體結構。鋅板作為陽極保護材料，與鐵板緊密接觸。鋅板依厚度分為1mm、2mm、3mm、4mm、5mm與6mm，裁製並分別與鐵板組合，製成六組對應厚度的腐蝕試片。
- 試驗環境設置：選定屏東縣沿海某漁港碼頭作為放樣場域，將各組試片置於當地海水中浸泡，藉此真實模擬海洋環境中金屬材料所受之腐蝕作用，提升實驗資料之應用效益。
- 實驗變數控制：為探討鋅板厚度對腐蝕保護效果之影響，將鋅板厚度設為唯一變項，並盡量維持其他條件如海水水溫、鹽度與酸鹼值等環境因素穩定，確保實驗數據的可信度與準確性。

二、測量與數據收集

- 定期進行剩餘厚度量測：本研究設計在不同時間點定期量測試片的剩餘厚度，間隔可為數日或每週一次。使用高精度量測儀器，如游標卡尺或超音波測厚儀，確保所收集之厚度數據具備精確性與一致性。
- 進行數據整理分析：將實測厚度資料繪製圖表並進行趨勢分析，藉由數據回歸擬合，推導出對應的腐蝕速率常數及相關公式參數。最終可建立一套經驗公式，預測未來鋅板剩餘厚度，進而判斷各厚度鋅板對鋼板防蝕成效的差異與保護效率。

三、數據分析與腐蝕曲線圖

- 依據實驗所得數據，繪製腐蝕趨勢圖（如剩餘厚度隨時間變化的圖形），以觀察鋅板腐蝕行為與時間之關聯性。透過曲線圖分析，可評估鋅板在各種環境下對鐵板提供的防蝕效能與變化趨勢。
- 導出經驗性公式：根據所取得實驗數據，選擇合適的數學模型進行擬合，例如：
 - 線性模型(如：剩餘厚度 = 初始厚度 - $k \times$ 時間)
 - 指數或對數模型(如：剩餘厚度 = 初始厚度 $\times e^{(-k \times \text{時間})}$)
 依據實際數據趨勢選定最趨近實測值的模型，並由回歸分析獲得腐蝕速率常數 k 與相關參數，建立具預測性的厚度變化經驗公式。

四、研究方法

本研究採用實驗記錄、數據分析及經驗公式推導等方法進行，各種試板設計、屬性與試驗時間如下表3.1所示：

表3.1 試板設計、屬性與試驗時間 (來源：作者自製)

試驗屬性	試驗材質	試片大小	試驗時間 (1日=24時)	放置地點
	鋅板	鋅板8cm×4cm×0.1cm		屏東縣沿海的漁港
	鐵板	鐵板10cm×6cm×0.6cm		

平均腐蝕速率(厚度量測)	鋅板8cm×4cm×0.2cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm	1日、6日、9日、13日、15日、19日、23日、31日
	鋅板8cm×4cm×0.3cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm	
	鋅板8cm×4cm×0.4cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm	
	鋅板8cm×4cm×0.5cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm	
	鋅板8cm×4cm×0.6cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm	

(一) 試板設計

1. 試板種類

碳鋼材料SS41(ASTM A36)，化學組成 (Wt %) 為C 0.26 max, P 0.04 max, S 0.05 max)

2. 試板大小

試板形狀為長方形，鋅板大小為8cm×4cm×(1~6)mm、鐵板大小為10cm×6cm×6mm，如圖3.2所示。



圖3.2 未腐蝕前之試板 (來源：作者拍攝)

3.試板製作(過程如圖3.3)

- (1)運用船舶金工實習課程中學到的技術，將鋅板和鐵板裁切成合適的尺寸，以利與鐵板進行有效組合，確保兩者之間的配合精確。
- (2)運用船舶金工實習課程中學到的技術，對鋅板和鐵板進行鑽孔加工適當大小的孔洞，並透過螺絲和螺帽將其緊固，確保鋅板與鐵板牢固且緊密地裝配。
- (3)使用電刻筆在鋅板刻上編號和厚度標註，以便於後續識別和記錄。

	
裁切尺寸及固定方式討論	進行畫線工作
	
根據畫線位置，使用線鋸進行精確切割	使用中心衝在計算好的畫線位置上定位

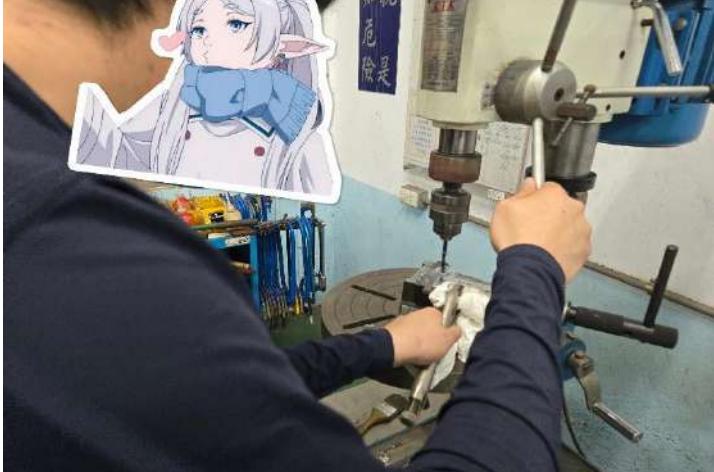
	
使用中心衝打出定位點並進行鑽孔	使用螺絲及螺帽將鋅板、鐵板緊密配合
	
使用電刻筆刻上編號及鋅板厚度以利辨識	

圖3.3 試板製作過程 (來源：作者拍攝與製作)

4.放樣場域與量測位置

直接放置在漁港碼頭浸漬天然海水進行試驗。試板放置深度以平均海平面為基準以能腐蝕到試板為主，如圖3.4所示。

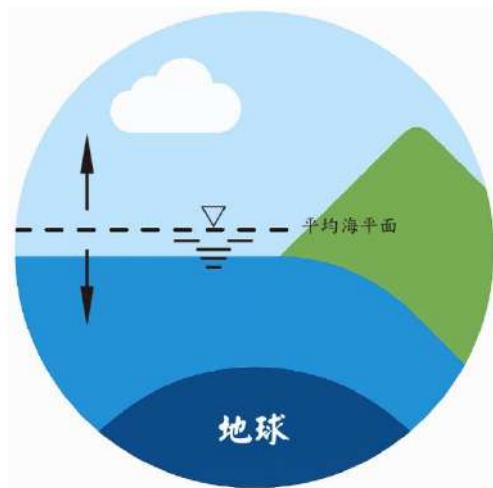


圖3.4 試板放置深度示意 (來源：作者自製)

5. 厚度量測與步驟

以分厘卡量測已清理乾淨之試板表面，即可讀取試板厚度，分厘卡於試板每一面量取三個點位厚度數據(若量取不便則改用測厚儀測量厚度)，平均後即為試板現狀厚度，圖3.5為學生於漁港碼頭量測試板厚度之情形。



圖3.5 量測試板厚度之情形 (來源：作者拍攝)

肆、研究結果與討論

一、實驗結果記錄，如表 4.1 及捌、附錄-試板腐蝕實驗結果照片記錄(P19)所示。

1.表 4.1 呈現不同初始厚度鋅板（1mm 至 6mm）於屏東沿海某漁港環境中，在多個時間點（第 1 日至第 45 日）所量測之剩餘厚度數據。隨著回收時間的增加，各厚度鋅板皆出現腐蝕厚度減少的趨勢，顯示鋅板在實際海水環境中持續發生腐蝕反應。

2.數據分析結果發現，鋅板剩餘厚度與回收時間呈現明顯的非線性遞減趨勢，初期腐蝕速率較高，隨著時間推移，腐蝕速率趨緩。此行為可由典型的指數衰減模型進行描述，其數學模型如下：

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-kt}$$

$h(t)$ ：表示時間 t 時的鋅板剩餘厚度。

h_0 ：為初始厚度（mm）。

k ：腐蝕速率常數，與環境條件及材料特性有關

t ：時間。

3.從表中數據可見，鋅板初始厚度越大，其腐蝕後剩餘厚度保持越多，耐腐蝕性越佳；反之，薄鋅板（如 1mm 與 2mm）在短時間內已明顯腐蝕，至第 45 天已無可量測之厚度，顯示其在海水環境中之保護期限極短。

表 4.1 鋅板腐蝕剩餘厚度記錄（來源：作者自製）

地點	天氣	時間	海水溫度	鹽度 (psu)	回收 時間(日)	鋅板1mm	鋅板2mm	鋅板3mm	鋅板4mm	鋅板5mm	鋅板6mm
						剩餘厚度	剩餘厚度	剩餘厚度	剩餘厚度	剩餘厚度	剩餘厚度
屏東沿海某漁港	晴	17:30	22	31	1	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
屏東沿海某漁港	陰	16:50	22	29	6	0.98	1.98	2.98	3.97	4.95	5.86
屏東沿海某漁港	晴	16:43	22	33	9	0.80	1.85	2.80	3.90	4.89	5.79
屏東沿海某漁港	晴	16:41	22	33	13	0.52	1.62	2.70	3.78	4.78	5.63
屏東沿海某漁港	晴	16:45	22	33	15	0.40	1.41	2.57	3.71	4.67	5.52
屏東沿海某漁港	晴	11:42	21	32	19	0.29	1.06	2.43	3.53	4.58	5.33
屏東沿海某漁港	晴	11:41	22	34	23	0.23	0.85	2.36	3.15	4.50	5.09
屏東沿海某漁港	晴	9:49	21	33	31	0.14	0.60	2.10	2.83	4.14	4.87
屏東沿海某漁港	晴	16:40	21	33	45	0.00	0.00	1.32	2.08	3.34	4.09

二、不同初始厚度鋅板(1~6mm)腐蝕後剩餘厚度之趨勢分析，如圖

4.1 所示。

- 圖中各色數據點與對應之指數衰減曲線代表不同初始厚度鋅板的腐蝕情形。結果顯示，鋅板厚度愈厚，其剩餘厚度愈高，整體腐蝕速率愈低。其中，1mm 與 2mm 鋅板在末期（第 45 天）已幾乎完全腐蝕，顯示其保護作用期限極短，且部分數據因剩餘厚度為 0 無法繼續擬合，可能受到氣候與海水條件變化影響（如氣溫、水溫、鹽度等）。
- 擬合曲線的決定係數 R^2 均高於 0.89，其中 6mm 鋅板達 0.9757，表示所建立之指數衰減模型具有良好預判能力，可解釋 90%以上的腐蝕變異，具備實用性。
- 鋅板厚度與腐蝕係數呈負相關，厚度越小，腐蝕係數越大，即衰減速度越快。例如：1mm 鋅板衰減係數為 0.073，6mm 鋅板僅為 0.009，說明厚鋅板能延緩腐蝕，有效延長保護時間。
- 綜合分析顯示，薄鋅板（1~2mm）適用於短期防護，但不建議用於長期使用；相對地，5~6mm 鋅板耐蝕性最佳，建議應用於長期防護需求。可依照不同環境條件與經濟考量選擇最適合之厚度配置。

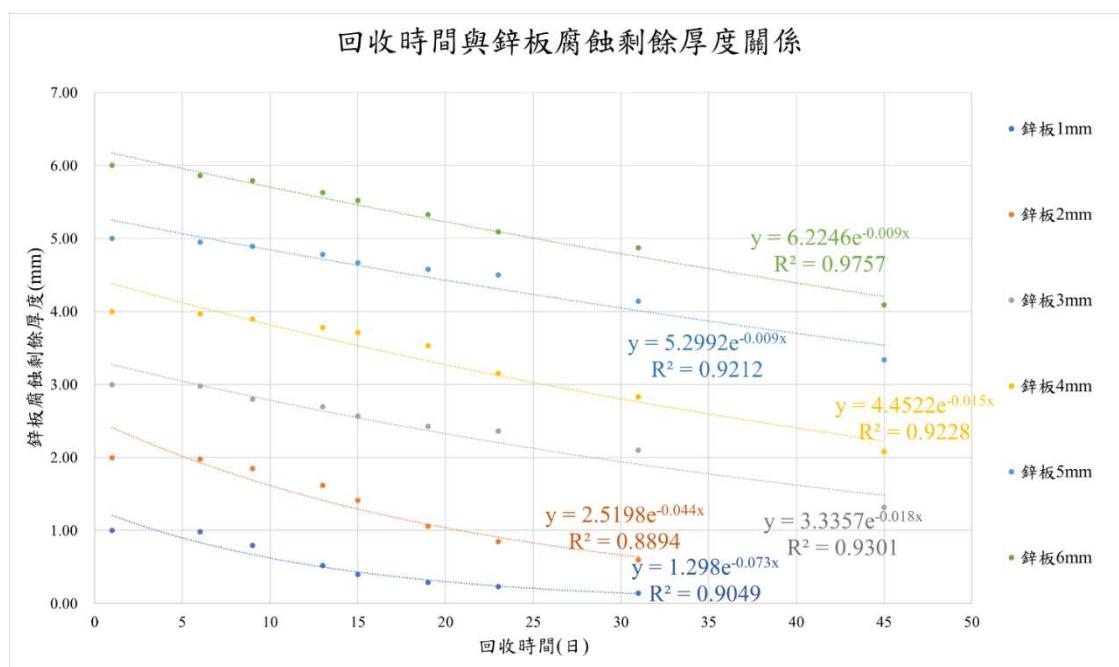


圖 4.1 回收時間與鋅板腐蝕剩餘厚度關係(1~6mm) (來源：作者自製)

三、運用經驗公式預測厚度，驗證與實際量測剩餘厚度值誤差率， 如表 4.2 所示。

1.1mm 鋅板驗證：初期腐蝕速率高，預測與實測值落差大，隨時間推移誤差縮小。說明腐蝕受外在環境影響顯著（如溫濕度、海水鹽度與 pH 值）。第 45 天完全腐蝕，與預測趨勢相符，驗證經驗公式合理性。

2.2mm 鋅板驗證：短期內仍有誤差，但小於 1mm 鋅板，顯示其耐蝕性較佳。長期趨勢穩定，預測準確度提高，誤差明顯降低，模型擬合效果良好。

3.3mm 鋅板驗證：整體誤差小，抗腐蝕能力佳，適用於中長期使用。回收時間 45 天誤差達 12.4%，顯示回收時間越長，腐蝕速率越受環境因素影響，偏離預測模型。

4.4mm 鋅板驗證：預測值與實測值短中期皆準確，模型擬合良好。惟末期誤差率約 9%，說明回收時間間距較長時，環境變數造成腐蝕速率變異，預測偏差擴大。

5.5mm 鋅板驗證：展現極佳耐蝕性，實測值與預測誤差範圍小，模型表現穩定，適用於需長期防護的場合，可信度高。

6.6mm 鋅板驗證：最適合長期防蝕應用，模型預測與實測高度吻合，誤差最小。表現出優異抗腐蝕能力，具最佳保護效果。

7.整體誤差趨勢：初期（天數少）預測值與實測誤差小，經驗公式的擬合度良好；時間延長後，誤差逐漸上升，推測可能因天氣、海水溫度、鹽度與 pH 等因素影響腐蝕速率，導致與預測偏差增加。

8.厚度與耐蝕性：厚鋅板（5mm 與 6mm）耐蝕表現最佳，建議用於需長期保護環境。薄鋅板（1mm 與 2mm）腐蝕迅速，較不適用長時間應用，經驗公式預測準確度高，誤差約 5% 以內，具實用價值。

9.應用建議：透過圖 4.1 中經驗公式推估鋅板厚度，對照實測數據，可有效推算鋅板檢修與更換時機。此分析法對船舶維修產業具實質幫助，提

供科學依據以規劃檢修週期，不僅節省維修成本，也提升船舶使用壽命與操作安全性。

表 4.2 預測厚度驗證與實際量測剩餘厚度誤差 (來源：作者自製)

鋅板規格(1mm)	回收時間(日)	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	1.21	1.00	20.7
	6	0.84	0.98	14.5
	9	0.67	0.80	15.9
	13	0.50	0.52	3.4
	15	0.43	0.40	8.6
	19	0.32	0.29	11.8
	23	0.24	0.23	5.3
	31	0.14	0.14	3.5
	45	0.05	0.00	
鋅板規格(2mm)	回收時間(日)	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	2.41	2.00	20.6
	6	1.94	1.98	2.3
	9	1.70	1.85	8.3
	13	1.42	1.62	12.2
	15	1.30	1.41	7.6
	19	1.09	1.06	3.0
	23	0.92	0.85	7.8
	31	0.64	0.60	7.4
	45	0.35	0.00	
鋅板規格(3mm)	回收時間(日)	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	3.28	3.00	9.2
	6	2.99	2.98	0.5
	9	2.84	2.80	1.3
	13	2.64	2.70	2.2
	15	2.55	2.57	0.9
	19	2.37	2.43	2.5
	23	2.20	2.36	6.6
	31	1.91	2.03	6.0
	45	1.48	1.32	12.4
鋅板規格(4mm)	回收時間(日)	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	4.39	4.00	9.6
	6	4.07	3.97	2.5
	9	3.89	3.90	0.3
	13	3.66	3.78	3.1
	15	3.56	3.71	4.2
	19	3.35	3.53	5.2
	23	3.15	3.15	0.1
	31	2.80	2.83	1.2
	45	2.27	2.08	9.0
鋅板規格(5mm)	回收時間(日)	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	5.25	5.00	5.0
	6	5.02	4.95	1.4
	9	4.89	4.89	0.1
	13	4.71	4.78	1.4
	15	4.63	4.67	0.9
	19	4.47	4.58	2.5
	23	4.31	4.50	4.3
	31	4.01	4.14	3.2
	45	3.53	3.34	5.8
鋅板規格(6mm)	回收時間(日)	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	6.17	6.00	2.8
	6	5.90	5.86	0.6
	9	5.74	5.79	0.9
	13	5.54	5.63	1.6
	15	5.44	5.52	1.5
	19	5.25	5.33	1.6
	23	5.06	5.09	0.6
	31	4.71	4.87	3.3
	45	4.15	4.09	1.5

伍、結論

- 一、以實測數據為基礎，建立一套鋅板腐蝕率評估方法，清楚呈現不同厚度鋅板在海水條件下對鋼板的防護能力差異，提供腐蝕行為之量化參考。
- 二、透過繪製各厚度鋅板隨時間變化的腐蝕曲線，推導對應之經驗公式，做為未來鋅板剩餘厚度預測依據，提升防護計算精準度。
- 三、該模型有助於船舶業者與維修單位在保養規劃時，提前掌握鋅板更換與外殼檢修時機，進而強化船體結構安全性並延長使用年限。
- 四、1mm與2mm鋅板幾乎完全耗蝕，不具長期保護效果。為確保鋼板外殼不被海水腐蝕，建議選用3mm以上鋅板以達到有效防蝕目的。
- 五、未來可導入感知器進行即時腐蝕監控，發展數位式的維護支援系統，提供可量化的鋅板厚度與更換週期最佳化方法，降低維修成本。

陸、參考文獻資料

- [1] 高雄港港工結構材腐蝕與海生物附著研究，李賢華、宋克義、羅俊雄、陳桂清、饒正龍、張道光、林玲煥、羅建明、陳正義、林隆貞、何木火、李昭明編著，國立中山大學，中華民國 89 年 12 月。
- [2] 含腐蝕效應之雙殼散裝貨輪的可靠度分析，楊澤民計畫主持人，國立成功大學系統及船舶機電工程學系(所)，中華民國 93 年 7 月~94 年 8 月。
- [3] 高中數學指數成長或衰減題型通用公式，樂咖大叔-十分鐘課堂，
<https://www.youtube.com/watch?v=ZXw4VqxNtUM>。
- [4] 海洋環境下金屬材料腐蝕行為之檢討，林維明，防蝕工程，中華民國 78 年二

月第二卷第三期。

[5] 高雄港碼頭鋼板樁腐蝕特性研究，羅建明、張道光，交通部運輸 研究所，中華民國 98 年 4 月。

柒、附錄

一、作品分工表 (來源：作者自製)

參賽學生	工作任務
A	文書整理、實驗記錄與整理
B	資料蒐集、實驗材料採買及裁切製作
C	記錄拍照、數據資料整理分析
D	實驗試板設計製作、試板回收量測

二、實作日誌 (來源：作者自製)

年	月	日	進度	紀錄	工作分配
113	12	24	一、開會進行相關案例討論 二、作品目標規劃 三、分配相關工作	地點：輪機科辦公室 器材：電腦、投影機 時數：2 小時	同學 A：蒐集相關資料 同學 B：蒐集相關資料 同學 C：工作方法確定 同學 D：記錄講解內容
114	12	25	一、設定作品欲達成的功能 二、現有資料整合及利用	地點：輪機科會議室 器材：電腦、投影機 時數：3 小時	同學 A：相關資料查閱 同學 B：相關資料查閱 同學 C：記錄與整理 同學 E：相關資料查閱
114	12	30	一、相關試板製作	地點：輪機實習工廠 器材：虎鉗、鋸子、銼刀、鑽床 時數：3 小時	同學 A：試板尺寸繪製 同學 B：材料採購、查找工法 同學 C：鉗工製作 同學 D：記錄與整理
114	12	31	一、尋找適合地點並放置試板	地點：學校附近港口 器材：鉗子、鐵鎚 時數：3 小時	同學 A：google 查找學校附近適合地點 同學 B：場地勘查 同學 C：場地勘查 同學 D：場地勘查
114	1	6	一、試板回收量測並記錄	地點：學校附近港口	同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收

			器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機 時數：1小時	同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	1	9	一、試板回收量測並記錄	地點：學校附近港口 器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機時數：1小時 同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收 同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	1	13	一、試板回收量測並記錄	地點：學校附近港口 器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機時數：1小時 同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收 同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	1	16	一、試板回收量測並記錄	地點：學校附近港口 器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機 時數：1小時 同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收 同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	1	20	一、試板回收量測並記錄	地點：學校附近港口 器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機 時數：1小時 同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收 同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	1	24	一、試板回收量測並記錄	地點：學校附近港口 器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機 時數：1小時 同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收 同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	2	3	一、試板回收量測並記錄	地點：學校附近港口 器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機 時數：1小時 同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收 同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	2	5	一、整合實驗結果	地點：輪機科工廠 器材：電腦、白紙、筆 時數：2小時 同學 A：數據分析 同學 B：數據分析 同學 C：數據分析 同學 D：拍照記錄匯整

114	2	6	一、各式書面報告整理 二、檢討與改進	地點：輪機科會議室 器材：電腦、白紙、筆 時數：3小時	同學 A：資料整理 同學 B：資料整理 同學 C：資料整理 同學 D：資料整理
114	2	17	一、試板回收量測並追加記錄讓數據更完整	地點：學校附近港口 器材：剪刀、溫度計、鹽度計、分厘卡、測厚儀、高清晰微距相機 時數：1小時	同學 A：記錄拍照 同學 B：試板回收 同學 C：試板量測 同學 D：數據記錄
114	2	17	一、書面報告再檢視整理 二、檢討與改進	地點：輪機科會議室 器材：電腦、白紙、筆 時數：3小時	同學 A：資料整理 同學 B：資料整理 同學 C：資料整理 同學 D：資料整理

三、 試板腐蝕實驗結果照片記錄 (來源：作者拍攝與製作)



(來源：作者拍攝與製作)

試板腐蝕 6 日照片記錄(鐵板為 6mm)



(來源：作者拍攝與製作)

試板腐蝕 9 日照片記錄(鐵板為 6mm)

	
1mm 鋅板腐蝕情況	2mm 鋅板腐蝕情況
	
3mm 鋅板腐蝕情況	4mm 鋅板腐蝕情況
	
5mm 鋅板腐蝕情況	6mm 鋅板腐蝕情況

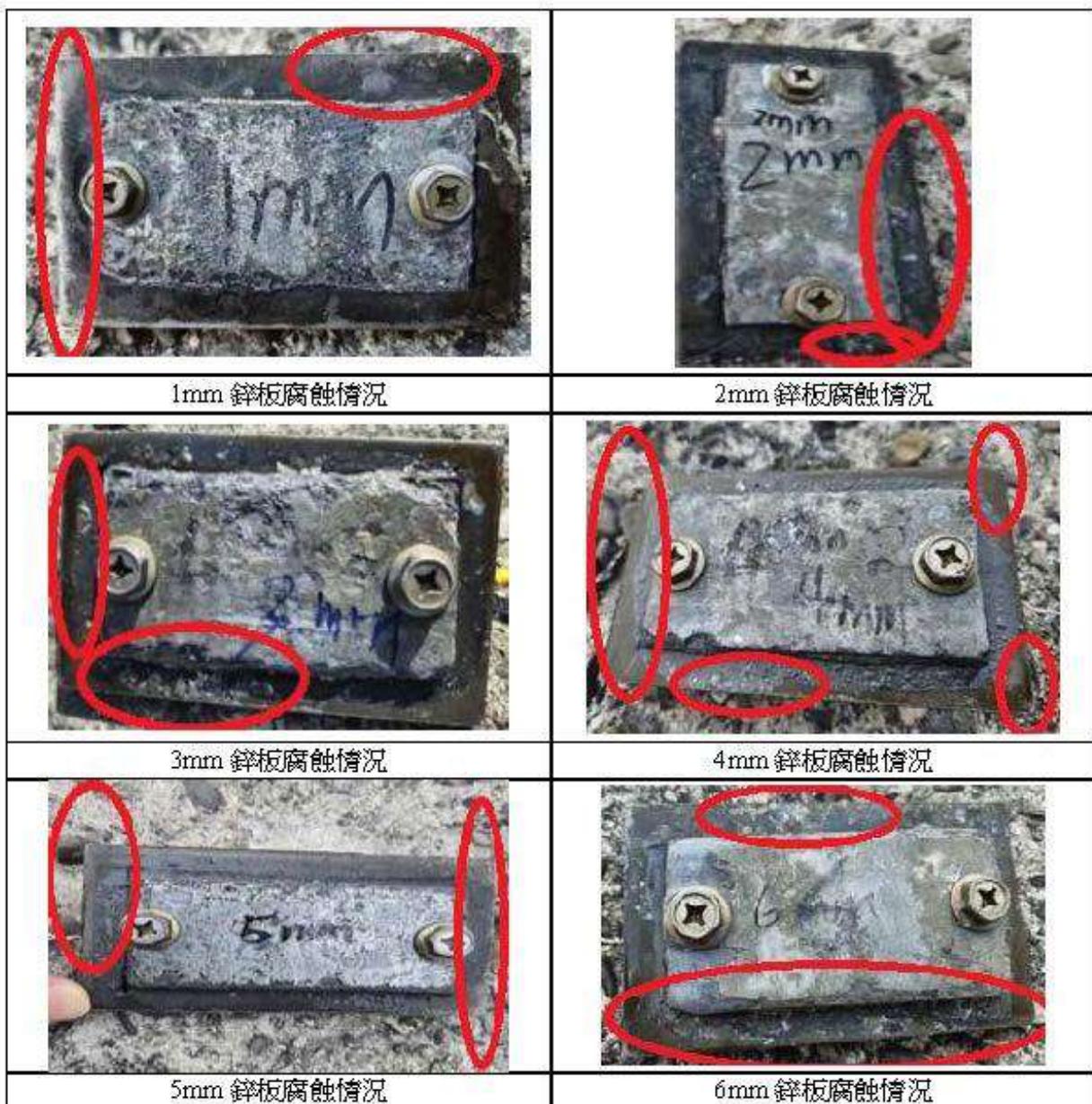
(來源：作者拍攝與製作)

試板腐蝕 13 日照片記錄(鐵板為 6mm)

	
1mm 鋅板腐蝕情況	2mm 鋅板腐蝕情況
	
3mm 鋅版鐵板腐蝕情況	4mm 鋅板腐蝕情況
	
5mm 鋅板腐蝕情況	6mm 鋅板腐蝕情況

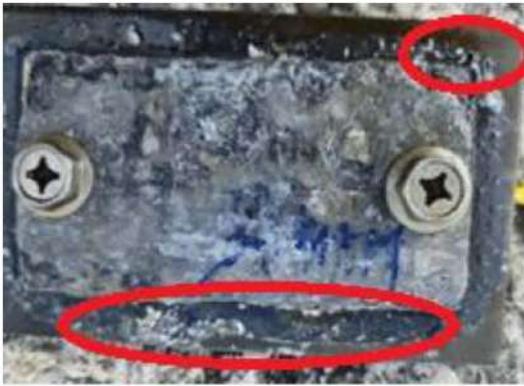
(來源：作者拍攝與製作)

試板腐蝕 15 日照片記錄(鐵板為 6mm)



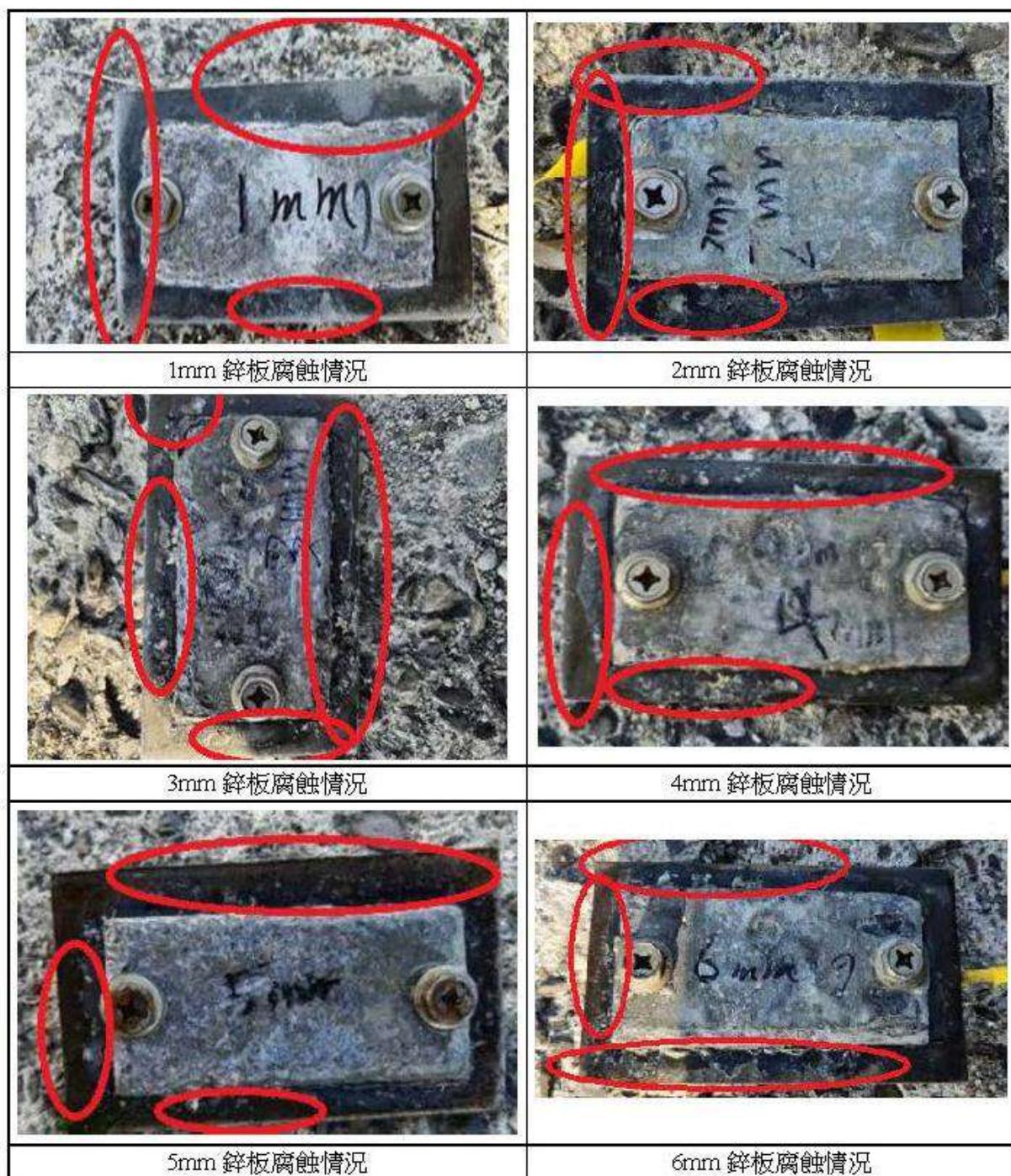
(來源：作者拍攝與製作)

試板腐蝕 19 日照片記錄(鐵板為 6mm)

	
1mm 鋅板腐蝕情況	2mm 鋅板腐蝕情況
	
3mm 鋅板腐蝕情況	4mm 鋅板腐蝕情況
	
5mm 鋅板腐蝕情況	6mm 鋅板腐蝕情況

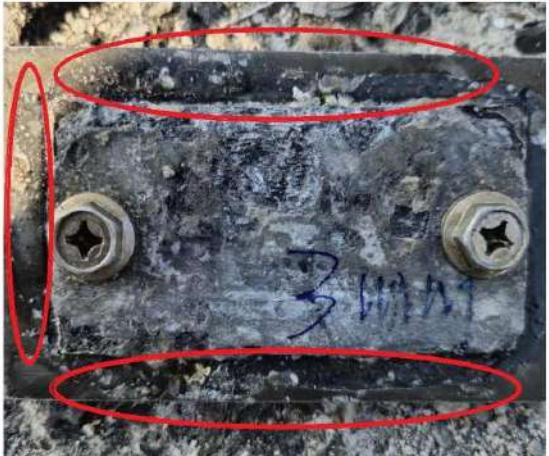
(來源：作者拍攝與製作)

試板腐蝕 23 日照片記錄(鐵板為 6mm)



(來源：作者拍攝與製作)

試板腐蝕 31 日照片記錄(鐵板為 6mm)

	
1mm 鋅板腐蝕情況	2mm 鋅板腐蝕情況
	
3mm 鋅板腐蝕情況	4mm 鋅板腐蝕情況
	
5mm 鋅板腐蝕情況	6mm 鋅板腐蝕情況

(來源：作者拍攝與製作)

【評語】052416

本研究探討鋅板於海水環境下之腐蝕速率，於屏東漁港海水
中，實際量測不同厚度鋅板之腐蝕速率，藉由線性回歸分析，建
立不同厚度鋅版之預測模型公式，以作為計算鋅板腐蝕速率與評
估鋅板抽換時間之參考。實驗設計與規劃皆貼近實際腐蝕狀況，
將試片實際放置於港口中進行測試，並量測記錄當下海水溫度與
鹽度等環境變因。建議可針對不同溫度、鹽度或微生物等條件下
進行測試，討論不同季節下之腐蝕行為與機制。另外，研究中僅
提及碳鋼之來源與成分，亦應提供鋅板相關資訊，同時，加強說
明使用指數衰減模型擬合實驗數據之學理依據，以利結合該預測
模型之實際應用。因缺少探討各種變因對腐蝕行為之影響，結果
討論上顯得較為薄弱，另外，整體討論著重於鋅版之厚度變化，
應加入鋼板表面是否產生腐蝕行為，才能確認是否達到陰極保護
效益。

作品海報

船體結構外板腐蝕監控



(

圖片來源：指導教師拍攝及製作

摘要

本研究探討船體結構外板在海洋環境中的腐蝕行為，並建立預測模型以提升防護與維護效率。由於船舶長期處於高鹽分、高濕度環境，結構易受腐蝕，影響安全與成本。研究採用不同厚度鋅板實驗，結合經驗公式預測腐蝕，並與實測數據比對。結果顯示模型在初期具高準確性，隨時間誤差增大，推測與環境因子如氣溫、鹽度、pH 值等變化有關。厚鋅板（5mm、6mm）具良好耐蝕性，適用長期防護，薄鋅板（1mm、2mm）僅適合短期應用。此模型有助於材料壽命評估與優化結構設計，提升船舶安全與經濟效益。

壹、前言

隨著船舶長期航行於鹽分濃度高、腐蝕性強的海洋環境中，鋼質船體極易因腐蝕而導致結構強度衰退。鋅板作為陽極犧牲材料，能有效延緩鋼板腐蝕，已廣泛應用於船體防護。但現行鋅板使用規範多以經驗為主，缺乏明確依據與動態監測資料，導致鋅板厚度選擇不當或更換不及時，影響船體安全與維修成本。因此，本研究擬延續先前腐蝕實測成果，深入探討不同厚度鋅板之腐蝕行為，並結合數據分析與預測技術，建立鋅板壽命與鋼板保護效益之動態評估機制，以供船舶維護決策之依據。

貳、研究設備與器材

為探討鐵板與各種厚度鋅板所構成試片在屏東沿海漁港海水環境中浸泡後之腐蝕情形，並準確量測其剩餘厚度，實驗採用以下主要設備與測量工具（如圖 2.1 所示）：

（一）分厘卡尺

為了精確量測試片的剩餘厚度，使用了精度較高的分厘卡尺。卡尺能夠測量精細的厚度變化，確保每次測量數據的準確性。定期測量剩餘厚度能夠幫助建立腐蝕速率曲線，進一步分析腐蝕過程。

（二）測厚儀

在一些特殊情況下，若需要更高精度的測量或是難以完全接觸的區域，測厚儀可用來進行接觸難度較高的厚度測量。超音波厚度儀之探頭，接觸已清理乾淨之試板表面，即可讀取試板厚度，試板每面量取三次厚度數據，平均後即為現有厚度。

（三）數據記錄儀及分析軟體

在實驗過程中，所有測量數據均需進行記錄與分析。數據記錄儀用來自動收集環境參數（如水溫、pH 值、鹽度等），而專業的分析軟體則用於數據的處理與分析，幫助研究者進行數據整合並推導經驗公式。

（四）高清晰微距相機

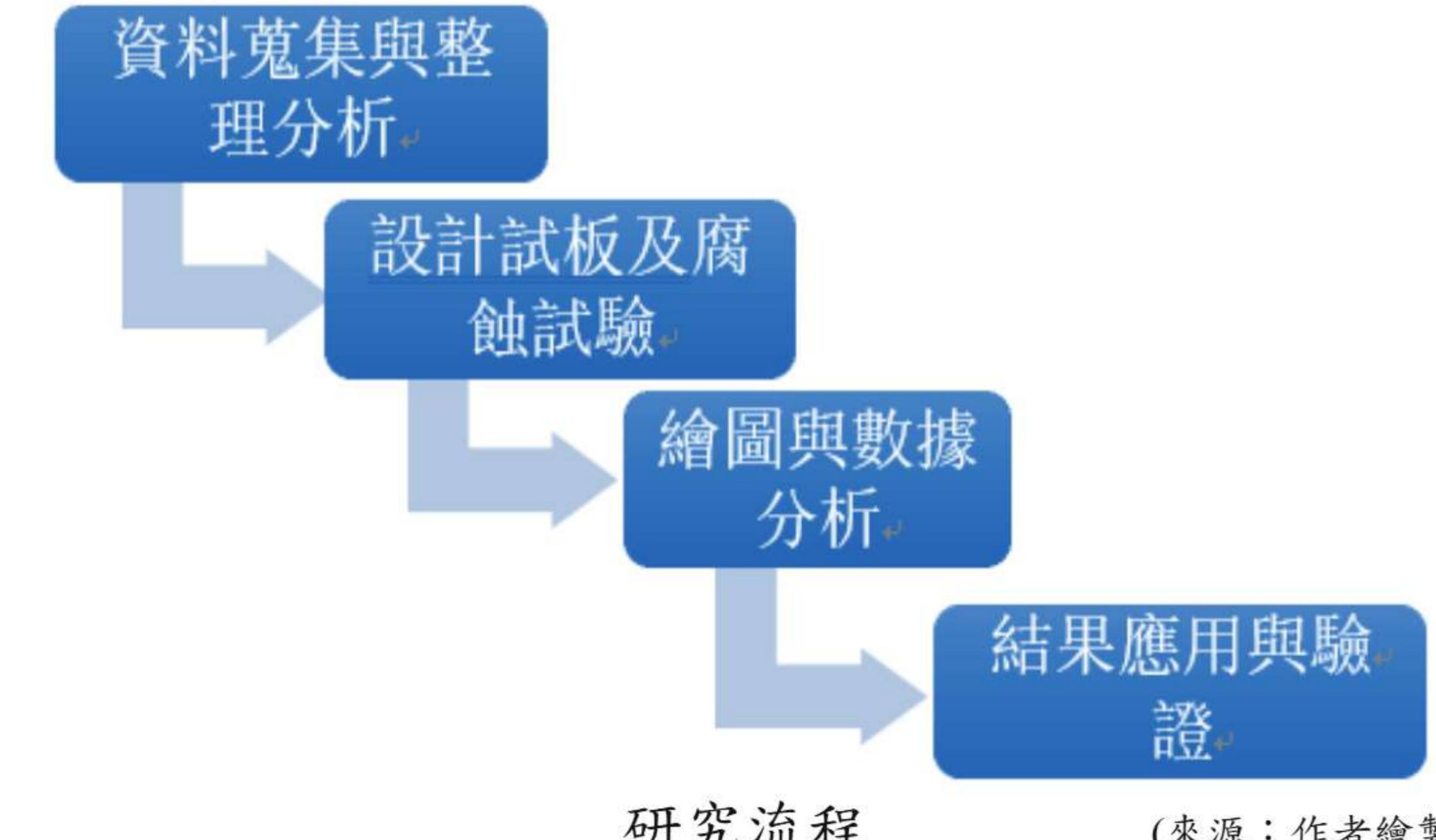
在分析腐蝕產物及微觀結構變化時，使用高清晰微距相機拍攝來觀察試片表面的腐蝕損傷情況。有助於深入了解不同厚度鋅板對鐵板腐蝕過程的影響，特別是對局部腐蝕和鋅板的保護效果。



圖 2.1 研究設備與測量儀器 (來源：作者拍攝)

參、研究過程與方法

依據擬訂之目的，規劃研究流程，設計放置漁港碼頭之試板及腐蝕方法，觀察不同初始鋅板厚度如何影響腐蝕速率，以及何時鋅板幾乎消耗殆盡後，鐵板開始加速腐蝕的現象。進而運用實驗數據，嘗試擬合合適的數學模型，作為船舶維護、鋅板更換和鐵板厚度監控等決策的依據。



（來源：作者繪製）

一、實驗設計

1. 材料選取與試片製作：挑選不同厚度的鋅板與固定厚度的鐵板（厚度 6mm）進行組裝，模擬實際船體結構。鋅板作為陽極保護材料，與鐵板緊密接觸。鋅板依厚度分為 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm 與 6mm，裁製並分別與鐵板組合，製成六組對應厚度的腐蝕試片。
2. 試驗環境設置：選定屏東縣沿海某漁港碼頭作為放樣場域，將各組試片置於當地海水中浸泡，藉此真實模擬海洋環境中金屬材料所受之腐蝕作用，提升實驗資料之應用效益。
3. 實驗變數控制：為探討鋅板厚度對腐蝕保護效果之影響，將鋅板厚度設為唯一變項，並盡量維持其他條件如海水水溫、鹽度與酸鹼值等環境因素穩定，確保實驗數據的可信度與準確性。

二、測量與數據收集

1. 定期進行剩餘厚度量測：本研究設計在不同時間點定期量測試片的剩餘厚度，間隔可為數日或每週一次。使用高精度量測儀器，如游標卡尺或超音波測厚儀，確保所收集之厚度數據具備精確性與一致性。
2. 進行數據整理分析：將實測厚度資料繪製圖表並進行趨勢分析，藉由數據回歸擬合，推導出對應的腐蝕速率常數及相關公式參數。最終可建立一套經驗公式，預測未來鋅板剩餘厚度，進而判斷各厚度鋅板對鋼板防蝕成效的差異與保護效率。

三、數據分析與腐蝕曲線圖

1. 依據實驗所得數據，繪製腐蝕趨勢圖（如剩餘厚度隨時間變化的圖形），以觀察鋅板腐蝕行為與時間之關聯性。透過曲線圖分析，可評估鋅板在各種環境下對鐵板提供的防蝕效能與變化趨勢。例如：
 - (1) 線性模型（如：剩餘厚度 = 初始厚度 - $k \times \text{時間}$ ）。
 - (2) 指數或對數模型（如：剩餘厚度 = 初始厚度 $\times e^{(-k \times \text{時間})}$ ）。

依據實際數據趨勢選定最趨近實測值的模型，並由回歸分析獲得腐蝕速率常數 k 與相關參數，建立具預測性的厚度變化經驗公式。

四、研究方法

本研究採用實驗記錄、數據分析及經驗公式推導等方法進行，各種試板設計、屬性與試驗時間如下表所示：

試驗屬性	試驗材質	試片大小	試驗時間 (1日=24時)	放置地點
平均腐蝕速率(厚度量測)	鋅板 鐵板	鋅板8cm×4cm×0.1cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm	1日、6日、9日、13日、15日、19日、23日、31日	屏東縣沿海的漁港
		鋅板8cm×4cm×0.2cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		
		鋅板8cm×4cm×0.3cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		
		鋅板8cm×4cm×0.4cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		
		鋅板8cm×4cm×0.5cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		
		鋅板8cm×4cm×0.6cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		
		鋅板8cm×4cm×0.7cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		
		鋅板8cm×4cm×0.8cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		
		鋅板8cm×4cm×0.9cm 鐵板10cm×6cm×0.6cm		

(來源：作者繪製)

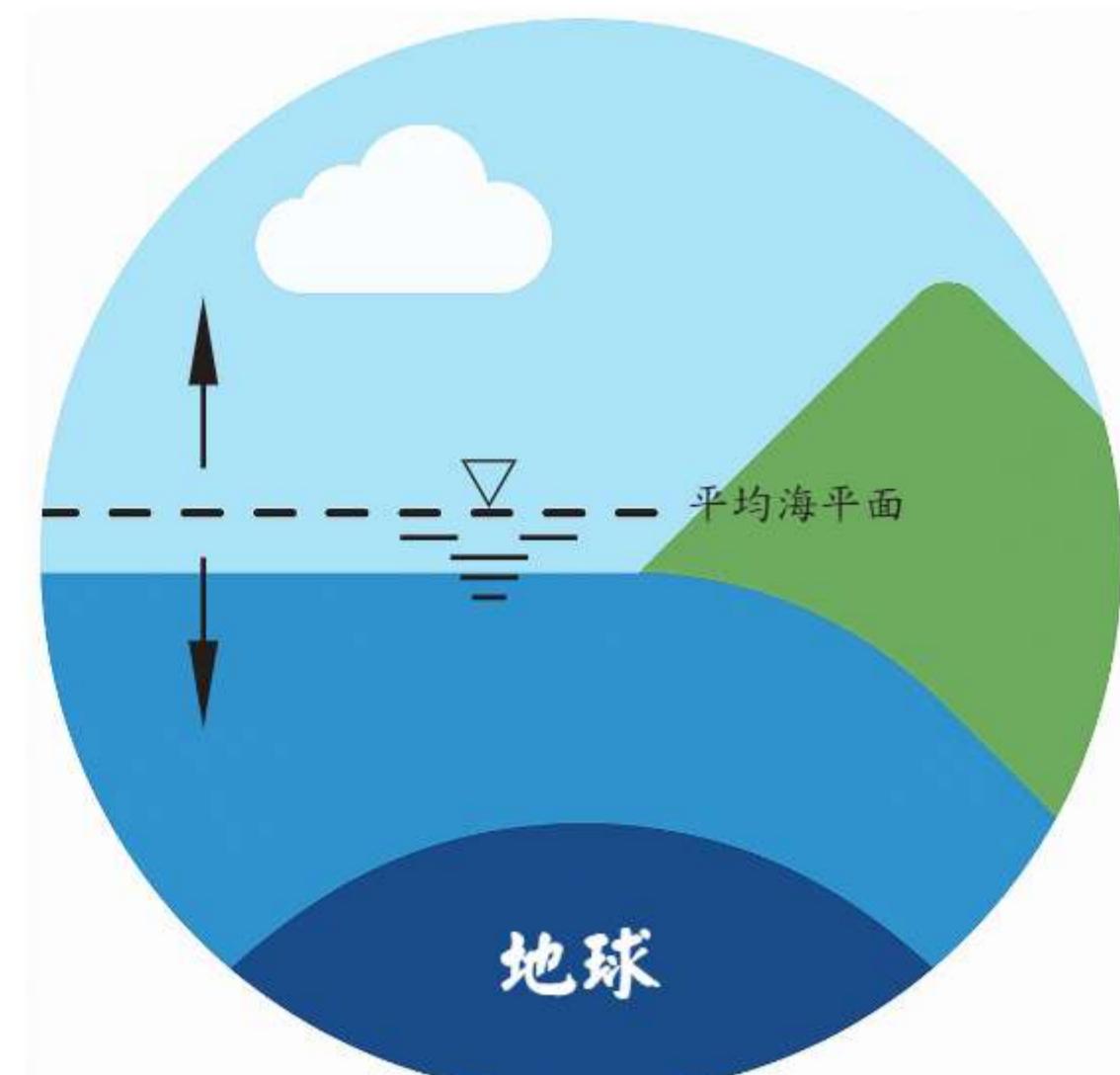


使用電刻筆刻上編號及鋅板厚度以利辨識

(來源：作者拍攝)

4. 放樣場域與量測位置

直接放置在漁港碼頭浸漬天然海水進行試驗。試板放置深度以平均海平面為基準以能腐蝕到試板為主，如下圖所示。



(來源：作者繪製)

5. 厚度量測與步驟

以分厘卡量測已清理乾淨之試板表面，即可讀取試板厚度，分厘卡於試板每一面量取三個點位厚度數據(若量取不便則改用測厚儀測量厚度)，平均後即為試板現狀厚度，下圖為在漁港碼頭量測試板厚度之情形。



(來源：作者拍攝)

(一) 試板設計

1. 試板種類

碳鋼材料 SS41(ASTM A36)，化學組成(Wt %)為 C 0.26 max, P 0.04 max, S 0.05 max)

2. 試板大小

試板形狀為長方形，鋅板大小為 8cm×4cm×(1~6)mm、鐵板大小為 10cm×6cm×6mm。



(來源：作者拍攝)

3. 試板製作



裁切尺寸及固定方式討論

進行畫線工作



根據畫線位置，使用線鋸進行精確切割

使用中心衝在計算好的畫線位置上定位



使用中心衝打出定位點並進行鑽孔

使用螺絲及螺帽將鋅板、鐵板緊密配合

(來源：作者拍攝)

肆、研究結果與討論

一、實驗結果記錄，如表 4.1 所示。

觀察鋅板在不同回收時間的剩餘厚度數據，鋅板腐蝕剩餘厚度隨時間的變化，發現可用指數成長或衰減通用公式來說明，乃因一開始腐蝕速度較快，但隨著時間的推移，腐蝕速度會逐漸變慢。可以使用下面的數學模型來表示其過程：

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-kt}$$

$h(t)$ ：表示時間 t 時的鋅板剩餘厚度。 h_0 ：為初始厚度 (mm)。 k ：腐蝕速率常數，與環境條件及材料特性有關。 t ：時間。

表 4.1 鋅板腐蝕剩餘厚度記錄

(來源：作者繪製)

地點	天氣	時間	海水溫度 (psu)	鹽度 (psu)	回收時間 (日)	鋅板	鋅板	鋅板	鋅板	鋅板	
						1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	
屏東沿海某漁港	晴	17:30	22	31	1	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
屏東沿海某漁港	陰	16:50	22	29	6	0.98	1.98	2.98	3.97	4.95	5.86
屏東沿海某漁港	晴	16:43	22	33	9	0.8	1.85	2.80	3.90	4.89	5.79
屏東沿海某漁港	晴	16:41	22	33	13	0.52	1.62	2.70	3.78	4.78	5.63
屏東沿海某漁港	晴	16:45	22	33	15	0.40	1.41	2.57	3.71	4.67	5.52
屏東沿海某漁港	晴	11:42	21	32	19	0.29	1.06	2.43	3.53	4.58	5.33
屏東沿海某漁港	晴	11:41	22	34	23	0.23	0.85	2.36	3.15	4.50	5.09
屏東沿海某漁港	晴	09:49	21	33	31	0.14	0.60	2.10	2.83	4.14	4.87
屏東沿海某漁港	晴	16:40	21	33	45	0.00	0.00	1.32	2.08	3.34	4.09

二、不同初始厚度鋅板(1~6mm)腐蝕後剩餘厚度之趨勢分析，如圖 4.1 所示。

1. 圖中各色數據點與對應之指數衰減曲線代表不同初始厚度鋅板的腐蝕情形。結果顯示，鋅板厚度愈厚，其剩餘厚度

愈高，整體腐蝕速率愈低。其中，1mm 與 2mm 鋅板在末期(第 45 天)已幾乎完全腐蝕，顯示其保護作用期限極短，且部分數據因剩餘厚度為 0 無法繼續擬合，可能受到氣候與海水條件變化影響(如氣溫、水溫、鹽度等)。

2.擬合曲線的決定係數 R^2 均高於 0.89，其中 6mm 鋅板達 0.9757，表示所建立之指數衰減模型具有良好預判能力，可解釋 90%以上的腐蝕變異，具備實用性。

3.鋅板厚度與腐蝕係數呈負相關，厚度越小，腐蝕係數越大，即衰減速度越快。例如：1mm 鋅板衰減係數為 0.073，6mm 鋅板僅為 0.009，說明厚鋅板能延緩腐蝕，有效延長保護時間。

4.綜合分析顯示，薄鋅板(1~2mm)適用於短期防護，但不建議用於長期使用；相對地，5~6mm 鋅板耐蝕性最佳，建議應用於長期防護需求。可依照不同環境條件與經濟考量選擇最適合之厚度配置。

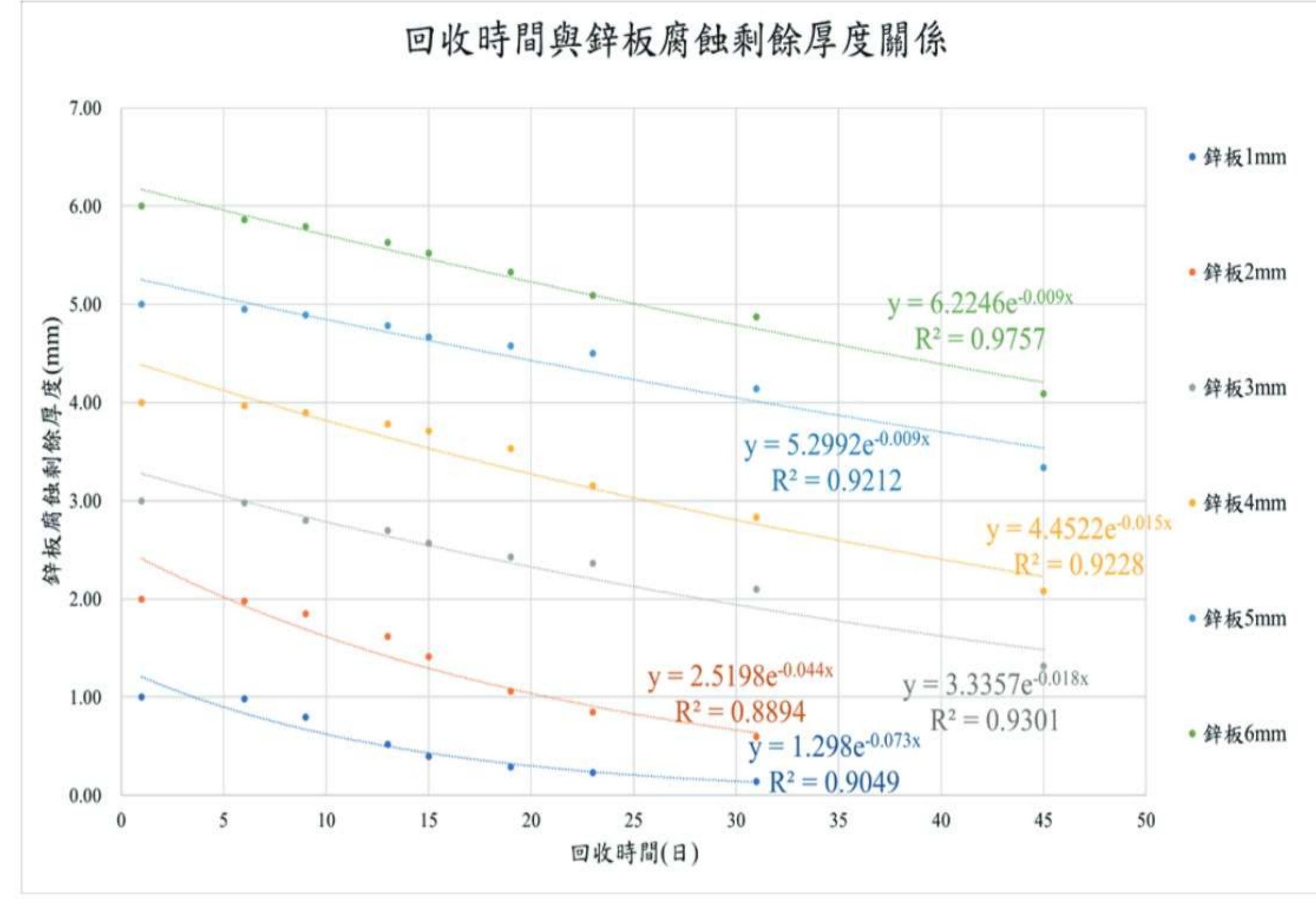


圖 4.1 回收時間與鋅板腐蝕剩餘厚度關係(1~6mm)
(來源：作者繪製)

三、運用經驗公式預測厚度，驗證與實際量測剩餘厚度值誤差率，如表 4.2 所示。

1.1mm 鋅板驗證：初期腐蝕速率高，預測與實測值落差大，隨時間推移誤差縮小。說明腐蝕受外在環境影響顯著(如溫濕度、海水鹽度與 pH 值)。第 45 天完全腐蝕，與預測趨勢相符，驗證經驗公式合理性。

2.2mm 鋅板驗證：短期內仍有誤差，但小於 1mm 鋅板，顯示其耐蝕性較佳。長期趨勢穩定，預測準確度提高，誤差明顯降低，模型擬合效果良好。

3.3mm 鋅板驗證：整體誤差小，抗腐蝕能力佳，適用於中長期使用。回收時間 45 天誤差達 12.4%，顯示回收時間越長，腐蝕速率越受環境因素影響，偏離預測模型。

4.4mm 鋅板驗證：預測值與實測值短中期皆準確，模型擬合良好。惟末期誤差率約 9%，說明回收時間間距較長時，環境變數造成腐蝕速率變異，預測偏差擴大。

5.5mm 鋅板驗證：展現極佳耐蝕性，實測值與預測誤差範圍小，模型表現穩定，適用於需長期防護的場合，可信度高。

6.6mm 鋅板驗證：最適合長期防蝕應用，模型預測與實測高度吻合，誤差最小。表現出優異抗腐蝕能力，具最佳保護效果。

7.整體誤差趨勢：初期(天數少)預測值與實測誤差小，經驗公式的擬合度良好；時間延長後，誤差逐漸上升，推測可能因天氣、海水溫度、鹽度與 pH 等因素影響腐蝕速率，導致與預測偏差增加。

8.厚度與耐蝕性：厚鋅板(5mm 與 6mm)耐蝕表現最佳，建議用於需長期保護環境。薄鋅板(1mm 與 2mm)腐蝕迅速，較不適用長時間應用，經驗公式預測準確度高，誤差約 5%以內，具實用價值。

9.應用建議：透過圖 4.1 中經驗公式推估鋅板厚度，對照實測數據，可有效推算鋅板檢修與更換時機。此分析法對船舶維修產業具實質幫助，提供科學依據以規劃檢修週期，不僅節省維修成本，也提升船舶使用壽命與操作安全性。

表 4.2 預測厚度驗證與實際量測剩餘厚度誤差

鋅板規格(1mm)	天數	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	1.21	1.00	20.7
	6	0.84	0.98	14.5
	9	0.67	0.80	15.9
	13	0.50	0.52	3.4
	15	0.43	0.40	8.6
	19	0.32	0.29	11.8
	23	0.24	0.23	5.3
	31	0.14	0.14	3.5
	45	0.05	0.00	
鋅板規格(2mm)	天數	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	2.41	2.00	20.6
	6	1.94	1.98	2.3
	9	1.70	1.85	8.3
	13	1.42	1.62	12.2
	15	1.30	1.41	7.6
	19	1.09	1.06	3.0
	23	0.92	0.85	7.8
	31	0.64	0.60	7.4
	45	0.35	0.00	
鋅板規格(3mm)	天數	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	3.28	3.00	9.2
	6	2.99	2.98	0.5
	9	2.84	2.80	1.3
	13	2.64	2.70	2.2
	15	2.55	2.57	0.9
	19	2.37	2.43	2.5
	23	2.20	2.36	6.6
	31	1.91	2.03	6.0
	45	1.48	1.32	12.4
鋅板規格(4mm)	天數	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	4.39	4.00	9.6
	6	4.07	3.97	2.5
	9	3.89	3.90	0.3
	13	3.66	3.78	3.1
	15	3.56	3.71	4.2
	19	3.35	3.53	5.2
	23	3.15	3.15	0.1
	31	2.80	2.83	1.2
	45	2.27	2.08	9.0
鋅板規格(5mm)	天數	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	5.25	5.00	5.0
	6	5.02	4.95	1.4
	9	4.89	4.89	0.1
	13	4.71	4.78	1.4
	15	4.63	4.67	0.9
	19	4.47	4.58	2.5
	23	4.31	4.50	4.3
	31	4.01	4.14	3.2
	45	3.53	3.34	5.8
鋅板規格(6mm)	天數	預測厚度 (經驗公式)	實際量測厚度	誤差(%)
	1	6.17	6.00	2.8
	6	5.90	5.86	0.6
	9	5.74	5.79	0.9
	13	5.54	5.63	1.6
	15	5.44	5.52	1.5
	19	5.25	5.33	1.6
	23	5.06	5.09	0.6
	31	4.71	4.87	3.3
	45	4.15	4.09	1.5

(來源：作者繪製)

伍、結論與建議

一、以實測數據為基礎，建立一套鋅板腐蝕率評估方法，清楚呈現不同厚度鋅板在海水條件下對鋼板的防護能力差異，提供腐蝕行為之量化參考。

二、透過繪製各厚度鋅板隨時間變化的腐蝕曲線，推導對應之經驗公式，做為未來鋅板剩餘厚度預測依據，提升防護計算精準度。

三、該模型有助於船舶業者與維修單位在保養規劃時，提前掌握鋅板更換與外殼檢修時機，進而強化船體結構安全性並延長使用年限。

四、1mm 與 2mm 鋅板幾乎完全耗蝕，不具長期保護效果。為確保鋼板外殼不被海水腐蝕，建議選用 3mm 以上鋅板以達到有效防蝕目的。

五、未來可導入感知器進行即時腐蝕監控，發展數位式的維護支援系統，提供可量化的鋅板厚度與更換週期最佳化方法，降低維修成本。