

114-017-7D86

MOTC-IOT-113-H1CA001e

113 年臺灣地區金屬材料腐蝕 環境調查與鋅金屬關聯性研究



交通部運輸研究所

中華民國 114 年 3 月

114-017-7D86

MOTC-IOT-113- H1CA001e

113 年臺灣地區金屬材料腐蝕 環境調查與鋅金屬關聯性研究

著 者：謝幼屏、蔡立宏、鄭登鍵

交通部運輸研究所

中華民國 114 年 3 月

臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性
研究. 113 年 / 謝幼屏, 蔡立宏, 鄭登鍵著. --
初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民
114.03

面 ; 公分

ISBN 978-986-531-644-0(平裝)

1.CST: 金屬材料 2.CST: 浸蝕 3.CST: 管理
資訊系統 4.CST: 臺灣

440.35

114001557

113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

著 者：謝幼屏、蔡立宏、鄭登鍵

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>中心出版品)

電 話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 114 年 3 月

印 刷 者：綠凌興業社

版(刷)次冊數：初版一刷 47 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸科技及資訊組•電話：(02)2349-6789

國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號 1F•電話：(02) 2518-0207

五南文化廣場：400002 臺中市區中山路 6 號•電話：(04)2226-0330

GPN：1011400206

ISBN：978-986-531-644-0 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所
書面授權。

113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

交通部運輸研究所

GPN : 1011400206

定價 200 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN 978-986-531-644-0 (平裝)	政府出版品統一編號 1011400206	運輸研究所出版品編號 114-017-7D86	計畫編號 MOTC-IOT-113-H1CA001e
本所主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：謝幼屏 研究人員：鄭登鍵 參與人員：陳亭廷、陶德勇、陳育齊、王培源 聯絡電話：(04)2658-7200 傳真號碼：(04)2657-1329			研究期間 自 113 年 1 月 至 113 年 12 月
關鍵詞：金屬腐蝕、腐蝕因子、腐蝕環境			
摘要： 臺灣地處亞熱帶，屬高溫、高濕、高鹽的海島型氣候，金屬構件甚易腐蝕。為此，有必要建置本土之腐蝕環境資料及腐蝕因子資料庫，以利做為結構物防蝕設計與維護管理應用依據。本計畫主要工作項目包括：1.臺灣大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗；2.港區水下腐蝕暴露試驗與海水水質調查；3.精進及擴充腐蝕資料庫；4.鋅金屬與腐蝕因子關聯性分析。 研究結果顯示，氯鹽沉積速率在秋、冬2季北部至西部沿海地區的試驗點較高，垂直海岸試驗線的平均氯鹽沉積速率，以基隆試驗線冬季數值較高；二氧化硫沉積速率除靠近硫磺區的陽明山國家公園外，較高的二氧化硫沉積速率大多發生在西部的產業園區，以及北部沿海十八王公橋，且以秋、冬2季較高，特定試驗點以彰濱工業區、觀音工業區及官田工業區在秋、冬2季較高。 金屬腐蝕速率各垂直海岸試驗線之比較，碳鋼金屬在基隆試驗線及台塑六輕試驗線的腐蝕速率較高，且以冬季最高；鋅金屬以台塑六輕試驗線最高，其次是臺中港試驗線、高雄港試驗線及核三試驗線；銅金屬的腐蝕速率以臺塑六輕、臺中港2條試驗線較高；鋁金屬以西部的台塑六輕、臺中港、桃園等3條試驗線的腐蝕速率較高，且以秋、冬2季較高。 鋅金屬與腐蝕因子關聯性分析，運用迴歸分析法建立腐蝕因子與鋅腐蝕速率間的迴歸模式，結果顯示，鋅腐蝕速率主要受到氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等2項腐蝕因子的影響，兩者間為對數線性關係，模式為：$\ln(Zn_{corr}) = 0.285 \ln(Cl) + 0.251 \ln(SO_2)$。依據模式可進行鋅金屬腐蝕環境分類等級，並建議以60%預測區間預測，預測正確率可達90%。 研究成果效益及應用： 調查成果擴增於腐蝕資料庫，並發行年報、公開於網站，具有提供相關單位瞭解構造物所處之腐蝕環境趨勢，以及選用金屬材料與防蝕工法之效益。可提供臺灣港務公司、中華民國防蝕工程學會、經濟部產業發展署、臺塑企業、中國鋼鐵公司、工程顧問公司等產官學界參考應用。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
114 年 3 月	233	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Investigation of Corrosive Environments for Metal Materials in Taiwan Region in 2024 and Correlation Analysis of Zinc Metal and Corrosion Factors.			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-644-0 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011400206	IOT SERIAL NUMBER 114-017-7D86	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-113- H1CA001e
DIVISION: Transportation Technology Research Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Yu-Ping Hsieh RESERACH FELLOW: Teng-Chien Cheng PROJECT STAFF: Ting-Ting Chen, Te-Yung Tao, Yu-Chi Chen, Pei-Yuan Wang PHONE: 04-2658-7200 FAX: 04-2657-1329			PROJECT PERIOD FROM January 2024 TO December 2024
KEYWORDS: Metal Corrosion, Corrosion Factor, Corrosive Environment			
Abstract: Taiwan, situated in the subtropics, experiences a hot, humid, and saline island climate, making metal components highly susceptible to corrosion. Therefore, it is essential to establish a local corrosion database to serve as a basis for corrosion-resistant design and maintenance management of structures. The main tasks of this project include: 1. Investigation of atmospheric corrosion factors in Taiwan and exposure testing of metal materials; 2. Underwater corrosion exposure testing and seawater quality investigation; 3. Refinement and expansion of the corrosion database; 4. Correlation analysis between Zinc metal corrosion and corrosion factors. The research findings indicate that the deposition rate of chloride salts is higher in the northern to western coastal areas during the autumn and winter seasons. Among the vertical coastal test lines, the average chloride salt deposition rate is higher along the Formosa Plastics Sixth Naphtha Cracker Complex test line. The deposition rate of sulfur dioxide, except for areas near the sulfur region in Yangmingshan National Park, is mostly higher in the western coal-fired power plants and industrial areas, with higher rates observed during the autumn and winter seasons. Specific test points, such as the Changhua Coastal Industrial Zone, Guanyin Industrial Zone, and Guantian Industrial Zone, exhibit higher values. Comparison of the corrosion rates along various vertical coastal test lines for different metal types reveals that the corrosion rate of carbon steel is higher along four test lines in the western to northern regions, including Keelung, Taoyuan, Taichung Harbor, and Formosa Plastics Sixth Naphtha Cracker Complex. Moreover, the corrosion rates are generally higher during the autumn and winter seasons. Zinc metal exhibits higher corrosion rates during the autumn and winter seasons along five test lines, including Keelung, Taoyuan, Taichung Harbor, Formosa Plastics Sixth Naphtha Cracker Complex, and Hualien Harbor, with significant seasonal differences. Copper metal shows more severe corrosion rates along two test lines, namely Formosa Plastics Sixth Naphtha Cracker Complex and Taichung Harbor. Aluminum metal experiences higher corrosion rates along three test lines in the western region, including Taoyuan, Taichung Harbor, and Formosa Plastics Sixth Naphtha Cracker Complex, with higher rates observed during the autumn and winter seasons. The correlation analysis between carbon steel metal and corrosion factors involved the application of regression analysis to establish a regression model between corrosion factors and the corrosion rate of carbon steel. The results indicate that the corrosion rate of carbon steel is primarily influenced by five corrosion factors: percentage of wetting time, chloride salt deposition rate, sulfur dioxide deposition rate, wind speed, and wind direction. The relationship between these factors and the corrosion rate follows a logarithmic linear pattern. The pattern is: $\ln(Zn_{\text{corr}}) = 0.285 \ln(Cl) + 0.251 \ln(SO_2)$. The zinc metal corrosion environment can be classified according to the model, and a 60% prediction interval is recommended, with a prediction accuracy of up to 90%.			
Benefits and Applications: The survey results are expanded into the corrosion database, and annual reports are issued and made public on the website, which can help relevant units understand the corrosion environment trends of the structures, as well as the benefits of selecting metal materials and anti-corrosion methods. The results can be provided as reference for all industrial, governmental and academic entities such as the Taiwan International Ports Corporation, the Corrosion Engineering Association of ROC, the Industrial Development Administration of MOEA, Formosa Plastics Group, China Steel Corporation, engineering consultants.			
DATE OF PUBLICATION March 2025		NUMBER OF PAGES 233	PRICE 200
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查 與鋅金屬關聯性研究

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖目錄	VII
表目錄	IX
第一章 前言	1-1
1.1 計畫目的	1-1
1.2 計畫之重要性	1-1
1.2.1 大氣腐蝕	1-1
1.2.2 水下腐蝕	1-2
1.3 國內腐蝕研究概況	1-3
1.3.1 大氣腐蝕研究概況	1-3
1.3.2 水下腐蝕研究概況	1-7
1.4 計畫工作項目	1-13
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 大氣腐蝕測試規範	2-1
2.1.1 國外 ISO 大氣腐蝕環境分類	2-1
2.1.2 國外 CLIMATE TEST 大氣腐蝕環境分類	2-4
2.1.3 中華民國國家標準 CNS 規範	2-5

2.2 大氣腐蝕因子介紹	2-6
2.3 影響大氣腐蝕的因子	2-8
2.4 鋼材在海水之腐蝕	2-10
2.5 影響鋼板樁腐蝕之因子	2-11
2.5.1 暴露區域	2-11
2.5.2 海水的性質	2-13
2.6 大氣腐蝕環境因子之參數建立	2-21
2.7 迴歸分析於大氣腐蝕應用	2-22
第三章 研究方法與試驗點位置資料圖表	3-1
3.1 大氣暴放環境	3-1
3.1.1 氯鹽沉積速率試驗調查	3-1
3.1.2 氯鹽沉積速率計算	3-6
3.1.3 二氧化硫沉積速率調查	3-7
3.1.4 二氧化硫沉積速率計算	3-11
3.1.5 現地暴露試驗	3-13
3.1.6 試片腐蝕速率計算	3-15
3.1.7 試片腐蝕生成物清除與測試	3-15
3.2 腐蝕因子環境分類	3-18
3.3 海洋暴放環境	3-21
3.3.1 研究方法與規劃	3-21
3.3.2 各港區海水下金屬暴露試驗	3-22
3.3.3 試片腐蝕速率分析方法	3-29
3.3.3.1 試片定期採樣之處理分析方法	3-29

3.3.3.2 試片腐蝕分析步驟	3-29
3.3.3.3 腐蝕速率計算	3-30
第四章 大氣腐蝕因子與現地暴露試驗.....	4-1
4.1 氯鹽沉積速率調查結果.....	4-1
4.2 二氧化硫沉積速率調查結果.....	4-6
4.3 現地暴露試驗結果.....	4-12
4.3.1 垂直海岸試驗線各金屬腐蝕速率之比較	4-26
4.3.2 特定試驗點各金屬腐蝕速率之比較	4-26
第五章 鋅金屬腐蝕關聯性統計分析.....	5-1
5.1 關聯性統計分析方法.....	5-1
5.2 迴歸分析.....	5-4
5.3 腐蝕環境分類等級預測.....	5-16
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-3
6.3 研究成果之效益.....	6-3
6.4 提供政府單位應用情形.....	6-4
參考文獻.....	參-1
附錄一 腐蝕生成物清除檢量線、腐蝕速率等位線分布圖及腐蝕環境分類圖	附錄 1-1
附錄二 專家學者座談會會議紀錄.....	附錄 2-1
附錄三 第 1 次工作會議紀要.....	附錄 3-1
附錄四 第 2 次工作會議紀要.....	附錄 4-1
附錄五 第 3 次工作會議紀要.....	附錄 5-1

附錄六 期末審查意見及辦理情形說明表..... 附錄 6-1

附錄七 期末報告簡報資料..... 附錄 7-1

圖 目 錄

圖 2.1	ISO 大氣腐蝕環境分類	2-2
圖 2.2	CLIMATE TEST 大氣腐蝕測試	2-5
圖 2.3	水溶液系統之腐蝕程序示意圖	2-10
圖 2.4	鋼板樁暴露區域與腐蝕速率之關係	2-12
圖 2.5	海水含鹽量與溶氧量、pH 值、溫度、水深之關係	2-14
圖 2.6	鋼材腐蝕速率與 pH 值之關係	2-15
圖 2.7	鋼材腐蝕速率與溶氧量之關係	2-16
圖 2.8	鋼材腐蝕速率與海水流速之關係	2-18
圖 2.9	碼頭鋼板樁遭受雜散電流之情形	2-19
圖 3.1	氯鹽沉積速率調查位置	3-5
圖 3.2	濕燭法燭心構造示意圖 (CNS 13754)	3-6
圖 3.3	濕燭法裝置構造圖 (CNS 13754)	3-6
圖 3.4	二氧化硫沉積速率調查位置圖	3-10
圖 3.5	二氧化硫沉積量採集裝置 (CNS 13754)	3-11
圖 3.6	螺旋狀試片構造圖(CNS 13753-1996)	3-13
圖 3.7	現地暴露試驗(碳鋼、鋅、鋁、銅螺旋狀試片)試驗點分佈圖	3-14
圖 3.8	腐蝕生成物清除法作業流程圖	3-17
圖 3.9	水下腐蝕研究方法與規劃	3-21
圖 3.10	水下金屬腐蝕試驗架示意圖	3-27
圖 3.11	基隆港水下金屬暴露試驗架安裝	3-28
圖 3.12	水下金屬腐蝕生成物清除作業流程圖	3-29

圖 4.1	垂直海岸試驗線之氯鹽平均沉積速率.....	4-5
圖 4.2	特定試驗點之二氧化硫沉積速率.....	4-11
圖 4.3	垂直海岸試驗線碳鋼金屬腐蝕速率比較圖.....	4-28
圖 4.4	垂直海岸試驗線鋅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-28
圖 4.5	垂直海岸試驗線銅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-29
圖 4.6	垂直海岸試驗線鋁金屬腐蝕速率比較圖.....	4-29
圖 4.7	特定測站碳鋼金屬腐蝕速率比較圖.....	4-30
圖 4.8	特定測站鋅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-30
圖 4.9	特定測站銅金屬腐蝕速率比較圖.....	4-31
圖 4.10	特定測站鋁金屬腐蝕速率比較圖.....	4-31
圖 5.1	迴歸分析的步驟.....	5-2
圖 5.2	線性模式的常態機率圖.....	5-9
圖 5.3	線性模式的殘差圖.....	5-10
圖 5.4	無常數項對數線性模式的常態機率圖.....	5-14
圖 5.5	無常數項對數線性模式的殘差圖.....	5-15

表 目 錄

表 1-1	臺灣地區大氣腐蝕試驗相關研究歷程	1-4
表 1-2	臺灣地區水下腐蝕試驗相關研究歷程	1-9
表 2-1	大氣腐蝕性分級對比	2-3
表 3-1	氯鹽沉積速率調查試驗點規劃分類表	3-3
表 3-2	二氧化硫沉積速率調查試驗點分佈表	3-9
表 3-3	化學清洗法使用藥品及條件	3-16
表 3-4	濕潤環境等級分類表	3-19
表 3-5	氯鹽腐蝕環境等級分類表	3-19
表 3-6	二氧化硫腐蝕環境等級分類表	3-19
表 3-7	大氣腐蝕環境分類-以各種標準金屬最初第 1 年之腐蝕速率區分	3-20
表 3-8	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(1/4) ..	3-23
表 3-9	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(2/4) ..	3-24
表 3-10	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(3/4) ..	3-25
表 3-11	各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(4/4) ..	3-26
表 4-1	氯鹽沉積速率表	4-3
表 4-2	二氧化硫沉積速率表	4-8
表 4-3	特定試驗點之二氧化硫沉積速率表	4-10
表 4-4	碳鋼金屬之腐蝕速率表	4-14
表 4-5	鋅金屬之腐蝕速率表	4-17
表 4-6	銅金屬之腐蝕速率表	4-20
表 4-7	鋁金屬之腐蝕速率表	4-23

表 5-1	迴歸模式變數說明	5-5
表 5-2	線性模式.....	5-6
表 5-3	2 解釋變數線性模式	5-8
表 5-4	對數線性模式.....	5-12
表 5-5	無常數項對數線性模式	5-13
表 5-6	點預測與 5 種預測區間的預測正確率	5-19

第一章 前言

1.1 計畫目的

臺灣地處亞熱帶，屬高溫、高濕、高鹽的海島型氣候，又因工業蓬勃發展及車輛急劇成長，依據國際標準組織(ISO)的大氣腐蝕環境分類準則(分為 C1 到 CX 等級)，臺灣沿岸區域幾乎全為嚴重腐蝕等級 C5，部分地區甚至達到最高的 CX 等級。有鑑於腐蝕環境品質影響交通建設及工業發展甚巨，本所本於交通部之權責支援交通基礎設施設計、維護事宜，進行大氣腐蝕因子調查與金屬腐蝕試驗，目前為國內提供產官學各界完整長期金屬材料腐蝕環境分類應用之唯一單位。為利公共工程之防蝕設計，延長結構物之使用壽齡及降低維護成本，爰廣續辦理本研究。

1.2 計畫之重要性

1.2.1 大氣腐蝕

臺灣為一海島，四面環海，高溫、高濕與高鹽份的環境，加上空氣污染的結果，腐蝕環境嚴重。歷年來公共工程建設常引用國外大氣腐蝕數據進行腐蝕速率評估與防蝕設計，結果常有未及設計年限就已銹蝕損壞的情形；有鑑於此，大氣腐蝕因子的調查與掌握對金屬與鋼筋混凝土結構物耐久性防蝕設計的影響，有其重要性。

然而臺灣缺乏完整的本土化大氣腐蝕因子資料庫。自 1971 年起，國內各研究單位曾陸續以試片腐蝕速率的量測方式，進行臺灣大氣腐蝕環境分類，然而因試驗場址維護不易，各地區鮮少有持續 10 年以上的腐蝕數據，且大部份的研究亦止於 1995 年。隨著氣候變遷與工業的發展，為達到結構物耐久性防蝕設計的目的，目前若仍引用過去腐蝕因子之調查數據，腐蝕速率的估算恐會產生過與不及的疑慮；有鑑於此，本所乃自 2007 年起迄今規劃並辦理臺灣地區大氣腐蝕試驗相關研究，長期針對臺灣全島區域進行大氣腐蝕劣化因子調查，完成臺灣大氣腐

蝕環境的分類工作，並根據調查結果建立大氣腐蝕環境分類資料庫，規劃一適合國內環境需求的大氣腐蝕劣化因子查詢系統，做為日後新建與既有金屬及鋼筋混凝土結構物辦理防蝕設計與維護管理之依據。

1.2.2 水下腐蝕

臺灣四面環海，沿海除了有海港碼頭、防波堤等港工設施外，鑽油平臺、跨海大橋等皆處於海洋環境中。常因颱風來襲造成重大損失，如民國 83 年提姆、道格颱風過境，造成花蓮港、蘇澳港、龍洞遊艇港及高雄港等，多處港工設施破壞、沈陷等重大損害。顯示出相當部分的港工設施，已面臨或提早到達設計年限，究其原因，各港工結構面臨險惡之海洋環境而被腐蝕、侵襲，造成材料彈性疲乏，強度損失，以致使用年限大為縮短，應為重要因素之一。

港工結構所使用的材料，除了石料之外、主要為鋼構材料及混凝土或鋼筋混凝土材料為主。其中鋼構材料如鋼板樁、鋼管樁及配合使用之拉縴鋼纜等各型鋼料，材質均有不同。其腐蝕之現象，由於在不同海域環境、季節、深度會產生不同腐蝕速率。根據本所過去所做相關研究報告，在臺灣各大港口使用鋼構材料的碼頭大多為鋼板樁式。發現其鋼板樁有嚴重破損、穿孔之腐蝕現象，以致部分碼頭壁後砂石掏空，岸肩沈陷，嚴重影響碼頭之結構安全。如蘇澳港之駁船碼頭，鋼板樁年腐蝕率超過 0.2 mm/yr，其他各港口亦有類似現象。隨著時空、氣候變遷，為達到結構物耐久性與防蝕設計須求，若仍引用過時且不完整之調查數據，對結構物之耐久性與腐蝕速率的估算，恐會產生過與不及的疑慮；臺灣近 10 年來並無任何單位進行完整性全島區域之水下腐蝕因子之調查與研究，因此，本計畫延續過去相關研究，進行水下環境腐蝕因子與金屬材料水下長期暴放試驗與資料庫建置計畫，做為新建與既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考。

1.3 國內腐蝕研究概況

1.3.1 大氣腐蝕研究概況

臺灣地區從事大氣腐蝕試驗的眾多研究單位中以台灣電力公司最早，自 1971 年起先後於金山、鹽寮、七美風力發電廠址等地，進行 2 年期的金屬材料及塗料塗裝耐蝕性基本資料調查。金屬工業研究所(目前已併入工業技術研究院)在 1971 年左右亦曾在彰濱一帶從事塗裝耐蝕性暴露試驗調查。工業技術研究院工業材料研究所自 1983 年起與台電公司合作在林口、澎湖、陽明山、大屯山及其它多處地點，從事 1~5 年不等的金屬材料及塗裝系統之暴露試驗。臺灣大學自 1987 年起與台灣電力公司合作探討腐蝕因子與金屬腐蝕率之關係。中華電信研究所在 1984 年曾進行為期 2 年之暴露試驗，探討保安盒外殼中密度聚丁烯、及鍍鋅、鍍鋁、55% 鍍鋁鋅鋼絞線的耐久性及耐蝕性。中國鋼鐵公司約自 1990 年起配合鋼材開發需求，開始從事較有系統之鋼鐵材料大氣耐蝕性試驗。中山科學研究院於 1987~1990 年在臺北市各區利用 A.C.I、M.C.I、I.C.I 等 3 種腐蝕指標試驗裝置，廣泛調查臺北市各地大氣腐蝕類性變化。綜合言之，2000 年以前各單位從事現地大氣腐蝕暴露試驗的研究頗多，可惜無系統性的調查，數據多為定性或半定量且較無長期試驗數據，以致在試驗結果上整合困難，難以轉化成基本資料。

2001 年，工業技術研究院材料與化工研究所(以下簡稱工研院材化所)受內政部國土管理署委託執行「臺灣地區結構物腐蝕潛勢分區研擬」計畫，主要工作內容為協助規劃全國大氣腐蝕試驗(含試驗項目、試驗場址選擇等)，惟 1 年後因經費問題而未執行相關試驗工作。2004~2005 年，工研院材化所協助台灣高鐵公司進行高鐵沿線大氣腐蝕調查工作，評估熱浸鍍鋅鋼材與軌道碳鋼扣件之大氣腐蝕狀況並進行服務壽命計算；有別於現地大氣腐蝕暴露試驗，工研院材化所於計畫執行期間首次採用 ISO 9223^[1]環境因子分類方法，依據中央氣象署公佈之相對濕度資料、環境部公佈之 SO₂ 濃度與過去各單位調查研究之氯離子沉積速率，進行臺灣本島大氣腐蝕環境分類，並比較過去現地暴露試驗之結果。惟估算時使用之氣象與空氣污染資料僅止於 2000 年，且無 SO₂ 與

氣鹽沉積量之實際量測數據，因此，多數地區僅推估出一概括性的大氣腐蝕環境分類。

本所於 2007 年 3 月至 2008 年 10 月委託工研院材化所執行「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究」^[2-3]，針對臺灣全島地區進行大氣腐蝕劣化因子調查，並持續執行大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類研究^[4-15]迄今。目前，建置氣鹽沉積量調查 65 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 90 個試驗點，進行試驗取樣與分析工作。相關國內大氣腐蝕研究歷程，如表 1-1 所示。

表 1-1 臺灣地區大氣腐蝕試驗相關研究歷程

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
台灣電力公司	金屬材料耐蝕性基本資料調查(碳鋼、不銹鋼、鍍鋅鋼、鋁、鋁合金、銅、銅合金等)	金山 (核一廠)	1971.12-1974.7
		澎湖	1984.9-1985.8
		土城	1984.7-1986.6
		林口發電廠	1988.5-1990.4
	金屬塗裝耐蝕性調查(在碳鋼上塗裝鋅、鋁、銅、鋅/鋁、銅/鋅等不同塗料)	澎湖,陽明山,林口發電廠	1989.1-1990.12
工業技術研究院	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼上漆與不上漆)	林口發電廠	1983.7-1987.6
		澎湖	1984.7-1987.6
		金山- 汐止	1984.7-1985.6
	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼和耐候鋼上漆與不上漆)	臺西	1984.11-1987.6

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼、304 與 316 不銹鋼、銅、鋁、鋅，以及碳鋼上塗裝鋁、鋁/鋅(5/95))	陽明山	1986.7-1987.6
	金屬材料及塗裝系統暴露試驗(碳鋼、不鏽鋼、耐候鋼、鍍鋅鋼、鋁合金、銅合金等)	陽明山、頭城、樹林、新竹、臺中港、奮起湖、興達電廠、高雄、花蓮、澎湖	1987.7-1992.6
	金屬材料暴露試驗 (ISO 9226 規範之碳鋼、鋅、銅、鋁)	竹東、小港、佳洛水、麥寮、枋山、斗南、臺東、大武、新營、土城、以及 1987 至 1992 之測試地點	1992.7-1995.6
	依據 ISO 9223 環境因子分類方法，使用中央氣象署公佈之相對濕度資料、環保署公佈之 SO ₂ 濃度與過去各單位調查研究之氯離子沉積速率數據，進行臺灣本島大氣腐蝕環境分類		2004-2005
中華電信研究所	鍍鋅、鍍鋁、55% 鍍鋁鋅鋼絞線的耐久性耐蝕性	澎湖、基隆、北投、高雄、屏東、臺東	1984-1986
臺灣大學	金屬材料試驗(SS41、鍍鋅鋼、鍍鋅/鋁鋼、304 不鏽鋼、銅、953 銅合金、鋁、356 鋁合金)	蘇澳港、臺北市、頭城、宜蘭、高雄、臺中港、林口發電廠、興達電廠、通霄發電廠	1987.5-1990.1
成功大學	金屬材料試驗(SS440、耐候鋼、304 不鏽鋼、430 不鏽鋼、鍍鋅鋼、鍍鋅/鋁鋼、銅和銅合金)	臺南市、安平工業區	1998.4-2001.4
中國鋼鐵公司	鋼鐵材料大氣耐蝕性試驗(碳鋼、耐候鋼)	中山大學、中鋼、新竹	1990.8-present
	鋼鐵材料大氣耐蝕性試驗(碳鋼、耐候鋼、鍍鋅鋼)	中山大學、中鋼、新竹、樹林、林口電廠	1993.12-present
交通部運輸研究所與工業技術研究院合作辦理	臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(1/2) ^[2]	氯鹽沉積量調查 77 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 54 個試驗點，現地暴露試驗調查 88 個試驗點	2007.03-2007.10
	臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(2/2) ^[3]		2008.02-2008.10

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
交通部運輸研究所	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(1/4) ^[4]	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 51 個試驗點， 現地暴露試驗調查 87 個試驗點	2010.07- 2011.12
	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(2/4) ^[5]	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 51 個試驗點， 現地暴露試驗調查 87 個試驗點	2012.01- 2012.12
	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(3/4) ^[6]	氯鹽沉積量調查 60 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 49 個試驗點， 現地暴露試驗調查 87 個試驗點	2013.01- 2013.12
	大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(4/4) ^[7]	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 50 個試驗點， 現地暴露試驗調查 88 個試驗點	2014.01- 2014.12
交通部運輸研究所	金屬材料腐蝕環境調查研究 (1/2) ^[8]	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 50 個試驗點， 現地暴露試驗調查 88 個試驗點	2015.01- 2015.12
	金屬材料腐蝕環境調查研究 (2/2) ^[9]	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 50 個試驗點， 現地暴露試驗調查 90 個試驗點	2016.01- 2016.12
交通部運輸研究所	臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究 (1/4) ^[10]	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點， 現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2017.01- 2017.12
交通部運輸研究所	臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 ^[11] 水下金屬試驗暴露試驗第 1 年	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點， 現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2018.01- 2018.12
交通部運輸研究所	108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 ^[12] 水下金屬試驗暴露試驗第 2 年	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點， 二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點， 現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2019.01- 2019.12

研究單位	研究方向	測試地點	研究期間
交通部運輸研究所	109 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 ^[13]	氯鹽沉積量調查 61 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 57 個試驗點，現地暴露試驗調查 94 個試驗點	2020.01-2020.12
交通部運輸研究所	110 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 ^[14]	氯鹽沉積量調查 66 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 91 個試驗點	2021.01-2021.12
交通部運輸研究所	111 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與工業區關聯性研究 ^[15]	氯鹽沉積量調查 64 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 54 個試驗點，現地暴露試驗調查 89 個試驗點	2022.01-2022.12
交通部運輸研究所	112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究 ^[16] 水下金屬試驗暴露試驗第 5 年後	氯鹽沉積量調查 65 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 90 個試驗點	2023.01-2023.12
交通部運輸研究所	113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究	氯鹽沉積量調查 65 個試驗點，二氧化硫沉積量調查 55 個試驗點，現地暴露試驗調查 90 個試驗點	2024.01-2024.12

1.3.2 水下腐蝕研究概況

自 1986 年第 3 屆全國科技會議之決議，將腐蝕防蝕工程技術之研究列為國家重點科技，並整體規劃國內相關技術研究能力，以達到更有效處理國內所遭遇到之問題，因此本所運輸技術研究中心(改隸前為臺灣省政府交通處港灣技術研究所)與工業技術研究院工業材料研究所，中鋼公司及中華民國防蝕工程學會等單位，自 1986 年 7 月至 1991 年 6 月共同合作研究臺灣海域腐蝕特性防蝕設計材料選用及開發特性^[17]，各發揮所長共同尋求有效發展防蝕材料與方法。在海洋結構物與鋼筋混凝土材料於各海域腐蝕特性研究，陰極防蝕工程開發設計、防蝕塗料材料、表面被覆構件之腐蝕偵測技術及各種金屬，如碳鋼、不銹鋼、鋁合金等水下腐蝕速率比較，並邀請相關國內外學者專家來講述防蝕技

術及推廣教育工作並協調各施工單位，擬定長期合作計畫。另外自 1986 年 7 月至 1991 年 6 月，針對港灣 R.C 結構物之耐久性提供良好之設計與施工規範，提出港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究計畫^[25]，並對各港之 RC 結構物之腐蝕特性做一通盤性之瞭解^[19]，並提供防蝕良策以爲進行維修工作之參考，做爲日後建港之參考。於 1988 年展開澎湖跨海大橋腐蝕問題研究調查^[20]，剖析跨海大橋腐蝕原因，建立腐蝕調查及研究之邏輯，以澎湖跨海大橋中間段在改建路堤工程未完工前，原橋梁應作修補工作之建議並提供新建工程防蝕對策，提供國內交通橋梁及主要公共措施定期腐蝕調查與安全評估偵測之參考。

從早期的調查研究發現，各港口鋼板樁碼頭腐蝕狀況差異極大，因此於 1989 年 7 月至 1994 年 6 月進行港灣鋼結構物耐久性研究^[21-24]，了解港灣鋼結構物能在設計使用年限內安全發揮功能，建立定期檢查制度及優先考慮裝設適當之防蝕措施。通盤了解及建立現有各港口鋼結構物耐久性之完整資料，以利日後新建鋼結構或維修現有鋼結構物之規範。但由於海洋結構物修理較為困難，修理後常感效果不彰，經常需要再做重複之修理，浪費人力、物力，於 1992 年 7 月至 1993 年 6 月進行港灣鋼筋混凝土結構物修理系統評估研究^[25]，各大港口鋼筋混凝土結構物之現況做一調查，並對其修理方法進行通盤瞭解並檢討優劣點。在 1995 年 6 月至 1996 年 7 月港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究^[26]爲延續港灣鋼結構物之耐久性研究進行高雄港與基隆港之鋼板(管)樁腐蝕調查，探討水文及污損生物對陰極保護、防污塗料、混凝土、不銹鋼、裸鋼等材料腐蝕之影響。1996 年 6 月至 2001 年 7 月現有結構物安全評估及維護研究^[27-30]，調查基隆港、蘇澳港、高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類^[31-33]，並檢討其對港灣常用材料，如碳鋼及混凝土等之腐蝕及海生物附著影響，以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。計畫中建立 R.C. 結構物劣化非破壞性檢測技術、電化學維修技術工法、港區內水文與海生物附著對結構體(鋼構物)腐蝕之相互關係，並完成港灣結構物陰極防蝕準則草案之訂定(R.C. 結構物部份)，建立完善之維護制度，提供

各港務局使用，2000 年後持續進行之水下腐蝕研究計畫甚多，相關國內水下腐蝕試驗研究歷程，整理如表 1-2 所示。

表 1-2 臺灣地區水下腐蝕試驗相關研究歷程

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
臺灣省交通處港灣技術研究所、中國鋼鐵公司、工業技術研究所工材所合作辦理	臺灣海域之腐蝕特性、防蝕設計、材料之選用及開發研究 ^[17]	海洋結構物與鋼筋混凝土材料於各海域腐蝕特性研究，陰極防蝕工程開發設計、防蝕塗料材料、表面被覆構件之腐蝕偵測技術，及各種金屬如碳鋼、不銹鋼、鋁合金等水下腐蝕速率比較，並邀請相關國內外學者專家講述防蝕技術及推廣教育工作，並協調各施工單位，擬定長期合作計畫。	1986.07-1991.06
臺灣省政府交通處港灣技術研究所	基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究 ^[18]	由於碼頭鋼板樁經年累月浸泡在海水中，會受沖蝕、水溫、溶氧、PH 值、鹽度、海流速率、海生物、汙染、風、相對濕度等因素影響而腐蝕，使鋼材厚度變薄，若腐蝕速率超過設計規範(0.20mm/yr)，就會影響其碼頭之安全性。本研究基隆港務局委託本所調查東 2 號~東 4 號、東 6 號~東 8 號、及西 27 號碼頭鋼板樁現況並研提改善對策。	1990.03-1990.06

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所	澎湖跨海大橋腐蝕調查研究 ^[20]	1986 年中美聯合防蝕研討會會議結論，指出我國交通橋梁及主要公共設施應定期辦理腐蝕調查及安全性評估。會後行政院科技顧問組即指示進行初步調查研究。成果如下： 1. 充份瞭解澎湖跨海大橋腐蝕劣化現況及機理，做為新建工程設計及施工人員應注意防範事項，及使用者之維修參考，以提高施工技術及工程品質，減少因腐蝕所造成之損失。 2. 增進對鋼筋混凝土等營建材料耐久性之認知，俾提供國內各單位做更進一步相關研究之基礎與方向。 3. 使用之調查及研究方法，可做為偵測鋼筋混凝土腐蝕狀況之參考，以求事先加以防範，減少修護或重建之浪費。 4. 提供修補及防蝕對策，以延續橋梁之服務效能。	1987.01- 1987.12
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所	港灣鋼構造物耐久性研究 ^[21-24]	瞭解港灣鋼結構物能在設計使用年限內安全發揮功能，建立定期檢查制度及優先考慮裝設適當之防蝕措施。建立現有各港口鋼結構物耐久性之完整資料，以利日後新建鋼結構或維修現有鋼結構物之規範。	1989.07- 1994.06
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所	港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究 ^[25]	調查各大港口鋼筋混凝土結構物之現況，並對其修理方法進行通盤瞭解並檢討優劣點。	1986.07- 1991.06
臺灣省政府 交通處港灣 技術研究所 與海洋大學 合作辦理	港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究 ^[26]	延續港灣鋼結構物之耐久性研究進行高雄港與基隆港之鋼板(管)樁腐蝕調查，探討水文及污損生物對陰極保護、防污塗料、混凝土、不銹鋼、裸鋼等材料腐蝕之影響。	1995.06- 1996.07

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
交通部運輸研究所	現有結構物安全評估及維護研究 ^[27-30]	調查基隆港、蘇澳港、高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類，並檢討其對港灣常用材料如碳鋼及混凝土等之腐蝕及海生物附著影響以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。計畫中建立 R.C.結構物劣化非破壞性檢測技術、電化學維修技術工法、港區內水文、海生物附著對結構體(鋼構物)腐蝕之相互關係，並完成制定港灣結構物陰極防蝕準則草案之 R.C.結構物部份，建立完善之維護制度，提供各港務局使用。	1996.06-2001.07
臺灣省政府交通處港灣技術研究所	水文及污損生物對材料腐蝕之探討 ^[31]	1. 本研究在基隆港東 2、西 21、西 22、西 26、西 27 號碼頭現場擺放試架觀察海生物種類，探討材料(AISI 1015 碳鋼、AISI 304 不銹鋼，防止海生物附著油漆塗料，犧牲陽極)，水深(低潮位線上 1 公尺及低潮位線下 1.0,3.0,5.0 公尺)與水文及污損生物之關係。 2. 經過 3 及 6 個月之現場浸漬後，發現(1)犧牲陽極及防污塗料均能使鋼料防蝕，裸鋼之腐蝕速率則因水深而異，不銹鋼易因海生物附著而產生孔蝕，且易在海水中造成間隙腐蝕；(2) 海生物種類因不同碼頭而異；(3)西 21、22、26、27 號碼頭，第二次附著生物採樣所採獲種類，均較第一次採樣之種類多；(4) 東 2 碼頭的兩次附著生物採樣，採獲種類與優勢種則沒有明顯的變化；(5) 防污塗料之試片上，附著生物之種類與數量都遠多於其他材料試片；且優勢種都為線蟲與苔蘚蟲；(6) 陰極防蝕、不銹鋼、混凝土與裸鋼等四種試片之附著生物種類皆無明顯不同；(7) 4 種深度的附著生物種類與數量也有所不同，以中間兩層深度之種類與數量較多。	1994.07-1995.06

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
交通部運輸研究所與中山大學合作辦理	高雄港工結構材料海生物附著與對策研究 ^[32] 高雄港港工結構腐蝕與海生物附著研究 ^[33]	調查高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類，並檢討其對港灣常用材料，如碳鋼及混凝土等之腐蝕及附著影響，以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。	1997.01-1999.12
交通部運輸研究所	碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究 ^[34]	進行基隆、花蓮、臺中、高雄、蘇澳等五大港口之碼頭鋼板(管)樁調查，藉由對碼頭鋼板(管)樁腐蝕現況之長期監測，得以提供相關之本土資訊，做為設計及維護參考，並整理歸納影響鋼板(管)樁腐蝕之因子探討適用於本島碼頭鋼板(管)樁腐蝕防治方法。	2001.01-2001.12
交通部運輸研究所	金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2) ^[8] 金屬材料水下腐蝕調查研究(2/2) ^[9]	建立臺灣地區長期金屬材料水下腐蝕資料庫，以做為新建及既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之應用參考，安裝水下金屬暴露試驗架於基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門尖山港等國內商港，藉此瞭解在不同環境、金屬材料、海洋生物附著、海水水質等對港區金屬材料腐蝕之影響。	2015.01-2016.12
交通部運輸研究所	臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究(1/4) ^[10] 臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 ^[11]	進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架試片第 1 年取樣作業及水質化學試驗相關分析。	2017.01-2018.12
交通部運輸研究所	108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究 ^[12]	進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架試片第 2 年取樣作業及水質化學試驗相關分析。	2019.01-2019.12

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
交通部運輸研究所	112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究 ^[16]	進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架試片第 5 年取樣作業及水質化學試驗相關分析。	2023.01-2023.12

1.4 計畫工作項目

本計畫係延續型計畫，主要持續辦理大氣腐蝕與水下腐蝕的現地調查及試驗工作，彙整調查與研究成果，建置臺灣腐蝕環境分類資訊系統及發行大氣腐蝕資料年報，此外，今年並探討鋅金屬腐蝕與大氣腐蝕因子之關聯性。本年度辦理之工作項目如下：

1. 持續辦理大氣腐蝕劣化因子調查及金屬材料現地暴露試驗

依據中華民國國家標準(CNS)，就金屬及合金之大氣腐蝕性污染測定方法，進行臺灣全島之大氣腐蝕劣化因子調查及金屬材料現地暴露試驗與腐蝕速率量測。

2024 年 1 月辦理前(2023)年全年與第 4 季的金屬酸洗試驗及腐蝕因子化學分析工作，並於 2~3 月、5~6 月及 8~9 月進行今年第 1、2、3 季的大氣腐蝕劣化因子調查與金屬材料現地暴露試驗之取樣與維護工作，接續於 4 月、7 月及 10 月進行今年第 1、2、3 季的金屬酸洗試驗及腐蝕因子化學分析工作，並於 11~12 月辦理今年第 4 季的大氣腐蝕劣化因子調查，以及今年第 4 季與全年的金屬材料現地暴露試驗之取樣與維護工作。

2. 持續辦理水下金屬材料現地暴露試驗與海水水質調查分析

在水下金屬材料現地暴露試驗方面：本所自 2015 年起，針對港工結構材金屬材料進行 10 年期暴露試驗，於基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下進行金屬暴露試驗。

研究規劃辦理 5 次水下試片取樣，暴露時間分別為第 1 年、2 年後、5 年後、8 年後、10 年後，至今已完成前 3 次水下試片取樣、分析工作。第 1 年的取樣成果彙整在「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」^[11]報告；2 年後的取樣成果彙整在「108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」^[12]報告；在前 2 年(2022-2023 年)完成全臺及外島的 5 年後水下金屬試片現地取樣及化學試驗分析工作，成果彙整在「112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究」^[16]報告；後續預計在明(2025)年辦理全臺及外島的 8 年後水下金屬試片現地取樣及化學試驗分析工作。

在海水水質調查分析方面：持續每季於基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等商港碼頭進行海水導電度、溶氧量、酸鹼度、溫度、氯鹽、硫酸鹽等水質環境因子項目之現場調查與試驗分析工作，海水水質調查分析成果將與下一次的水下試片取樣成果一併呈現。

3. 持續擴增精進「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」資料庫

彙整各試驗站現地調查結果，進行大氣腐蝕環境分類，建置於資料庫網站提供外界查詢。

在 2023 年 6 月擴增石門十八王公橋試驗站，該試驗站位處臺灣最北端的濱海高鹽份環境，且在秋、冬季直接面對強烈東北季風吹拂，在此設站蒐集腐蝕數據，可分析在此特殊環境條件下環境因子對金屬腐蝕速率之影響，有助於強化腐蝕環境分類與研究應用的重要性。

4. 發行 2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查年報

彙整並撰寫 2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查年報，提供相關單位瞭解每年金屬構造物在各腐蝕環境中的耐久性與防蝕之需求。

5. 辦理大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會

與中華民國防蝕工程學會合辦「大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會」，以推廣宣導臺灣腐蝕環境調查資訊系統至產官學研各界應用。並透過研習會與防蝕學者專家互動，蒐集專家與業界代表的建議，納入未來研究應用方向，提升研究實用性。

6. 進行鋅金屬與腐蝕因子關聯性統計分析

彙整臺灣鋅金屬材料與腐蝕劣化因子及氣象因素等環境因子進行關聯性統計分析，提供工程人員管理、規劃、設計及維護之參考。

第二章 文獻回顧

2.1 大氣腐蝕測試規範

2.1.1 國外 ISO 大氣腐蝕環境分類

大氣腐蝕測試工作有系統之進行，最早可溯及美國材料和試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)的 D-1 及 A-1 兩委員會自 1906 年起分別測試塗料塗裝及金屬被覆之鋼鐵產品，自此開始美國便陸續展開數個二十年計畫分別測試當時最新產品的大氣腐蝕耐蝕性及耐久性。國際標準組織(ISO)於 1985 年起於全球 13 國 47 處地點進行大氣腐蝕暴露試驗，根據這試驗工作成果，於 1992 年發佈 ISO 9223^[1] (大氣腐蝕性分類)、ISO 9224^[35] (各腐蝕環境中腐蝕率指引值)、ISO 9225^[36] (污染量量測方法)、及 ISO 9226^[37] (標準試片腐蝕率量測方法)四項標準規範。根據這四項規範，只要在欲工作地點從事一年期之標準試片腐蝕率量測，或潤濕時間量測及總污染量量測，根據量測結果對照各層級之腐蝕率指標值，即可得到該處的腐蝕環境分類。

換句話說，ISO 9223 大氣腐蝕性分類標準是根據金屬標準試片在某環境中進行自然暴露試驗所得之腐蝕速率，或綜合某環境中大氣污染物濃度和金屬表面潤濕時間而進行分類。其中，潤濕時間(τ , Time of Wetness)是以全年中溫度高於 0 °C，相對濕度大於 80%之小時數或百分比來區分，環境中大氣污染物濃度的嚴重性則是以 SO₂ 沉積速率與氯化物(海鹽)沉積速率分別進行區分。之後，將環境之腐蝕性依污染量或最初第一年之腐蝕率大小，分為 C1, C2, C3, C4 與 C5 五個等級，C1 表示腐蝕性非常低(very low)，C2 表示腐蝕性低(low)，C3 表示腐蝕性中等(media)，C4 表示腐蝕性高(high)，C5 表示腐蝕性非常高(very high)。整體流程如圖 2.1 所示。

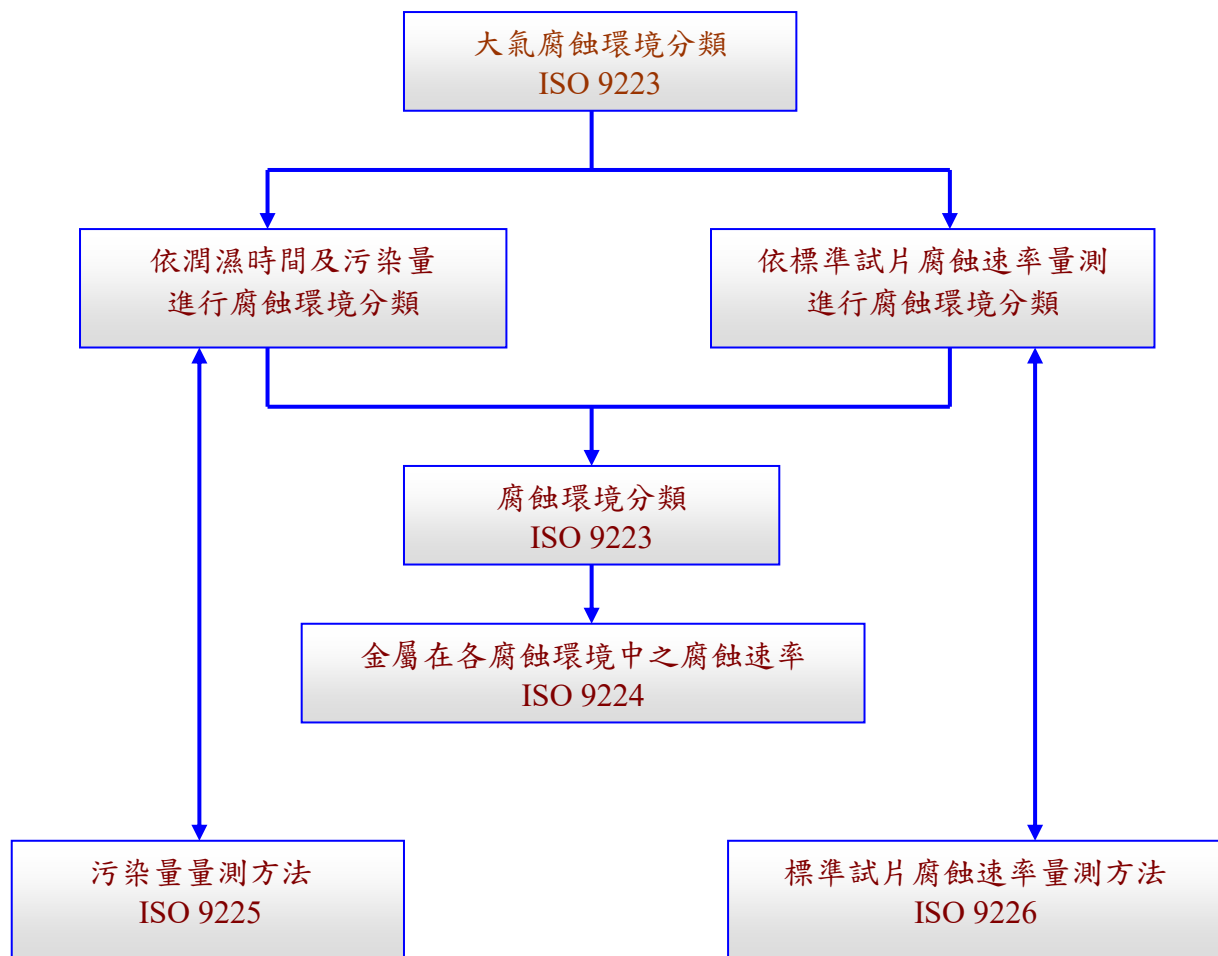


圖 2.1 ISO 大氣腐蝕環境分類^[1,35-37]

但國外學者對熱帶潮濕氣候區（加勒比海地區的古巴、墨西哥、委內瑞拉等）的大氣腐蝕性進行了評估，發現濱海的大氣腐蝕性高於 ISO 標準的 C5 等級^[38-39]。Morales 等人的研究表明在加那利群島西部的一些島嶼上碳鋼、銅和鋅的腐蝕速率超過了 ISO 9223^[1]標準中規定的 C5 等級^[40-41]。因此，國際標準組織(ISO)於2012年發佈的第2版 ISO 9223^[42]（以下以 ISO 9223-2012 表示 2012 年出版的 ISO 9223，以 ISO 9223-1992 表示 1992 年出版的 ISO 9223，並以同樣方式表示 ISO 9224-9226 的版本），將大氣腐蝕性分為 6 類，在前 5 類的基礎上增加了一級 CX：應用於特定海洋和海洋/工業環境。具體的大氣腐蝕性分級對比以及典型環境示例，如表 2-1 所示。

表 2-1 大氣腐蝕性分級對比^[43]

ISO 9223-1992		ISO 9223-2012			
腐蝕性 等級	腐蝕性	腐蝕性 等級	腐蝕性	典型環境示例	
				室內	室外
C1	很低	C1	很低	乾燥清潔的室內場地，如辦公室、學校、博物館。	乾旱寒冷地區、極低的污染和潤濕時間的大氣環境，如特定的沙漠、北極、南極。
C2	低	C2	低	低頻凝結、低污染的常溫室內場地，如倉庫、體育場。	溫帶、低污染物濃度（ $\text{SO}_2 \leq 5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的大氣環境，如鄉村、小鎮。乾旱寒冷地區、潤濕時間短的大氣環境，如沙漠、亞北極區。
C3	中	C3	中	產品生產過程中產生中頻凝結和中度污染的場地，如食品加工廠、洗衣房、啤酒廠、乳製品廠。	溫帶、中等污染物濃度（ $5\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2 \leq 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）或低鹽度的大氣環境，如城市、低鹽度海濱地區。亞熱帶和熱帶地區、低污染的大氣環境。
C4	高	C4	高	產品生產過程中產生高頻凝結和重度污染的場地，如工業加工廠、游泳池。	溫帶、高污染物濃度（ $30\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2 \leq 90\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）或高鹽度的大氣環境，如污染較重的城市、工業區、中等鹽度海濱地區或暴露於除冰鹽的區域。亞熱帶和熱帶地區、中度污染的大氣環境。
C5	很高	C5	很高	產品生產過程中產生極高頻凝結和重度污染的場地，如礦井、工業洞穴、亞熱帶和熱帶地區不通風工作間。	溫帶和亞熱帶、極高污染物濃度（ $90\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2 \leq 250\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）或極高鹽度的大氣環境，如工業區、海濱地區、沿海遮蔽處。
		CX	極端	產品生產過程中產生持續凝結或長期暴露於高濕環境和重度污染的場地，如濕熱帶地區室外有污染物進入的不通風工作間。	亞熱帶和熱帶（非常高的潤濕時間）、極高污染物濃度（ $250\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{SO}_2$ ）和極高鹽度的大氣環境，如極端工業區、海濱和近海地區、偶爾接觸鹽霧。

2.1.2 國外 CLIMATE TEST 大氣腐蝕環境分類

依據 ISO 9226-1992^[37]量測大氣腐蝕速率有兩種方式，板狀試片與螺旋狀金屬試片，板狀試片是傳統的量測方式，而螺旋狀試片 - CLIMATE TEST 則是源自貝爾實驗室(原名為 "Wire-on Bolt Test")，其目的為用以研究偶合金屬在戶外環境的腐蝕行為，ASTM G116-93^[47]規範為標準測試方式。CLIMATE 是取 Classify Industrial and Marine Atmospheres 的字首，而其測試試片是由兩種不同金屬(Bi-metallic)所組成，即將細金屬線纏繞在螺桿上產生腐蝕電池，並暴露在大氣環境中約 3-6 個月後，再以細金屬線的重量損失率來評估當地的大氣腐蝕行為。通常金屬線是使用鋁線(AA-1050)纏繞在螺桿上，或者纏繞成螺旋狀，製作規格是螺旋狀直徑為 2.5cm、鋁線直徑 0.89mm、長度約 90cm、螺桿長度 10cm、直徑 1.27cm、螺牙規格 1/2 UNC。測試裝置由左至右依序為 Al-Plastic、Al-Coil、Al-Cu、Al-Fe 等四個不同組合單元所組成，並且均固定在一方形塑膠板上，如圖 2.2 所示。Al 線繞在塑膠螺桿(Al-Plastic)及 Al 線纏繞成螺旋狀(Al-Coil)兩者皆定義為 Al 線在大氣環境的腐蝕指標(A.C.I.)。由於鋁線與銅桿在工業性大氣腐蝕環境中有較高的靈敏度，因此，取 Al-Cu 組合為工業性環境腐蝕指標，簡稱(I.C.I.) (Industrial Corrosivity Indices)。在海洋性大氣腐蝕環境中則以鋁線繞在鐵桿的靈敏度較高，取 Al-Fe 組合做為海洋性環境腐蝕指標簡稱(M.C.I.) (Marine Corrosivity Indices)，另外；再依據腐蝕指標的高低，將大氣環境區分為腐蝕性"可忽略(Negligible)"，"輕微(Moderate)"，"輕微嚴重(Moderate Severe)"，"嚴重(Severe)"，與"較嚴重(Very Severe)"等五級。

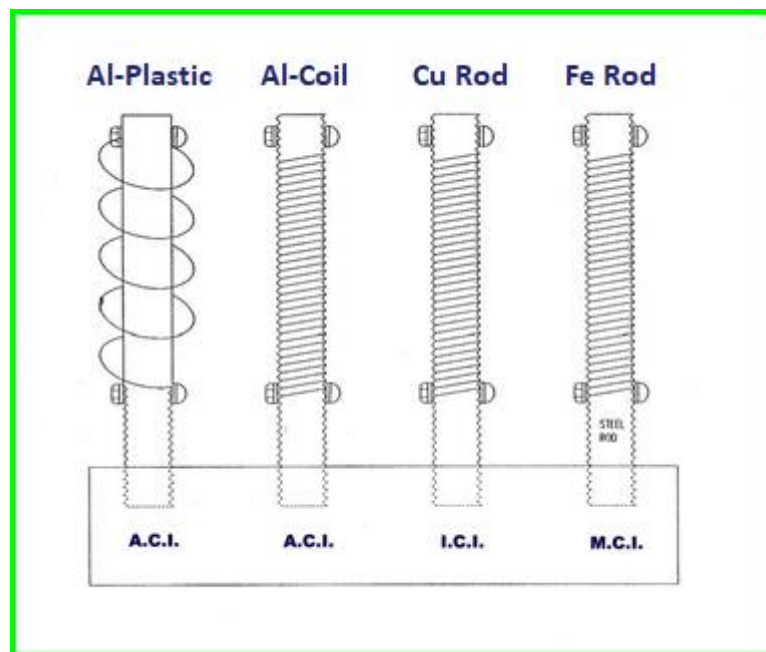


圖 2.2 CLIMATE TEST 大氣腐蝕測試^[47]

2.1.3 中華民國國家標準 CNS 規範

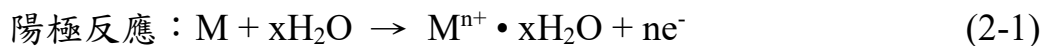
我國有鑑於大氣腐蝕測試的重要，經濟部標準檢驗局於民國 83 年起依據國際標準組織規範，制定一系列之「金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性」國家標準 CNS 規範，包括 CNS13401^[49] (對應 ISO 9223 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-分級、測定與評估，CNS16238^[74] (對應 ISO 9224 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-腐蝕性級別的指引值，CNS13754^[51] (對應 ISO 9225 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)，CNS13753^[50] (對應 ISO 9226 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(測定標準試片之腐蝕速率以評估腐蝕性)，CNS14122^[52] (對應 ISO 8407^[75] 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法，CNS14123^[53] (對應 ISO 8565^[48] 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕測試(現場測試之一般要求)等 6 項規範。

其中針對大氣腐蝕劣化因子所須的環境資料，於 CNS14123 中規定，須具備氣溫(°C)、相對濕度(%)、降雨量(mm/day)、日照幅射的時間及強度、二氧化硫沉積量(CNS 13754, $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ or $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、與只適用

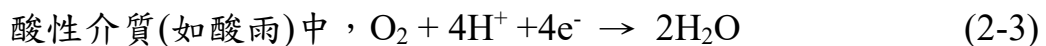
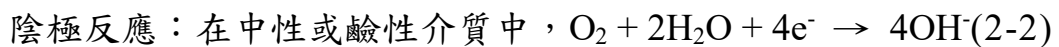
於海邊測試場地之氯鹽沉積速率(CNS 13754, mg/m²/day)等參數；其他因素，如降雨時間、濕潤時間、風速及風向、雨水 pH 值、氣體量及特殊的污染物等，皆可依測試條件的要求而加以蒐集量測。

2.2 大氣腐蝕因子介紹

大氣腐蝕依腐蝕反應可分為化學與電化學反應。在乾燥無水的大氣環境中，金屬表面因氧化、硫化而造成變色或失去金屬光澤等，是為化學腐蝕，而其它劣化行為，則多為電化學反應。即金屬表面為薄層電解液下的腐蝕過程，電解液薄膜是由空氣中的水分於金屬表面吸附、凝聚、及溶有空氣中污染物質所形成，陽極反應為金屬的溶解和水化反應，陰極反應為氧的還原反應，其反應過程如下：



式中，M 代表金屬，Mⁿ⁺ 為 n 價金屬離子，Mⁿ⁺·xH₂O 為金屬離子化水合物。



由於水、氧在水膜間的擴散率、大氣中的氯離子含量、以及空氣中的污染物質如 SO₂、灰塵等，均會影響金屬在大氣中的腐蝕速率，這些腐蝕因子在金屬大氣腐蝕過程中所扮演的角色如下^[54]：

1. 水

水是引起大氣腐蝕最重要的因素。經驗顯示，唯有當大氣的相對濕度高於某一臨界值時，大氣腐蝕才會發生；因此大氣腐蝕也是一種電化學腐蝕，在特別乾燥地區，大氣腐蝕幾乎不會發生，但在熱帶潮濕地區，腐蝕速率相對較高。大氣腐蝕中，水是以液狀薄膜附著於金屬表面，水固化成冰時，大氣腐蝕便停止。由於雨水、霧氣等是液膜的主要來源，但雨水扮演的角色較複雜，它可能會帶來高溶解度物質而加速腐蝕速率，但也可能沖走一些附著的腐蝕性物質而抑制腐蝕；同時，它亦可能沖走一些具有保護作用的腐蝕生成物，進而加速腐

蝕。由霧氣所生成的液膜雖薄，但因氧氣及其他腐蝕性物質的飽和性，反而具有較強的腐蝕性。

2. 氧

當金屬發生大氣腐蝕時，表面液膜很薄，氧氣容易到達陰極表面，且氧的平衡電位較氫為正，所以，金屬在有氧存在的溶液中，首先發生的反應為氧的還原反應。此外，在大氣腐蝕的條件下，氧通過液膜到達金屬表面的速度很快，所以液膜愈薄，擴散速度愈快，陰極氧的還原反應將促使陽極反應繼續進行；但當液膜未形成時，氧的陰極還原反應將無法進行。

3. 氯離子

氯化物在金屬表面上有助於在較低的相對濕度形成液膜，其在腐蝕過程中會阻止氧化膜(oxide films)的形成，進而有助於陰極上氧的還原反應；然而當金屬表面已有氧化膜或鈍態膜存在時，氯離子會破壞鈍態膜，造成孔蝕。Cl⁻與鐵的作用較特別，由於 FeCl₂ 不是緊密結合之化合物，所以 Cl⁻很容易從氯化亞鐵中釋放出來，再與其他金屬作用，進而加速腐蝕反應。過程如下：

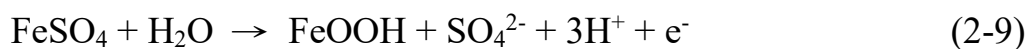


4. 空氣中的污染物質 SO₂

SO₂ 在水溶液中具有極高的溶解度(16.2g SO₂/100g H₂O)，且 SO₂ 與 O₂ 作用形成 SO₄²⁻再和鐵循環作用，將會加速腐蝕反應。Odneval 等人指出^[55]，在固定電極電位時，陽極溶解電流是[OH⁻]與[SO₄²⁻]的共同函數，在含 SO₂ 的大氣中，腐蝕反應步驟如下：



由於 FeSO_4 會與 H_2O 作用生成 FeOOH ，而釋放出來的 SO_4^{2-} 則再次與 FeOH 作用：



因而加速腐蝕反應。

5. 灰塵

不同地區的灰塵有不同的成份，在鄉村地區通常是來自地表的有機或無機物質，而在都市或工業地區則含有高濃度的工業污染物質及水溶性無機物質，如 SO_2 ， NO_2 等。灰塵將有助於液膜在較低相對濕度下於金屬表面生成。

2.3 影響大氣腐蝕的因子

1. 大氣的相對濕度

大氣腐蝕是一種水膜下的電化學反應，空氣中水分在金屬表面凝聚生成水膜，與空氣中氧氣通過水膜進入金屬表面，是產生大氣腐蝕的基本條件。水膜的形成與大氣中的相對濕度密切相關，相對濕度的定義是指在某一溫度下，空氣中的水蒸氣含量與在該溫度下空氣中所能容納的水蒸氣最大含量之比值。由於不同物質或同一物質的不同表面狀態，對於大氣中水分的吸附能力不同，因此，當空氣中相對濕度到達某一臨界值時，水分將在金屬表面形成水膜，促使電化學反應產生、腐蝕速率增加，此時的相對濕度值稱為金屬腐蝕臨界相對濕度，如鐵的腐蝕臨界相對濕度為 65%^[56]。此外，空氣中相對濕度還影響金屬表面水膜厚度與乾濕交替的頻率；如金屬表面有較薄的水膜存在時，大氣中的氧容易擴散至金屬表面，加速腐蝕；當水膜變厚時，氧的擴散阻力增加，腐蝕速率下降。

2. 表面潤濕時間

依國際標準 ISO 9223 的定義，表面潤濕時間是指產生大氣腐蝕的電解質膜，以吸附或液態膜型式覆蓋在金屬表面上的時間；潤濕時

間愈長，腐蝕總量愈大。而金屬表面的潤濕，則是由露水、雨水、高濕度水分凝聚、甚至溶化的雪水所引起。

3. 日照時間

日照的紫外光會促使高分子材料及塗層老化，因此，日照時間對於高分子材料及塗層，關係較為密切；但對金屬材料而言，日照時間長，將使金屬表面水膜消失，降低表面潤濕時間，腐蝕總量減少。

4. 氣溫

溫度的變化能影響金屬表面水蒸氣的凝聚、水膜中各腐蝕氣體和鹽類的溶解度、水膜電阻、以及腐蝕過程中陰、陽極的反應速度。一般而言，當相對濕度低於金屬臨界相對濕度時，溫度對大氣腐蝕的影響很小，即無論氣溫多高，因環境乾燥，金屬腐蝕輕微；但當相對濕度達到金屬臨界相對濕度時，溫度每升高 10°C ，反應速率增加為原來之 2 倍。

5. 降雨

降雨對大氣腐蝕有兩種影響，一方面因降雨增加，大氣中的相對濕度增加，延長了金屬表面的潤濕時間，同時也因降雨的沖刷，破壞了金屬表面腐蝕產物的保護性，加速大氣腐蝕；但另一方面，因降雨沖洗掉金屬表面的污染物與灰塵，減少了液膜的腐蝕性，減緩大氣腐蝕。此外，工業大氣中的雨水溶解了空氣中的污染物，如 SO_2 、 Cl 等，亦加速大氣腐蝕的產生。

6. 風速與風向

風速對表面液膜的乾濕交替頻率有一定的影響，在風沙環境中，風速過大對金屬表面會有磨耗作用。而在污染源的環境中（如工廠的排煙、海邊的鹽粒子），風向會影響污染物的傳播，直接關係到大氣腐蝕速率。

7. 降塵

固體塵粒對腐蝕的影響可分為 3 類：(1) 塵粒本身具有可溶性與

腐蝕性，當溶解於液膜中時，成為腐蝕性介質，(2)塵粒本身無腐蝕性，亦不溶解(如碳粒)，但它能吸附腐蝕物質，當溶解於液膜中時，加速腐蝕反應，(3) 塵粒本身無腐蝕性與吸附性(如沙粒)，但落在金屬表面，可能使沙粒與金屬表面間形成縫隙，易於水分凝聚，產生局部腐蝕。

2.4 鋼材在海水之腐蝕

金屬發生腐蝕為一自然的反應程序，大多數的金屬材料暴露於宇宙大氣環境下，都會自然發生物質退化，逐漸被腐蝕的現象，尤其是在酸、鹼或海水等環境下，腐蝕更趨嚴重。腐蝕是電化學反應之行為，其間涉及電子的轉移，如金屬由原子狀態因放出電子而變成金屬離子，或金屬離子因獲得電子而成為金屬，因而構成氧化(陽極)及還原(陰極)反應之發生。因此，任何腐蝕的發生，必須具有陽極反應和陰極反應以及能使電子或離子流動轉移之導電途徑(亦即電解質)，形成一封閉的導電迴路，如圖 2.3 所示。

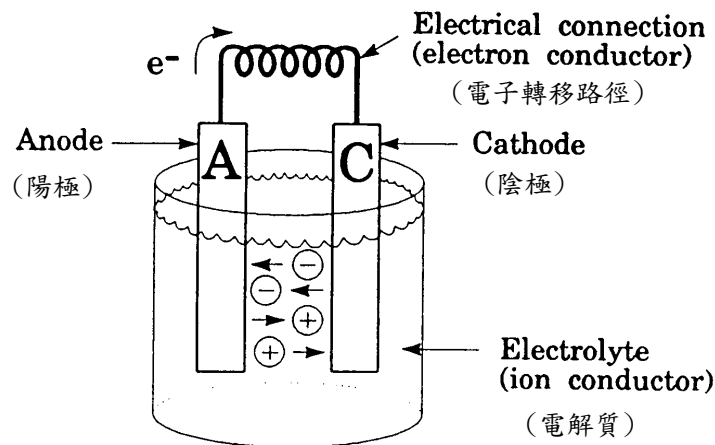
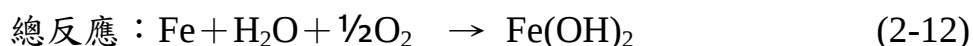
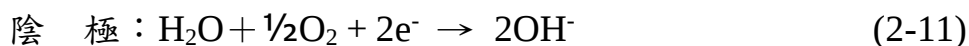


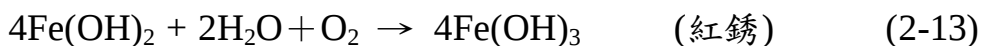
圖 2.3 水溶液系統之腐蝕程序示意圖^[57]

海水中之鋼材如鋼板樁之表面，因同時具有許多高活性區域(陽極反應)與鈍化區域(陰極反應)所形成之許多小腐蝕電池(corrosion cell)系

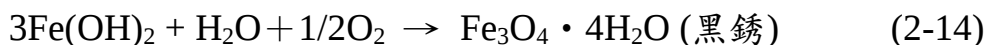
統，導致鋼材發生表面腐蝕現象。鋼材在海水中發生腐蝕之電化學反應程序如下：



總反應式中之 Fe(OH)_2 繼續反應，生成 Fe(OH)_3 或 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 產物，其化學反應式如下：



或



2.5 影響鋼板樁腐蝕之因子

2.5.1 暴露區域

從許多調查研究發現，由於彼此接觸(暴露)環境不同，海洋結構物腐蝕的部位及速率有很明顯的差異，其腐蝕形態不同。因此，為方便區分與探討，特將海洋環境區分成五個暴露區域，各區域與腐蝕速率之關係如圖 2.4 所示。

1. 大氣帶

這部份之鋼結構物不接觸海水，表面完全暴露接觸大氣中之各種介質，諸如氣體、日照……等大自然介質，由於海洋大氣中含有較高濃度之海鹽粒子，加上濕度大、日照、溫度之變化，致使碳鋼材料外表很容易受到侵蝕，其腐蝕速率為一般內陸地區大氣腐蝕的 2~5 倍^[58]。

2. 飛沫帶

自平均高潮位以上至海面大氣帶下端，屬於海洋大氣與海水交界面，鋼板樁暴露於此範圍內時，由於不斷反覆地受到海浪的潑濺以及日曬乾燥，產生乾濕循環作用，致使附著鋼材表面之鹽份及氧氣濃度不斷增濃，腐蝕最為嚴重，腐蝕速率很大，為五個暴露區域中，腐蝕最嚴重的部位。一般低碳鋼如沒有任何防蝕處理時，其腐蝕速率可達 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm/yr}$ ，約為海中帶（海水全浸區）的 $5 \sim 10$ 倍^[58]。

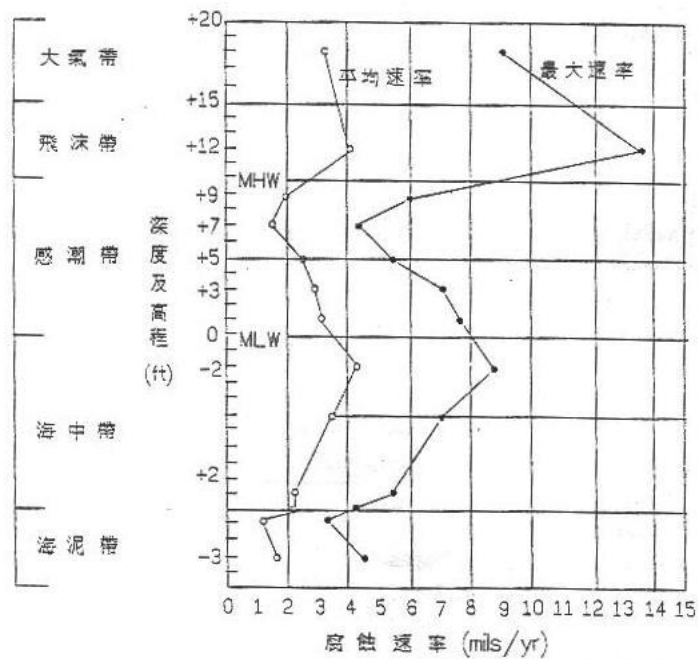


圖 2.4 鋼板樁暴露區域與腐蝕速率之關係^[58]

3. 感潮(潮汐)帶

此區域介於高低潮位之間，由於受到海水漲退潮之變化，鋼板樁表面週期性的接觸海水浸泡及暴露於大氣中，猶如進行乾濕循環作用。由於空氣與海水波浪之交互作用，致使海水中之溶氧濃度高，因而在感潮帶下方緊鄰海中帶之部份，恰可形成一個氧濃度差異電池作用之現象。因此，溶氧量高之感潮帶中之鋼板，可視為一陰極反應面積，腐蝕速率低，而低潮位下約 1 公尺處(亦即海中帶部份)，因溶氧量低，故可將海中帶內之鋼板當成陽極反應部位，因此腐蝕量較大。

由於受到氧濃度差異電池作用，感潮帶中之腐蝕速率為 5 個暴露區域中最低者。

4. 海中帶

自低潮位下端至海泥(床)帶間，在此範圍內整個結構體完全浸泡於海水中。此區域之上端邊緣與最低潮位緊鄰的部位，因氧濃度差異電池之作用，暴露於海中帶之鋼板可視為一陽極反應區域，因此，海中帶上端部位之鋼板腐蝕速率很大，極需採用適當的防蝕保護措施。在此區域中，海生物之附著、海流之沖擊、水溫及溶氧量等因素，亦會影響腐蝕速率。海水中鋼鐵之腐蝕速率一般為 $0.1\sim 0.2\text{mm/yr}$.^[58]。

5. 海泥(床)帶

鋼板(管)樁埋入於海底土層之部份，由於與海水接觸面較小，鋼材之腐蝕速率相對很小。但是在污染的海域中，如有硫化氫(H_2S)或海泥中有硫酸鹽還原菌存在的話，則鋼材的腐蝕性會增加，腐蝕速率變大。

2.5.2 海水的性質

海水是一個極複雜的水溶液，為大自然環境下一個包容性非常大的緩衝溶液，碼頭鋼板(管)樁絕大部份(約 80%)都浸泡於海水溶液下，其間金屬材料發生腐蝕之變化很大，因此，有關海水之化性、物性及相關影響因素都必須深入探討之。

1. 含鹽量

海水與其它水溶液最大的不同點，即海水含有很高的鹽份(以氯離子濃度或鹽度表示之)，亦是鋼鐵材料最易發生電化學腐蝕反應之環境。在廣闊的大海中，海水中大約含有 3.5%(重量百分比)之氯化鈉(NaCl)或鹽度(Salinity)約介於 32~36 之間。在封閉的海灣水域，由於蒸發作用致使海水鹽度較高，例如：紅海其鹽度約為 41，而在有河川流入之海口附近，因受陸地淡水溪流之稀釋，則鹽度較低。

海水中之 Cl^- 能穿透破壞鋼鐵表面之鈍化性質或阻止鈍態保護膜之生成，因而使鋼鐵表面發生腐蝕。據美國海軍研究人員在太平洋海域所做試驗發現^[57]，海水含鹽量之多寡與溶氧量、pH 值、溫度、水深等均有相互關係，如圖 2.5 所示。

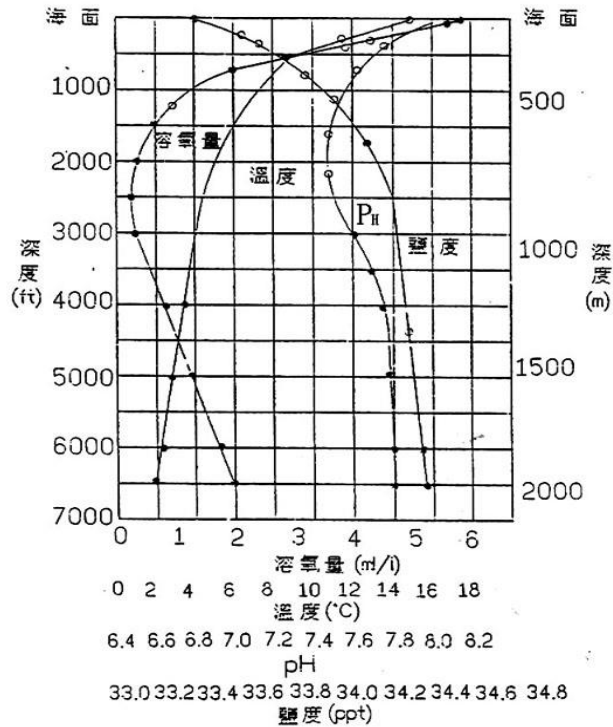


圖 2.5 海水含鹽量與溶氧量、pH 值、溫度、水深之關係^[57]

2. 溫度

海水之表面溫度，通常受到地球上緯度之影響而有所變化。其變化範圍從極地 -2°C 至赤道 35°C 之間。溫度之變化，對海水之化性、物性及海洋（微）生物滋長等都有相當密切關係。因此，從金屬材料腐蝕反應觀點下，海水溫度之變化就變成一個極複雜的變數。一般而言，溫度是影響動力學上之反應速率及質量傳送。在動力學理論控制下，溫度每上昇 10°C ，腐蝕速率則增加一倍。當海水溫度升高時，致使鋼材變成為較不貴重電位之金屬，此時鋼材之腐蝕電位開始移向電位更負之方向，亦即鋼材更容易進行腐蝕反應。港灣結構物等開放系統，隨溫度上升，鋼鐵之腐蝕速率變大，而如海水管線等密閉系統，雖然沒有溶氧量減少之發生，腐蝕速率仍隨溫度之上升而遞增。

3. pH 值

海水通常為一含鹼性之水溶液，海水之 pH 值是表示海水中多種基本離子與大氣層中之二氧化碳(CO_2)進入海水之量，達成平衡狀況之數值。一般海水之 pH 值正常情況下是介於 8.1 至 8.3 之間。但在停滯不流動之港灣海域中或是海水中之有機物體分解，一方面消耗海水中之溶氧量，一方面受到厭氧細菌作用產生大量之 H_2S 下，亦可能使海水變成較酸性，海水之 pH 值降低至 7.0 以下。但在較接近海水表面之部位，當海水中之植物進行光合作用時，將會消耗海水中之 CO_2 量，此時海水之 pH 值可能增高而超過 9.0 以上。又 pH 值之變化隨著海水之深度、溫度、溶氧量…等因素之不同而異，如圖 2.6 所示^[58]。

一般金屬材料在水溶液之腐蝕反應速率與 pH 值有密切關係^[59]，但是當 pH 值介於 4~10 之間時，金屬維持一定腐蝕速率如圖 2.6 所示，而僅與氧氣擴散至金屬表面之速率有關。

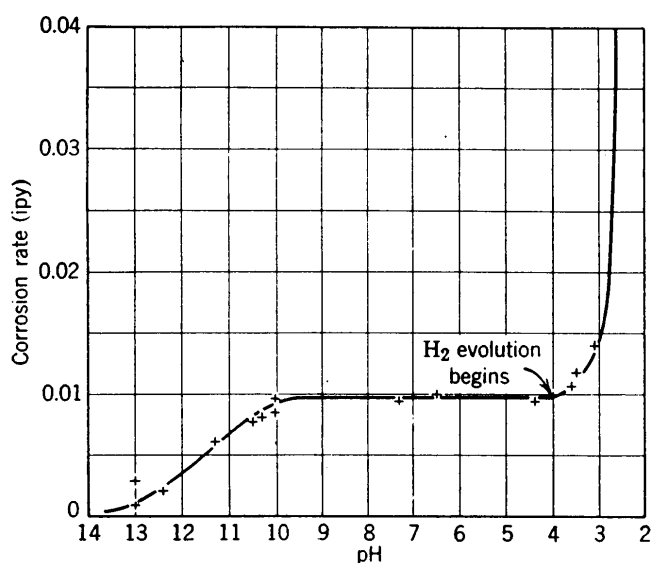


圖 2.6 鋼材腐蝕速率與 pH 值之關係^[59]

通常鋼材在海水中極易發生腐蝕，金屬表面生成一層阻礙氧氣擴散之 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 膜，隨著腐蝕之進行，此膜不斷的更新滋長，並與鹼性海水接觸，因此，鋼鐵表面之 pH 值約為 9.5。當海水 pH 值低於 4

時，鋼材表面之 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 鈍態保護膜被溶解，鋼鐵表面之 pH 值降低。鋼材之次表面層不斷地析出且更能直接與海水接觸，腐蝕速率增大約等於氫氣生成與氧氣去極化作用所產生之腐蝕速率。而 pH 值大於 10 時，增加環境之鹼性，亦增加鋼鐵表面之 pH 值，因此鋼鐵表面之鈍態保護膜不易溶解，腐蝕速率大幅降低。

4. 溶氧量

氧是海水中金屬發生腐蝕最主要的催助劑。主要原因乃是鋼材腐蝕電化學反應過程中，氧在陰極半反應部份中與水作用生成 OH^- ， OH^- 再與陽極半反應部份中溶解出之 Fe^{+2} 作用，形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 之腐蝕生成物，如果氧氣供應充足時，則 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 繼續繁衍生成各種不同之鐵銹生成物。海水中鋼鐵腐蝕速率依其表面之溶氧量而定，若海水之溶氧量增加時，則接觸鋼鐵表面之氧量增加，其腐蝕速率增大，相對關係如圖 2.7 所示^[59]。在正常的大氣壓下，海水之溶氧量與溫度及鹽度維持一平衡關係。

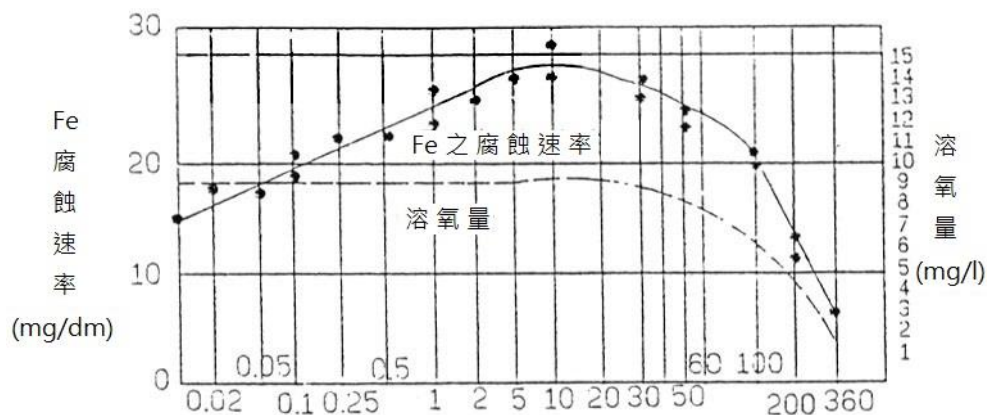


圖 2.7 鋼材腐蝕速率與溶氧量之關係^[60]

溶氧量亦隨海水深度而有所差異，主要受到海中植物進行光合作用或有機生物體之分解作用，而致使溶氧量有所消長。在深海處溶氧量低，對大多數之金屬而言，其腐蝕速率相對亦低。溶氧量亦受海水流速之增大而增濃，但受某些好氧細菌之作用(消耗)而降低濃度。

5. 導電度(conductivity)

海水之導電度是決定金屬腐蝕量多寡之一個重要因素，尤其是在有伽伐尼偶合作用(Galvanic coupling)及金屬表面局部有間隙存在的地方。從腐蝕工程師之觀點來看，海水與其它水溶液比較時，最主要的特徵是海水具有很高的比導電度，約比一般水溶液高 250 倍以上。海水之高比導電度容易造成金屬表面大面積的發生腐蝕反應，尤其是金屬表面之陽極面積小而陰極面積大時，腐蝕更是嚴重，最後形成局部孔蝕或間隙腐蝕。導電度之倒數謂之比電阻(resistivity)，為陰極防蝕設計上，陽極材料放電(消耗)大小之主要影響因子之一。

6. 深度

海水深度對金屬腐蝕之影響，現有公開的研究調查資料並不多。美國海軍試驗站研究人員於 1966 年，曾在太平洋的試驗站做深海腐蝕試驗，結果顯示：腐蝕速率隨著深度之增加而呈遞減趨勢，但亦有例外。如深至海床泥土時，若有硫化化合物存在時，更能助長厭氧性之硫酸還原菌之滋長，最後更可能加速金屬之腐蝕反應速率。

7. 流速

海水流速對金屬腐蝕速率有多方面的影響，它不但能增加較易到達接觸金屬表面之溶氧量，又能因海流衝擊之機械效應，去除金屬表面鈍態保護膜，更促使氧氣較易對金屬表面進行擴散及濃度極化，造成金屬發生腐蝕^[61]。圖 2.8 為腐蝕速率與海水流速之關係。

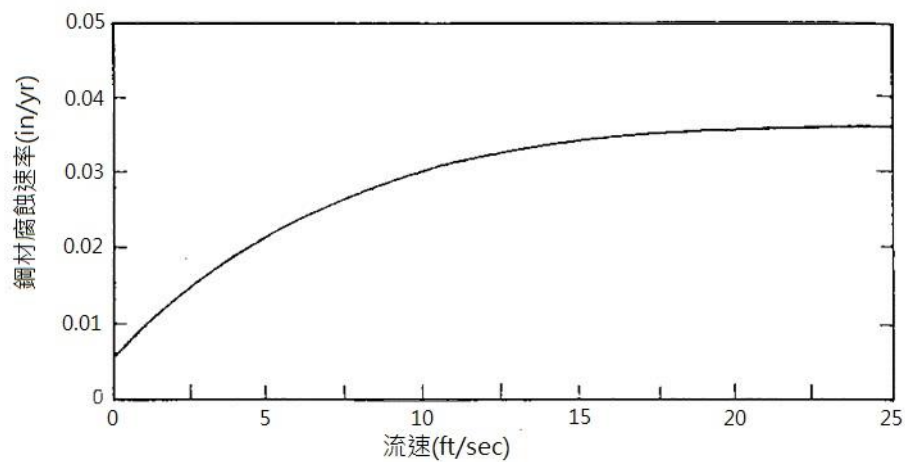


圖2.8 鋼材腐蝕速率與海水流速之關係^[61]

8. 雜散電流

雜散電流乃指不沿正規路徑，而走其它路徑流通之電流謂之。一旦這種雜散電流進入金屬結構物時，在離開結構物之處，會發生電蝕現象並加速腐蝕速率。海洋結構物諸如碼頭鋼板樁、油井平臺，船舶停泊港口卸貨或進行電焊維修工程時或安裝防蝕系統(外加電流)時，其供電設備，諸如發電機，直流電源供應器等，可能發生斷路或漏電，這些電流可能經由船殼或直接流入海水中，由於海水是良好之電解質，更容易將這些電流傳導至鋼板樁等金屬結構物，雜散電流一旦進入結構物，則會加速腐蝕速率，碼頭鋼板樁遭受雜散電流襲擊的過程如圖 2.9 所示^[62]。通常一片金屬表面，在陽極部位(金屬溶解釋出離子)由於受到雜散電流的影響，所造成腐蝕量可由法拉第定律計算出。例如：一安培直流電之雜散電流，流經鋼鐵結構物至海水中，每年將可腐蝕損失結構物約 9.1kg 之鋼鐵。

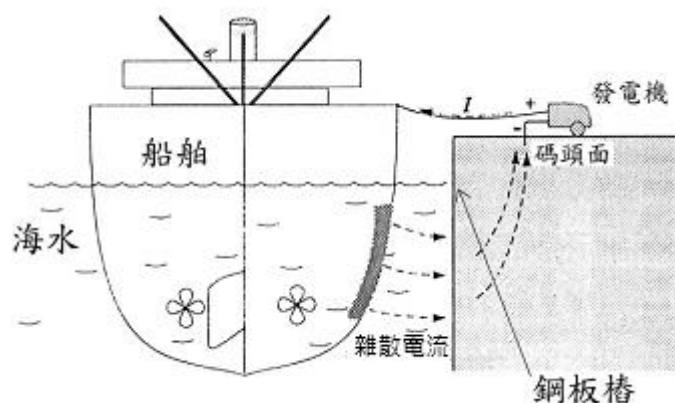


圖 2.9 碼頭鋼板樁遭受雜散電流之情形^[62]

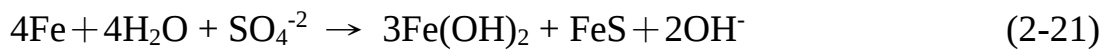
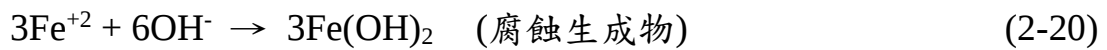
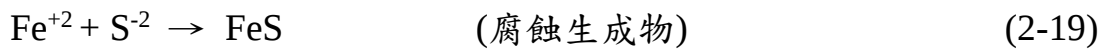
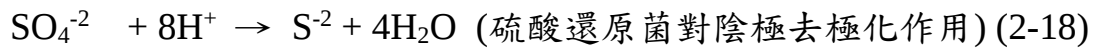
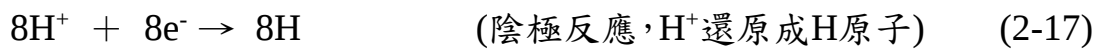
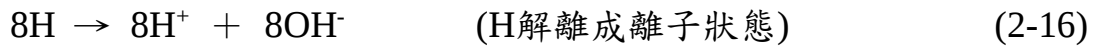
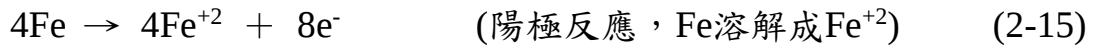
9. 海生物附著

海生物附著對鋼鐵之腐蝕，並不是一般腐蝕型態之一。它是一種因海生物有機體附著，致使金屬劣化。海水中包含有許多各種不同的有機生物體等，這些有機生物體有微污生物諸如細菌等，及巨污生物諸如海藻、藤壺、貝類等。海洋結構物浸泡海水中常受到海生物附著所困擾^[62]。由於海生物所排放之黏液(slime)容易附著於結構物表面上，接著形成生物黏液膜，萌芽的固著微生物體持久大量的附著，最後繁殖形成巨大的附著生物體，造成結構體局部的腐蝕劣化及荷重增加。海生物之種類及繁殖受到海水深度、溫度、光度及滋養等因素影響，同時亦因季節、潮汐等變化而異。海生物附著於鋼板樁，其發生腐蝕行為之過程，有下列幾種方式：

- (1) 直接對陰極或陽極產生去極化作用，影響腐蝕之特性或加速腐蝕速率。
- (2) 由於生物新陳代謝作用或分泌物釋出有機酸液，製造具腐蝕性之環境，鋼材更易與酸性反應，造成嚴重局部孔蝕。
- (3) 破壞金屬表面鈍態保護膜。
- (4) 形成金屬表面有氧濃度差異電池作用。

(5) 在金屬表面附近因有硫化物生成，使硫酸還原菌更具腐蝕侵蝕。

硫酸還原菌對鋼材之腐蝕機理如下：(厭氧性細菌)



2.6 大氣腐蝕環境因子之參數建立

雖然利用上述調查的數據可對照 ISO 9223 之大氣腐蝕性分類，但對照之腐蝕性分類僅為一等級範圍。若能利用調查結果確立腐蝕因子與現地暴露之金屬腐蝕速率的關係，則將來也可透過腐蝕因子的調查即可預測金屬大氣腐蝕速率，免去現地暴露試驗耗費的龐大資源。過去許多專家學者對於大氣腐蝕環境劣化因子與金屬效應皆有評估，如 Roberge (2002)^[63]認為大氣腐蝕最基本的要求為電解質薄膜的存在，因此相對濕度、大氣中的氣溶膠粒子如氯鹽、灰塵和污染物如二氧化硫等為主要的影響因子。文中顯示國際標準組織(ISO)基於簡化的原則來做分類，影響腐蝕的因子只考慮濕潤時間、二氧化硫和氯鹽；不包括一些其他可能具有影響力的因子，如環境溫度、風速等以及各種腐蝕機制。因此 ISO 提出的大氣腐蝕分類標準在精度和準度方面有限。

Corvo (2008)^[64]在古巴之亞熱帶海洋氣候區不同的暴露條件下，進行室內和室外的長期大氣腐蝕試驗。探討降雨、氯鹽等腐蝕因子對於鋁、銅、碳鋼等金屬的腐蝕暴露情況。結果顯示，金屬暴露於室內雖有遮蔽與室外通風的環境下相比，室內腐蝕速率較高，推測原因是室內相對濕度和其他氯化物等污染物會附著於金屬表面造成腐蝕加劇的現象；反而在室外，雨水會直接洗滌金屬表面，使腐蝕性污染物不會持續殘留於在金屬表面，造成進一步的腐蝕。若日照時間長，將使金屬表面水膜消失，降低表面潤濕時間，腐蝕總量減少。此外，若降雨增加，大氣中的相對濕度增加，延長了金屬表面的潤濕時間，由於日照及降雨反覆交互作用，破壞了金屬表面腐蝕產物的保護性，加速大氣腐蝕。因此亦將降雨時數與日照時數列入影響參數中。另外 Luo (2011)^[65]發現空氣中氯鹽含量傳送到內陸的分佈、受到風速、風向、局部地形的影響，距海岸線愈遠，氯鹽沉積速率愈小。所以環境中風速、風向參數也納入考量評估。

2.7 迴歸分析於大氣腐蝕應用

迴歸分析是一種統計分析方法，它利用一組解釋變數(independent variable)對某一反應變數(dependent variable)建立關係式以便做為預測的依據，也可以做為評估自變數對依變數的效用。其應用於大氣腐蝕研究主要目的在於瞭解金屬材料與大氣環境腐蝕因子間之數值關係。利用此關係可以由大氣腐蝕因子調查，預測金屬腐蝕速率。在過去國外文獻以迴歸分析進行大氣腐蝕速率評估，如 Mendoza(1999)^[66]於不同氣候條件及區域如沿海、城市工業區、農村等，進行碳鋼大氣腐蝕速率評估。結果顯示，由於二氧化硫與氯鹽及濕潤時間之間存在相互作用，使碳鋼腐蝕速率增加；碳鋼腐蝕速率與氯鹽在沿海區域明顯高於其他地區。並與 ISO 9223 標準比較，發現碳鋼腐蝕率與 ISO 標準並不相同，ISO 標準無法套用在全球各地區。Legault(1978)^[67]、Pourbaix(1993)^[68]與 Morales(2007)^[69]等人，也證實金屬材料腐蝕速率與暴露時間存在雙對數線性迴歸模式關係。Su (1988)^[70]利用迴歸分析探討大氣環境中各因子對金屬腐蝕率之影響程度，結果得到不同暴露地點與環境因子分別影響金屬腐蝕速率，驗證出迴歸模式地域性限制的問題。Tsai (1993)^[71]進行環境腐蝕因子迴歸分析，討論溫度、相對溼度、氯鹽沉積量與二氧化硫沉積量對碳鋼和耐候鋼之腐蝕速率的影響，針對高腐蝕速率區域須分別處理數據，再進行迴歸分析。Chou(2011)^[72]以迴歸分析建立鋅金屬腐蝕速率預測模式研究結果，針對氯鹽、二氧化硫與濕潤時間 3 項環境因子對臺灣地區鋅金屬的腐蝕速率，以氯鹽的影響最為顯著。Lo(2014)^[73]探討臺灣碳鋼與大氣腐蝕環境因子之關聯性，結果得知工業區以二氧化硫與濕潤時間有顯著相關。沿海區以氯鹽與濕潤時間，季節性以冬季與秋季與一年期碳鋼腐蝕有顯著相關。經由上述文獻發現在不同試驗區域環境腐蝕分類標準，其腐蝕等級往往超越 ISO 9223 提出的環境腐蝕性分類之等級。故利用迴歸分析建立專屬於該地區之腐蝕速率與環境因子之數值關係，應可提升預測金屬材料腐蝕的準確性。

第三章 研究方法與試驗點位置資料圖表

3.1 大氣暴放環境

3.1.1 氣鹽沉積速率試驗調查

本研究以垂直海岸線落鹽量之調查，自距離海岸線 3 km 為邊界，即垂直海岸線試驗點的佈設以離海岸線距離，朝內陸沿一條直線設置，每條測線以離海岸線算起，分別約於臨海、100m、300m、1 km、3 km 之距離處設置試驗點，並依借用場地可行性決定設站。設置站址如下：

1. 東北季風海域(基隆)：基隆試驗線，包括碧砂安檢所 1 處、海洋大學 1 處共 2 處。
2. 北部地區海域(桃園)：桃園試驗線，包括大潭電廠 1 處與觀音產業園區 1 處，共 2 處。
3. 中部地區海域(臺中)：臺中港試驗線，包括臺中港區內 1 處、本所運輸技術研究中心 1 處與市區民宅 1 處，共 3 處。
4. 中部產業園區海域(雲林)：台塑六輕試驗線，包括六輕產業園區內 5 處。
5. 西南部地區海域(高雄)：高雄港試驗線，包括高雄港區內 4 處。
6. 南部地區海域(恆春)：核三廠試驗線，包括核三廠區內 3 處。
7. 東北部地區海域(宜蘭)：蘇澳港試驗線，包括蘇澳港區內 2 處。
8. 東部地區海域(花蓮)：花蓮港試驗線，包括花蓮港區內 2 處、市區加油站 1 處共 3 處。

另外為使試驗點之數據可進行內插推算，於上述調查路線之垂直方向，即沿臺灣南北向再規劃西部 2 條、東部 1 條試驗線。臺灣西部之試驗線一為西部濱海沿線，另一則為臺灣高鐵沿線；西部濱海沿線試驗點包括：石門十八王公橋、臺北港監測站、桃園永安安檢所、桃園平鎮產業園區、新竹漁港安檢所、台電通霄電廠、苗栗外埔安檢所、臺中

五甲安檢所、台電臺中電廠、彰濱產業園區、彰化王功安檢所、嘉義東石安檢所、臺南成大安南校區水工試驗所、高雄興達火力電廠、中鋼公司，共 15 個試驗點；高鐵沿線車站試驗點則包括高鐵臺中站、嘉義站、左營站，共 3 個試驗點。臺灣東部濱海公路沿線之試驗點包括：東北角風景區福隆遊客中心、宜蘭梗枋安檢所、宜蘭南澳安檢所、宜蘭龍德產業園區、花蓮太魯閣國家公園管理處、花蓮橄仔樹安檢所、花蓮石梯安檢所、臺東成功安檢所、臺東東河金樽安檢所、臺東富崗伽蘭安檢所、臺東尚武安檢所，共 11 個試驗點。

在對照組方面，選擇臺灣距離海岸線較遠之山區或公路佈設試驗點，規劃之試驗點包括臺北市陽明山國家公園管理處、北部山區(公路局北區養護工程分局處復興工務段)、中部山區(公路局中區養護工程分局新中橫監工站、埔里工務段、霧社監工站、谷關工務段)、南部山區(公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段與石卓監工站)等 8 個試驗點。此外，都會地區於臺北市設置 1 個試驗點及外島地區之金門水頭商港、馬祖福澳港、澎湖馬公市共 3 個試驗點。

綜而言之，氯鹽沉積速率的調查位置共有 65 個試驗點，相關涵蓋區域與試驗點所屬環境分類，如表 3-1 所示，分佈如圖 3.1 所示。圖 3.1 中，紅色字樣表示垂直海岸線規劃的調查路線共 24 個試驗點，藍色字樣為 29 個平行海岸線之試驗點，綠色字樣則表示 12 個參考對照試驗點。

表 3-1 氣鹽沉積速率調查試驗點規劃分類表

	試驗線(點)規劃	所在地區	環境分類
垂直海岸線之試驗線	基隆試驗線	基隆市	海洋環境、鄉村環境
	桃園試驗線(大潭電廠)	桃園市觀音區	海洋環境、鄉村環境
	臺中港試驗線	臺中市梧棲區	海洋環境、鄉村環境
	台塑六輕試驗線	雲林縣麥寮鄉	海洋環境、工業環境
	高雄港試驗線	高雄市	海洋環境、都市環境
	核三廠試驗線	屏東縣恆春鎮	海洋環境、鄉村環境
	蘇澳港試驗線	宜蘭縣蘇澳鎮	海洋環境、鄉村環境
	花蓮港試驗線	花蓮市	海洋環境、鄉村環境
西部濱海沿線規劃試驗點	十八王公橋	新北市石門區	海洋環境
	臺北港監測站	新北市淡水區	海洋環境
	永安安檢所	桃園市新屋區	海洋環境、鄉村環境
	平鎮產業園區	桃園市平鎮區	工業環境
	新竹安檢所	新竹市	海洋環境、鄉村環境
	台電通霄電廠	苗栗縣通霄鎮	海洋環境、工業環境
	外埔安檢所	苗栗縣後龍鎮	海洋環境
	五甲安檢所	臺中市大安區	海洋環境、鄉村環境
	台電臺中電廠	臺中市龍井區	海洋環境、工業環境
	彰濱產業園區	彰化縣鹿港鎮	海洋環境、工業環境
	王功安檢所	彰化縣芳苑鄉	海洋環境
	東石安檢所	嘉義縣東石鄉	海洋環境
	成大水工試驗所	臺南市安南區	海洋環境、鄉村環境
	興達火力電廠	高雄市永安區	海洋環境、工業環境
	中鋼公司	高雄市小港區	工業環境
	高鐵臺中站	臺中市烏日區	都市環境
東部濱海沿線規劃試驗點	高鐵路嘉義站	嘉義縣太保市	鄉村環境
	高鐵路左營站	高雄市左營區	都市環境
	東北角風景區福隆遊客中心	新北市貢寮區	海洋環境
	梗枋安檢所	宜蘭縣頭城鎮	海洋環境
	龍德產業園區	宜蘭縣冬山鄉	海洋環境、工業環境
	南澳安檢所	宜蘭縣南澳鄉	海洋環境
	太魯閣國家公園管理處	花蓮縣秀林鄉	鄉村環境
	橄仔樹安檢所	花蓮縣壽豐鄉	海洋環境
	石梯安檢所	花蓮縣豐濱鄉	海洋環境

試驗線(點)規劃		所在地區	環境分類
驗 點	金樽安檢所	臺東縣東河鄉	海洋環境
	伽藍安檢所	臺東市	海洋環境
	尚武安檢所	臺東縣大武鄉	海洋環境
	成功安檢所	臺東縣成功鎮	海洋環境
對 照 組 試 驗 點	陽明山國家公園管理處	臺北市	鄉村環境
	臺北自來水事業處	臺北市	都市環境
	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	嘉義縣番路鄉	鄉村環境
	金門水頭商港	金門縣	海洋環境
	馬祖福澳港碼頭	連江縣(馬祖)	海洋環境
	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	澎湖縣	海洋環境
	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	南投縣信義鄉	鄉村環境
	公路局中區養護工程分局埔里工務段	南投縣埔里鎮	鄉村環境
	公路局中區養護工程分局霧社監工站	南投縣仁愛鄉	鄉村環境
	公路局中區養護工程分局處谷關工務段	臺中市和平區	鄉村環境
	公路局北區養護工程分局復興工務段	桃園市復興區	鄉村環境
	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	嘉義縣阿里山鄉	鄉村環境

3.1.2 氯鹽沉積速率計算

本研究參考 CNS 13754 (對應 ISO 9225 國際標準) 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)規範，安裝氯鹽採集裝置。氯鹽沉積量採集裝置是以濕燭法進行(如圖 3.2 及圖 3.3)，其原理為使用一個濕纖維織物表面，在已知面積的條件下暴露一段時間，再以化學分析法測定其氯鹽沉積量。計算所得之氯鹽沉積率，以 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 表示。

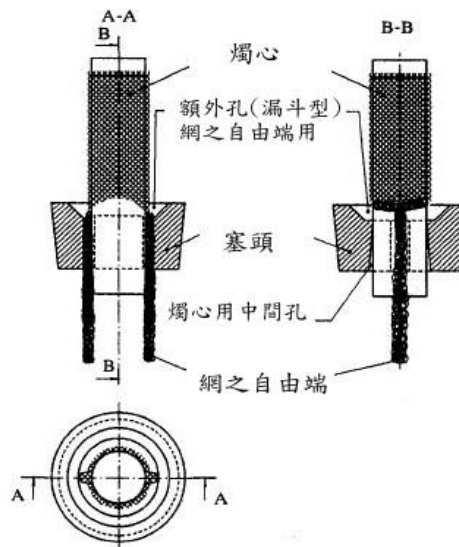


圖 3.2 濕燭法燭心構造示意圖 (CNS 13754)

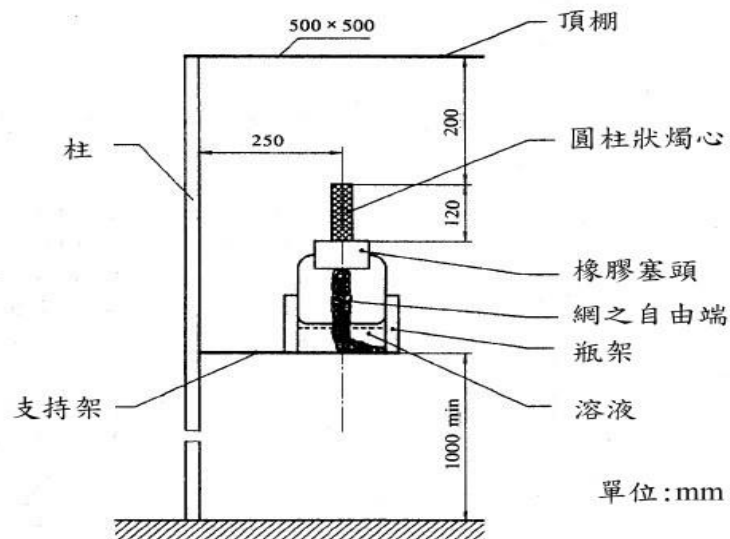


圖 3.3 濕燭法裝置構造圖 (CNS 13754)

各試驗點暴露後回收的紗布以定量的去離子水(約 50 ml)沖洗，再依環境部水中陰離子檢測方法—離子層析法(NIEA W415.52B)之離子層析儀測定水中之氯離子含量。氯鹽之沉積速率依下式計算：

$$R(\text{Cl}^-) = \frac{m}{A \times t} \quad (3-1)$$

式中， $R(\text{Cl}^-)$ = 氯化物沉積速率($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$)

m = 試樣溶液之氯離子總質量(mg)

A = 暴露網表面積(m^2)

t = 暴露時間，天(day)

3.1.3 二氧化硫沉積速率調查

大氣中廢氣的污染程度決定了當地大氣的腐蝕性，若排放的廢氣中含有大量的 SO_2 與 H_2S ，這些氣體在大氣中會形成酸雨，且當這些硫化物溶於水以水膜形式存在時，將會形成強腐蝕介質，加速金屬腐蝕。一般在石化廠、煉鋼廠、火力電廠等產業園區與都市地區，大氣中均可能存在相當程度的硫化物；因此，本研究針對二氧化硫沉積速率調查試驗點的佈設，主要以都市地區、工業地區、石化與火力電廠附近為主，並設置對照組，建置如下：

1. 都市地區：臺北市，選取交通頻繁處，共 1 個試驗點。
2. 工業地區：於臺灣各縣市產業園區設置試驗點，共 29 個試驗點。
3. 石化與火力電廠：林園煉油廠、大潭電廠(桃園試驗線 500m)、通霄火力電廠、臺中火力電廠、興達火力電廠，共 5 個試驗點。
4. 臺灣西部南北縱向：高鐵沿線車站，地點包括高鐵臺中站、嘉義站、左營站，共 3 個試驗點。

5. 沿海地區：東北角風景區福隆遊客中心、十八王公橋、永安安檢所、臺中港試驗線 300m，共 4 個試驗點。
6. 離島地區：金門金城鎮(水頭商港)、澎湖馬公市(公路局南區養護工程分局澎湖工務段)及馬祖南竿鄉(福澳港) 各設 1 個試驗點，共 3 個試驗點。
7. 對照組：選擇距離海岸線較遠之山區或公路佈設試驗點，包括臺北市陽明山國家公園管理處、太魯閣國家公園管理處、北部山區(公路局北區養護工程分局處復興工務段)、中部山區(公路局中區養護工程分局新中橫監工站、埔里工務段、霧社監工站、谷關工務段)、南部山區(公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段與石卓監工站)等 9 個試驗點。此外，在硫磺溫泉區(陽明山硫磺區) 設 1 個試驗點。

二氧化硫沉積速率調查位置共有 55 個試驗點，包括都市地區 1 個試驗點，全臺產業園區 29 個試驗點，石化與火力電廠 5 個試驗點，高鐵沿線 3 個試驗點，沿海地區 4 個試驗點，離島地區 3 個試驗點，10 個參考對照試驗點。綜整如表 3-2 與圖 3.4。

表 3-2 二氧化硫沉積速率調查試驗點分佈表

縣(市)	試驗點位置
臺北市	臺北市自來水事業處、陽明山國家公園管理處、陽明山硫磺區
新北市	十八王公橋、樹林產業園區、東北角風景區福隆遊客中心
桃園市	觀音產業園區、平鎮產業園區(服務中心、力鋼公司)、桃園試驗線 500m(大潭電廠)、桃園試驗線 2Km、公路局北區養護工程分局復興工務段、永安安檢所
新竹縣	新竹產業園區、工業技術研究院
苗栗縣	頭份產業園區、竹南產業園區、通霄火力電廠
臺中市	大里產業園區、臺中港關連產業園區、臺中產業園區、高鐵臺中站、臺中火力電廠、臺中港試驗線 300m、公路局中區養護工程分局處谷關工務段
南投縣	南崗產業園區、公路局中區養護工程分局新中橫監工站、公路局中區養護工程分局埔里工務段、公路局中區養護工程分局霧社監工站
彰化縣	彰濱產業園區、田中產業園區
雲林縣	斗六產業園區
嘉義縣	朴子產業園區、高鐵嘉義站、公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段、公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站
臺南市	安平產業園區、興達火力電廠、成大水工試驗所、官田產業園區
高雄市	永安產業園區、鳳山產業園區、大發產業園區、中油林園廠、中鋼公司、高鐵左營站
屏東縣	屏東產業園區
宜蘭縣	龍德產業園區
花蓮縣	和平產業園區、太魯閣國家公園管理處
花蓮市	美崙產業園區
臺東市	豐樂產業園區
金門縣	金門水頭商港
澎湖縣	公路局南區養護工程分局澎湖工務段
連江縣	馬祖福澳港

3.1.4 二氧化硫沉積速率計算

本計畫參考 CNS 13754(對應 ISO 9225 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)規範，二氧化硫沉積量採集裝置是以二氧化硫在二氧化鉛硫酸化平板之沉積速率測定(如圖 3.5)，其原理為大氣中二氧化硫與二氧化鉛會反應形成硫酸鉛，暴露一段時間後回收該平板，並針對平板上的附著物進行硫酸鹽分析以測定二氧化硫之含量，二氧化硫的沉積量以 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 表示。

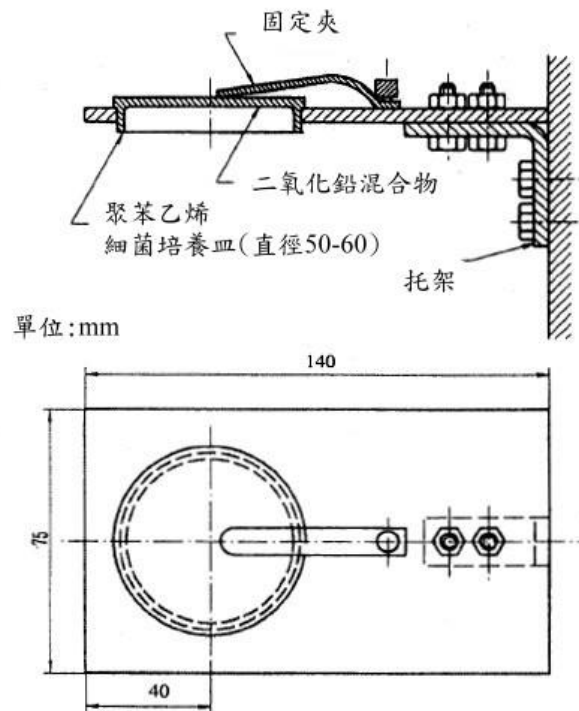


圖 3.5 二氧化硫沉積量採集裝置 (CNS 13754)

各試驗點暴露後回收的硫酸化平板依環境部水中陰離子檢測方法—離子層析法(NIEA W415.52B)測定，即使用碳酸鈉溶液先移出並溶解硫酸化平板之內容物，然後以離子層析儀檢測硫酸鹽含量。二氧化硫之沉積速率之計算如下：

$$R(\text{SO}_2) = \frac{(m_1 - m_0) \times 16.67}{A \times t \times 1000} \quad (3-2)$$

式中， $R(\text{SO}_2)$ = 二氧化硫沉積速率($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$)

m_0 = 空白平板(未暴露)測試之硫酸鹽質量(μg)

m_1 = 每一平板之硫酸鹽質量(μg)

A = 平板面積(m^2)

t = 暴露時間，天(day)

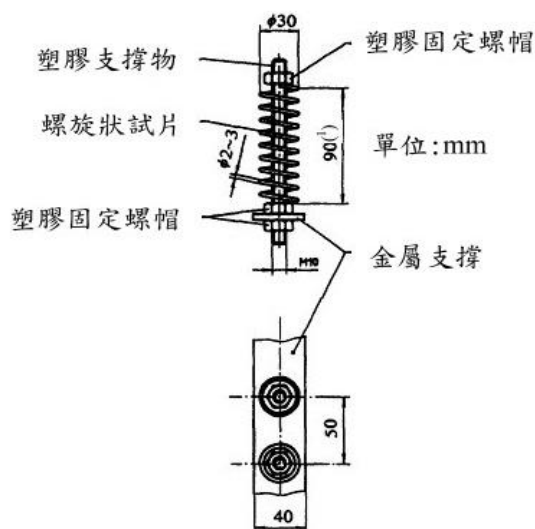
3.1.5 現地暴露試驗

本研究針對螺旋試樣碳鋼、鋅、銅、鋁 4 種金屬，選擇適當位置進行現地暴露試驗並以重量損失法計算其腐蝕速率。

現地暴露試驗試片的製作方式參考 CNS 13753(對應 ISO 9226 國際標準)，因本研究從 2007 年開始建置試驗點，當時 CNS 13753-1996 規範的標準試片有螺旋狀及平板狀兩種形態，本研究選用螺旋狀標準試片(如圖 3.6)，並沿用迄今。雖與目前 CNS 13753-2019 規範的標準試片為平板狀標準試片不同，但試驗結果仍可供參考比較。

螺旋狀標準試片的材料如下：(1)碳鋼：非合金碳鋼($Cu=0.03\sim0.10\%$, $P < 0.07\%$)，(2)鋅：98.5%以上之純度，(3)銅：99.5%以上之純度，(4)鋁：99.5%以上之純度；將以上金屬之線材，線材直徑 2~3 mm，碳鋼線材直徑為 2.65mm，鋅線材直徑為 2.35mm，銅線材直徑為 3.0mm，鋁線材直徑為 2.4mm 剪取約 1000 mm 長度，纏繞在直徑為 24 mm 的圓棒上，製成螺旋狀試片。

現地暴露試驗點建置的數量以涵蓋氯鹽沉積量與二氧化硫沉積量調查位置之 75%為原則，全國合計共有 90 個螺旋試樣試驗點。設置站址如圖 3.7 所示。



註1 線材兩端插入支撐物間之距離

圖 3.6 螺旋狀試片構造圖(CNS 13753-1996)

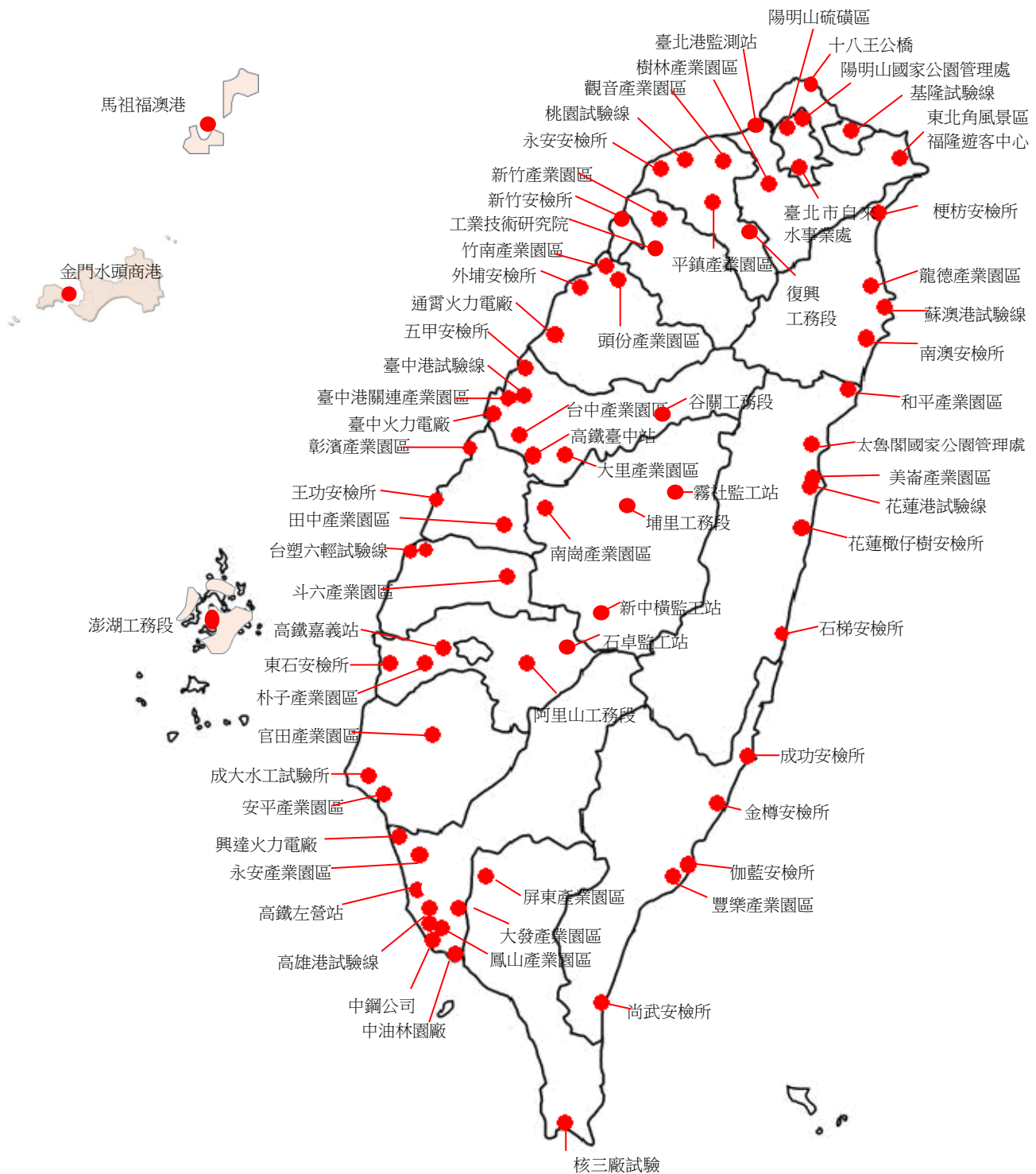


圖 3.7 現地暴露試驗(碳鋼、鋅、鋁、銅螺旋狀試片)試驗點分佈圖

3.1.6 試片腐蝕速率計算

將各試驗點測試後每季回收的試片進行腐蝕速率量測。碳鋼、鋅、鋁、銅四種螺旋狀金屬試片之大氣腐蝕速率量測，依照 CNS14122(對應 ISO 8407 國際標準)金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法，以適當的清洗方式除去試片表面腐蝕生成物，量測其重量損失，並依金屬材料的暴露時間，計算其大氣腐蝕速率。螺旋狀金屬試片之腐蝕速率單位以 $\mu\text{m/y}$ 表示，計算公式依據 CNS 13753-1996 規範，如下：

$$R_{\text{corr}} = 0.25(\Delta m \cdot d / m \cdot t) \quad (3-3)$$

式中， R_{corr} = 腐蝕速率($\mu\text{m/y}$)

Δm = 質量損失(mg)

d = 線材直徑(mm)

m = 試片原始質量(g)

t = 暴露時間，年(y)

3.1.7 試片腐蝕生成物清除與測試

碳鋼、鋅、鋁、銅四種螺旋狀金屬線材之大氣腐蝕速率量測，依照 CNS14122 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法，以適當的清洗方式除去試片表面腐蝕生成物，量測其重量損失，並依金屬材料的暴露時間，計算其大氣腐蝕速率。為確保除去腐蝕生成物的化學清洗方法不會損壞底材金屬，先依照 CNS14122 規範，使用腐蝕試片進行重複清洗，以制定檢量標準，作業流程如圖 3.8 所示。針對不同金屬，化學清洗法使用的化學藥品及各項條件，如表 3-3 所示。

表 3-3 化學清洗法使用藥品及條件(CNS14122)

材 料	化學藥品	時間 (min)	溫度 (°C)	備註
碳 鋼	以 500mL HCl ($\rho=1.19\text{g/mL}$) 與 3.5g 六亞甲四胺 (Hexamethylene tetramine)， 加入蒸餾水配成 1000mL	10	室溫 (23.5)	—
鋅	100g 氯化銨 (NH_4Cl)，加入蒸 餾水配成 1000mL	2~5	70	—
銅	以 100mL 硫酸 (H_2SO_4 ， $\rho=1.84$ g/mL)，加蒸餾水至 1000mL	1~3	室溫 (23.5)	在處理之前，先移 除表面的塊狀腐蝕 生成物，可使銅的 二次沉積產物量減 到最少
鋁	硝酸 (HNO_3 ， $\rho=1.42\text{ g/mL}$)	1~5	室溫 (23.5)	去除額外之沉積物 及塊狀之腐蝕生成 物，以免造成基底金 屬過度流失

大氣腐蝕試片－ 腐蝕生成物清除法作業流程

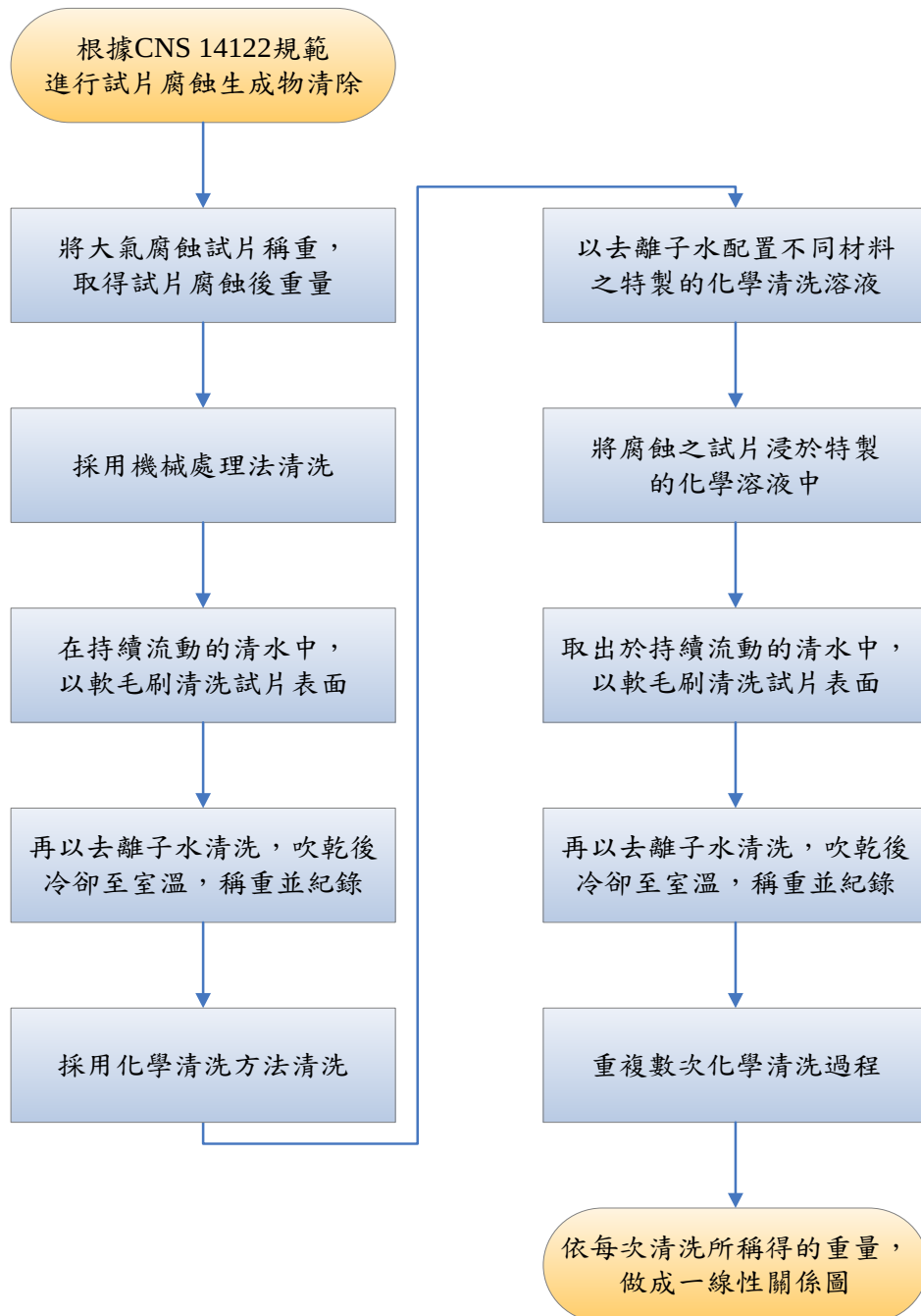


圖 3.8 腐蝕生成物清除法作業流程圖

3.2 腐蝕因子環境分類

表 3-4 至表 3-6 分別為 CNS 13401 (對應 ISO 9223-2012 國際標準) 規範中對濕潤時間、氯鹽沉積速率與 SO_2 沉積速率或濃度的分類。參考 CNS 13401 (對應 ISO 9223-2012 國際標準)，大氣腐蝕環境的分類可採用試片腐蝕速率量測與環境因子進行區分，若採用環境因子進行分類，選擇的參數則包括濕潤時間(τ)、空氣中的氯鹽沉積速率(S_d)與二氧化硫沉積量(P)。其中，濕潤時間是以全年中溫度高於 0°C ，相對濕度大於 80% 之小時數計算，氯鹽沉積速率($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$)是以 CNS 13754 (對應 ISO 9225 國際標準) 濕燭法測量，二氧化硫沉積量則是以 CNS 13754 (對應 ISO 9225 國際標準) 規定之二氧化鉛硫酸化平板量測的沉積速率($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$)測定或是空氣中的 SO_2 濃量($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 計算；其中，各參數的量測時間均至少為一年以上。依據 CNS 與 ISO 規範，若要以腐蝕因子進行大氣腐蝕環境分類，濕潤時間、氯鹽與二氧化硫的沉積速率至少應經過一年以上的連續量測，若測點所在位置無實測的腐蝕因子數據，則以鄰近的腐蝕因子資料推估。

表 3-7 為各種標準金屬最初第一年之腐蝕速率區分，金屬的腐蝕速率在初期暴露時最大，隨後會逐漸下降而最終到達一穩定值；表中除鋁金屬外，碳鋼、鋅、銅金屬的腐蝕速率單位均可以 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 表示；主要原因是因碳鋼、鋅、銅金屬在大氣環境中的腐蝕現象為均勻腐蝕，但鋁金屬則為局部腐蝕，所以鋼、鋅、銅金屬的腐蝕速率可以 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 表示，但鋁的腐蝕速率須以 $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$ 表示。

上述分別將大氣腐蝕環境區分為 C1、C2、C3、C4、C5 與 CX 6 個等級，C1 表示腐蝕性非常低(very low)，C2 表示腐蝕性低(low)，C3 表示腐蝕性中等(medium)，C4 表示腐蝕性高(high)，C5 表示腐蝕性非常高(very high)，CX 表示腐蝕性極端高(extra high)，應用於特定海洋和海洋工業環境。

表 3-4 濕潤環境等級分類表

濕潤時間 (hour/year)	級別
$\tau \leq 10$	τ_1
$10 < \tau \leq 250$	τ_2
$250 < \tau \leq 2,500$	τ_3
$2,500 < \tau \leq 5,500$	τ_4
$5,500 < \tau$	τ_5

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223-2012 國際標準)。

表 3-5 氯鹽腐蝕環境等級分類表

氯鹽沉積速率 (mg/m ² /day)	等級
$S_d \leq 3$	S_0
$3 < S_d \leq 60$	S_1
$60 < S_d \leq 300$	S_2
$300 < S_d \leq 1,500$	S_3

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223-2012 國際標準)。

表 3-6 二氧化硫腐蝕環境等級分類表

SO ₂ 沉積速率 (mg/m ² /day)	SO ₂ 濃度 (μ g/m ³)	等級
$P_d \leq 4$	$P_c \leq 5$	P_0
$4 < P_d \leq 24$	$5 < P_c \leq 30$	P_1
$24 < P_d \leq 80$	$30 < P_c \leq 90$	P_2
$80 < P_d \leq 200$	$90 < P_c \leq 250$	P_3

註：P_d：測定方法以沉積速率量測 SO₂；P_c：測定方法以體積濃度量測 SO₂。

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223-2012 國際標準)。

表 3-7 大氣腐蝕環境分類-以各種標準金屬最初第 1 年之腐蝕速率區分

腐蝕性 級別	金屬的腐蝕速率(γ_{corr})				
	單 位	碳 鋼	鋅	銅	鋁
C1	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m/yr}$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 10$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.9$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	可忽略 —
C2	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m/yr}$	$10 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$ $1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ $0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.9 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ $0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$ —
C3	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m/yr}$	$200 < \gamma_{\text{corr}} \leq 400$ $25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 15$ $0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.1$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 12$ $0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2$ —
C4	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m/yr}$	$400 < \gamma_{\text{corr}} \leq 650$ $50 < \gamma_{\text{corr}} \leq 80$	$15 < \gamma_{\text{corr}} \leq 30$ $2.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 4.2$	$12 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$ $1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.8$	$2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ —
C5	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m/yr}$	$650 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1,500$ $80 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$	$30 < \gamma_{\text{corr}} \leq 60$ $4.2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 8.4$	$25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$ $2.8 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5.6$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 10$ —
CX	$\text{g/m}^2/\text{yr}$ $\mu\text{m/yr}$	$1,500 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5,500$ $200 < \gamma_{\text{cor}} \leq 700$	$60 < \gamma_{\text{cor}} \leq 180$ $8.4 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$50 < \gamma_{\text{corr}} \leq 90$ $5.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 10$	$10 < \gamma_{\text{cor}}$ —

資料來源：CNS 13401 (對應 ISO 9223-2012 國際標準)。

3.3 海洋暴放環境

本計畫為持續建立臺灣地區長期金屬材料水下腐蝕資料庫，以做為新建及既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考需要，自 103 年起陸續安裝水下金屬試驗架於基隆港、臺北港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、布袋港、安平港、高雄港、金門水頭、金門料羅港、馬祖福澳港、澎湖龍門港等國內商港，藉此了解港區在不同環境、金屬材料、海洋生物附著、海水水質等對金屬材料腐蝕之長期研究。

3.3.1 研究方法與規劃

本計畫水下腐蝕研究方法與規劃如圖 3.9 所示。

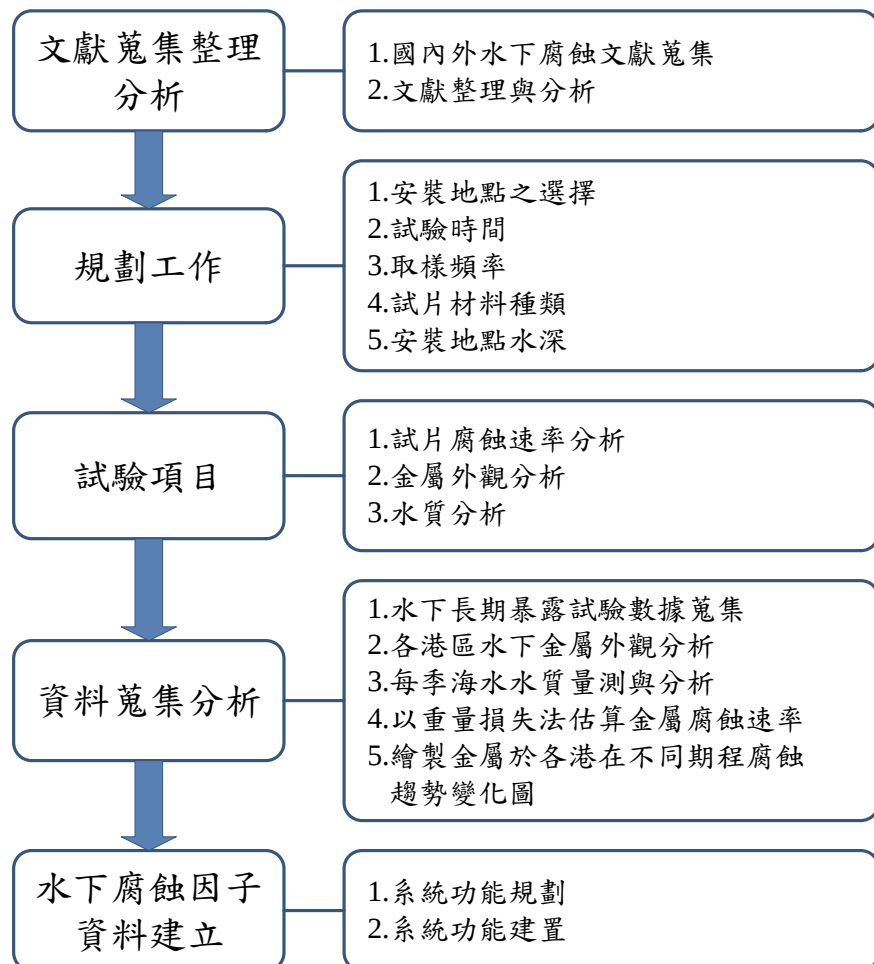


圖 3.9 水下腐蝕研究方法與規劃

3.3.2 各港區海水下金屬暴露試驗

各港區試片設計、屬性與安裝與試驗期程，如表 3-8 至表 3-11 所示，試片大小，試片架之設計，試片架之安放工作以及各階段分批取樣時程，詳述如後：

1. 材質型式：試片採用港工結構材使用之試片，分 3 種型式為碳鋼 (SM490A)、不鏽鋼(SS316L)、低碳鋼(SS400)。
2. 試片之大小：為適合海中附生物之附著。軋鋼材質料試片大小均為 15cm×10cm，厚度則分別為碳鋼 (SM490A)1.0cm、不鏽鋼 (SS316L)1.0cm、低碳鋼(SS400)1.0cm。
3. 試片架設計：為配合當地港工結構之條件，設計須考慮穩定性、試片置放及取樣難易程度等每一試片皆有兩只通孔，使用不鏽鋼螺栓及螺帽，固定於承載試片主架上，螺栓與螺帽使用絕緣材質墊片，以防止電化學腐蝕效應。
4. 試片架的暴露位置：分別安放於飛沫帶、潮汐帶、水中帶 3 個位置每層架置 45 個試片，共 135 片，如圖 3.10 所示，以膨脹螺絲接合施作於混凝土牆面固定，現場安裝如圖 3.11 所示。
5. 試驗期程：依實際需求規劃或 10 年期。
6. 取樣頻率：第 1、2、5、8、10 年期等。

研究至今已完成前 3 次水下試片取樣、分析工作，第 1~3 次水下取樣分析的成果已整理在前期報告中：第 1 年的取樣成果彙整在「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」^[11]報告，2 年後的取樣成果彙整在「108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」^[12]報告，5 年後的取樣成果彙整在「112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究」^[16]報告；後續預計在明(114)年辦理 8 年後之水下金屬試片現地取樣及化學試驗分析工作。

表 3-8 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(1/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小(cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程
基隆港 西33B碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/26	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
臺北港 北#2碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/26	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
蘇澳港 公務船渠	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/06/23	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
花蓮港 西防波堤 燈塔	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/10/03	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			

表3-9 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(2/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小 (cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程 (年)
臺中港 #1 碼頭西側	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2014/10/28 (2017 毀損) 2019/03/26 (重新安裝)	1、2、5、8、 10 年等 5 個 期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
布袋港 東#3碼頭	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/05	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
安平港 #7碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/06	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			

註：臺中港原於 2014 年 10 月 28 日安裝的試片架於 2017 年因外力撞擊毀損，之後於 2019 年 3 月 26 日重新安裝。

表 3-10 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(3/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小(cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程
高雄港 #10碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/08	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
高雄港 #40碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/07	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
高雄港 #75碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/07	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			

註：高雄港#75 碼頭飛沫帶試架於完成取樣 2 年後毀損試片遺失。

表 3-11 各港區金屬材料水下腐蝕試片尺寸與安裝取樣期程(4/4)

放置地點	放置位置	試片材質	試片大小 (cm)	安裝日期 (年/月/日)	取樣期程 (年)
金門 料羅港區	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2015/11/16	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
金門 水頭商港	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2015/11/16	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
馬祖福澳港 浮動碼頭	飛沫帶	SM490A	15×10×1.0	2016/08/15	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	潮汐帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
澎湖龍門港 #9碼頭	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/12	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			
	水中帶	SM490A			
		SS316L			
		SS400			
運技中心 循環水槽	潮汐帶	SM490A	15×10×1.0	2016/09/22 (2022終止 試驗)	1、2、5、 8、10年等5 個期程
		SS316L			
		SS400			

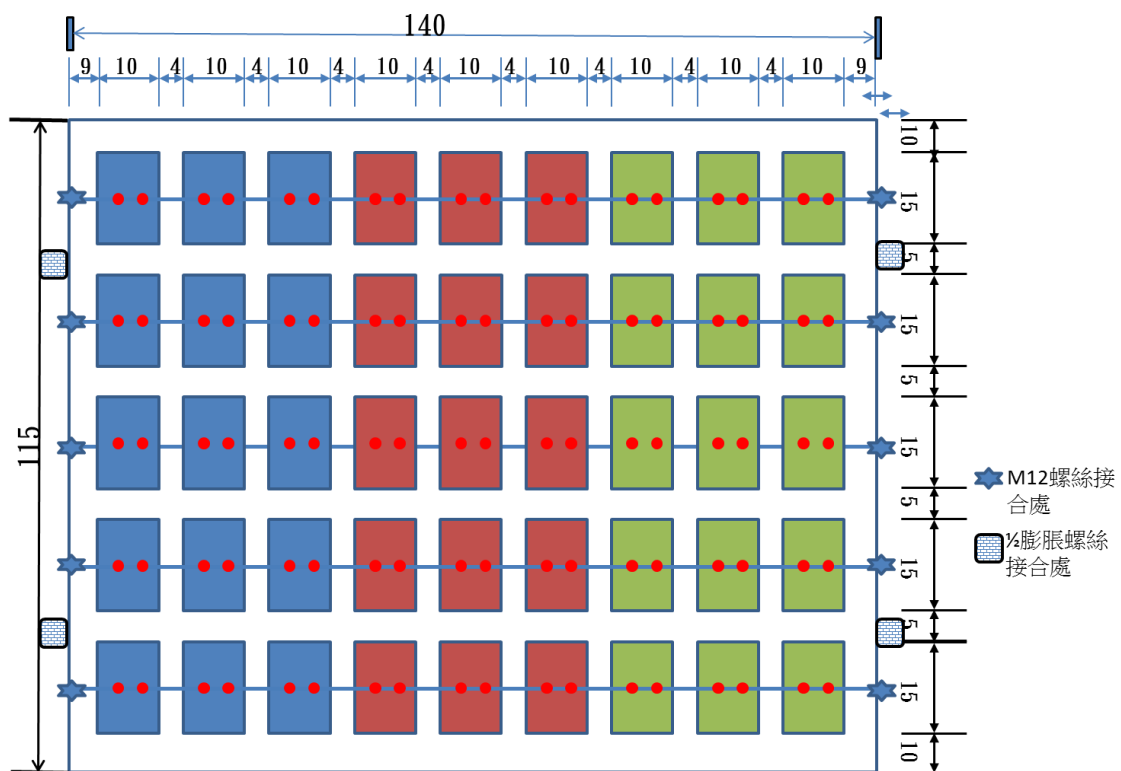


圖 3.10.水下金屬腐蝕試驗架示意圖

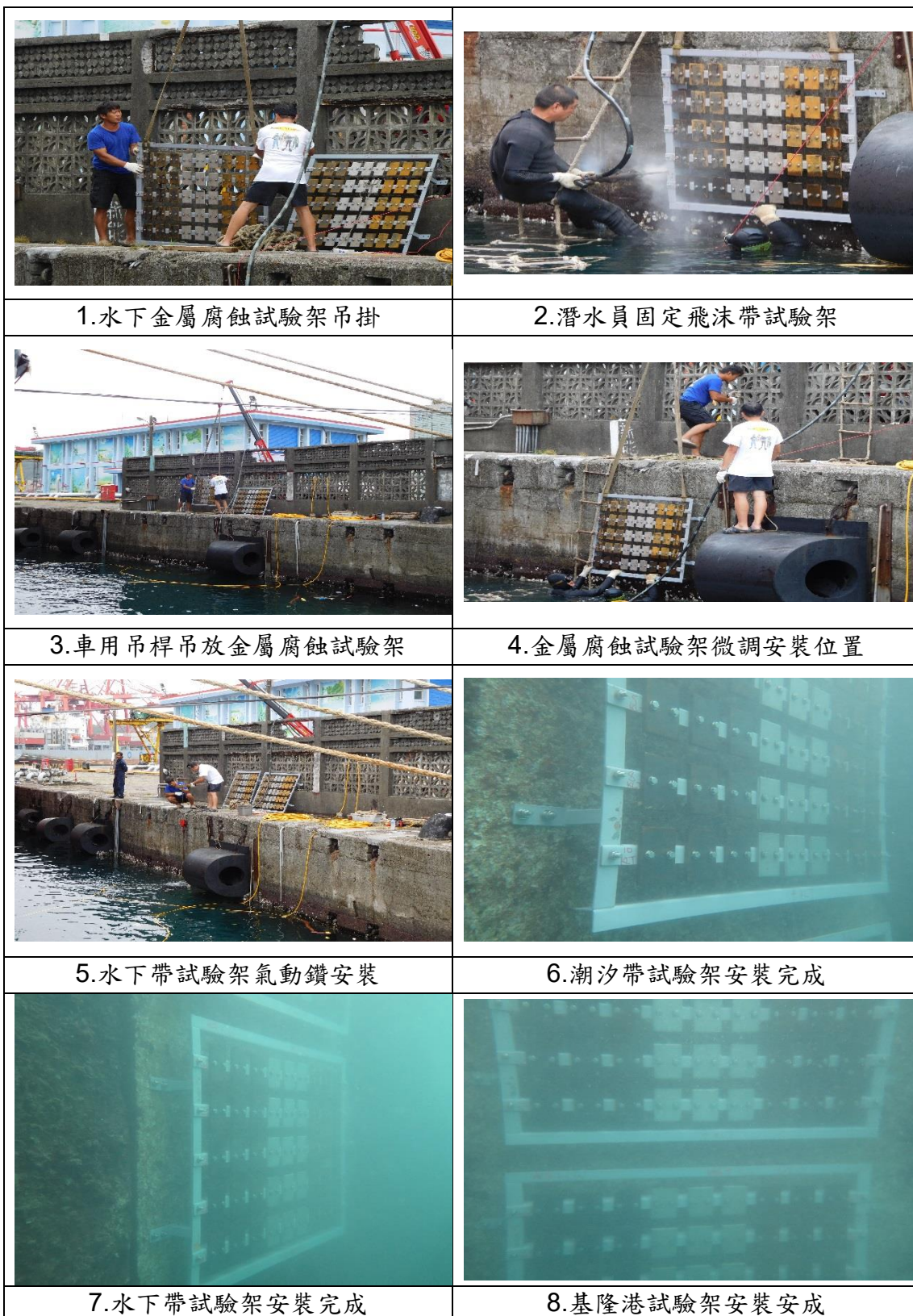


圖 3.11 基隆港水下金屬暴露試驗架安裝

3.3.3 試片腐蝕速率分析方法

3.3.3.1 試片定期採樣之處理分析方法

依規劃時間至安裝現場請潛水人員將試片取出，將樣品收集分類及拍照後，帶回實驗室作進一步海生物清除與腐蝕清洗分析。

3.3.3.2 試片腐蝕分析步驟

採樣後試片於實驗室進行腐蝕分析，作業流程如圖 3.12，先將附著海生物刮去處理後，依據 NACE Standard TM-01-69 方法，以濃鹽酸 + 40 g/l SnCl_2 溶液，在室溫下浸泡試片，達到除銹效果，並稱重以量測其平均腐蝕速率（重量損失法）。將試驗點暴放後取回之試片進行腐蝕速率量測。為確保除去腐蝕生成物的化學清洗方法不會損壞底材金屬，先使用腐蝕試片進行重複清洗，以制定檢量線（俟重複清洗後之試片淨重達到一穩定值）。



圖 3.12 水下金屬腐蝕生成物清除作業流程圖

3.3.3.3 腐蝕速率計算

板狀試片的腐蝕速率(R_{corr})單位以 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 表示，計算公式如下：

$$R_{\text{corr}} = \Delta m / (A \cdot \rho \cdot t) \quad (3-4)$$

式中， Δm = 質量損失(g)

A = 試片暴露面積(m^2)

t = 暴露時間，年(year)

ρ = 金屬材料之密度 (g/cm^3)

第四章 大氣腐蝕因子與現地暴露試驗

4.1 氯鹽沉積速率調查結果

各試驗點採樣之氯鹽沉積速率計算結果如表 4-1。採樣的調查期間分別為 2023.10-2023.12(秋季)，2024.01-2024.03(冬季)，2024.04-2024.06(春季)，2024.07-2024.09(夏季)。

2023.10-2023.12 秋季期間，氯鹽沉積速率介於 $0.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (太魯閣國家公園)至 $103.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (澎湖工務段)之間，其餘相對較高的沉積速率依序為新竹安檢所、十八王公橋，所測得的氯鹽沉積速率均為 CNS 13401 (ISO 9223)的分類標準 S2 ($60 < S2 \leq 300 \text{ mg/m}^2/\text{day}$)。山區試驗點(新中橫監工站、埔里工務段、霧社監工站、谷關工務段、復興工務段、石卓監工站)測得的氯鹽沉積速率介於 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 之間。高鐵三站以嘉義站氯鹽沉積速率較高為 $1.7 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，臺中站及左營站氯鹽沉積速率同為 $0.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 。

2024.01-2024.03 冬季期間，氯鹽沉積速率介於 $0.3 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (石卓監工站)至 $144.0 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (十八王公橋)之間，其次較高的沉積速率為 $101.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (澎湖工務段)，所測得的氯鹽沉積速率均為 CNS 13401 (ISO 9223)的分類標準 S2。山區試驗點測得的氯鹽沉積速率介於 $1.5 \sim 0.3 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 之間。高鐵三站以左營站氯鹽沉積速率較高為 $1.1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，嘉義站及臺中站氯鹽沉積速率依序為 $0.8 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 和 $0.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 。

2024.04-2024.06 春季期間，氯鹽沉積速率介於 $0.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (新中橫監工站)至 $21.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (外埔安檢所)之間，其餘相對較高的沉積速率依序為檳仔樹安檢所及基隆試驗線 100m，以上各試驗點測得的氯鹽沉積速率均大於 $14 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 。而山區試驗點以石卓監工站較高，氯鹽沉積速率為 $1.9 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，其餘山區試驗點測得的氯鹽沉積速率介於 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 。高鐵三站氯鹽沉積速率依序為左營站 1.8

mg/m²/day、臺中站 1.1 mg/m²/day、嘉義站 0.8 mg/m²/day。

2024.07-2024.09 夏季期間，氯鹽沉積速率介於 0.2 mg/m²/day (陽明山國家公園)至 75.7 mg/m²/day (十八王公橋)之間，其餘相對較高的沉積速率依序為花蓮港試驗線 0m 及檳仔樹安檢所，所測得的氯鹽沉積速率均大於 20 mg/m²/day。山區測點氯鹽沉積速率介於 0.7 ~ 0.2 mg/m²/day 之間。高鐵三站以左營站和臺中站較高，氯鹽沉積速率分別為 1.1 mg/m²/day 及 1.0 mg/m²/day，嘉義站氯鹽沉積速率則為 0.8 mg/m²/day。

整體而言，4 季中以秋、冬 2 季的氯鹽沉積速率較高，春、夏 2 季較低，較高的氯鹽沉積速率大多發生在秋、冬 2 季北部至西部沿海地區的試驗點；以地區來看，在距離海岸線較遠之山區的氯鹽沉積速率最低，多在 2 mg/m²/day 以下，在距離海岸線有一段距離的高鐵沿線 3 個車站氯鹽沉積速率亦在 2 mg/m²/day 以下，沿海地區以南部高雄沿海的氯鹽沉積速率較低，東部沿海地區以花蓮壽豐檳仔樹安檢所的氯鹽沉積速率較高，而外島地區以澎湖工務段的氯鹽沉積速率最高，且季節差異最大，在秋、冬 2 季的氯鹽沉積速率高於 100 mg/m²/day，而在春、夏 2 季的氯鹽沉積速率低於 10 mg/m²/day。

圖 4.1 為垂直海岸試驗線的平均氯鹽沉積速率圖。圖中顯示：高雄港試驗線及蘇澳港試驗線的平均氯鹽沉積速率較其他試驗線低，另西部沿海試驗線的氯鹽沉積速率通常在秋、冬 2 季較高。

關於氯鹽沉積速率，一般認為距離海岸愈遠的氯鹽沉積量愈少，本案調查結果顯示沿海地區試驗站的氯鹽沉積速率高於離海有一段距離的高鐵車站試驗站，又高於離海更遠的山區試驗站，符合此一概念；但在沿海試驗線的調查結果，部份試驗線之離岸 300m 氯鹽沉積量卻比 0m 的多，與此一概念不符，推測此一結果可能與試驗站所在地的地形、試驗架設置位置有關，後續或可就此議題做深入探討。

表 4-1 氣鹽沉積速率表

單位：mg/m²/day

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
1	基隆試驗線 0m	1.3	7.7	7.3	3.8
2	基隆試驗線 100m	13.7	27.6	14.7	2.7
3	梗枋安檢所	6.2	4.6	2.6	1.7
4	龍德產業園區	1.6	1.4	1.1	7.2
5	蘇澳港試驗線 0m	0.9	-	-	-
6	蘇澳港試驗線 300m	1.2	1.2	0.7	4.4
7	南澳安檢所	2.6	1.9	2.1	0.4
8	太魯閣國家公園	0.2	0.5	0.4	0.3
9	花蓮港試驗線 0m	25.7	4.3	8.1	25.0
10	花蓮港試驗線 100m	9.2	2.5	3.0	4.7
11	花蓮港試驗線 500m	5.0	3.4	3.3	-
12	橄仔樹安檢所	57.9	22.1	16.7	23.7
13	石梯安檢所	3.6	2.8	1.6	2.2
14	成功試驗線 0m	18.9	9.0	8.8	3.1
15	金樽安檢所	12.3	5.4	8.5	10.5
16	伽蘭安檢所	5.1	1.8	4.3	-
17	尚武安檢所	2.9	7.6	3.7	3.0
18	核三廠試驗線 0m	8.1	11.4	9.8	14.6
19	核三廠試驗線 100m	-	8.2	5.1	9.6
20	核三廠試驗線 300m	23.9	-	1.2	8.1
21	中鋼公司	3.6	3.7	1.4	1.0
22	高雄港試驗線 0m	2.1	1.5	0.7	-
23	高雄港試驗線 300m	4.5	1.8	2.0	1.4
24	高鐵左營站	0.6	1.1	1.8	1.0
25	興達火力電廠	1.4	0.9	1.1	1.7
26	成大水工所	-	2.2	1.0	0.5
27	東石安檢所	-	6.3	3.4	0.3
28	高鐵嘉義站	1.7	0.8	0.8	0.6
29	台塑六輕試驗線 0m	6.9	14.1	2.5	0.9
30	台塑六輕試驗線 300m	24.7	25.9	6.9	9.7
31	台塑六輕試驗線 800m	14.6	22.6	6.4	5.6
32	台塑六輕試驗線 2Km	5.1	13.1	3.4	2.4

項次	試驗地點 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
33	台塑六輕試驗線 3Km	1.8	4.3	1.1	0.8
34	王功安檢所	24.9	9.7	7.9	-
35	彰濱產業園區	44.9	13.2	9.2	-
36	高鐵臺中站	0.6	0.6	1.1	1.1
37	臺中火力電廠	-	4.2	2.5	1.2
38	臺中港試驗線 0m	25.4	8.8	3.0	2.0
39	臺中港試驗線 300m	4.6	2.1	3.0	0.5
40	臺中港試驗線 2Km	9.3	4.3	2.7	1.6
41	五甲安檢所	26.1	11.2	3.9	3.4
42	通霄火力電廠	4.8	4.9	2.2	1.6
43	外埔安檢所	43.8	30.9	21.6	9.5
44	平鎮產業園區	0.8	0.9	0.8	0.6
45	桃園試驗線 500m	11.4	18.5	4.4	-
46	桃園試驗線 2Km	6.1	7.7	2.7	1.8
47	臺北市區	0.7	1.9	0.8	1.5
48	陽明山國家公園	0.3	0.8	0.6	0.2
49	公路局雲嘉南區養護工程分局 阿里山工務段	0.3	0.5	0.5	0.6
50	東北角風景區福隆遊客中心	3.4	3.2	1.7	0.3
51	臺北港監測站	2.0	7.6	2.4	0.7
52	永安安檢所	4.0	4.4	4.9	6.1
53	新竹安檢所	92.2	31.7	9.8	11.3
54	金門水頭商港	19.2	43.7	2.2	3.8
55	高雄港 39 號碼頭	2.2	1.1	1.5	2.3
56	高雄港 75 號碼頭	0.6	1.5	1.2	7.1
57	公路局南區養護工程分局 澎湖工務段	103.6	101.2	7.2	3.4
58	馬祖福澳港碼頭	18.2	15.3	4.4	12.2
59	公路局中區養護工程分局 新中橫監工站	0.5	1.0	0.2	0.3
60	公路局中區養護工程分局 埔里工務段	0.3	1.0	0.3	0.2
61	公路局中區養護工程分局 霧社監工站	0.3	1.2	0.4	0.2

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
62	公路局中區養護工程分局谷關工務段	0.5	0.6	0.5	0.4
63	公路局北區養護工程分局復興工務段	0.5	1.5	0.5	0.6
64	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	0.3	0.3	1.9	0.7
65	十八王公橋	76.5	144.0	6.2	75.7

註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗，其中蘇澳港試驗線 0m 進行頂樓防水工程，於 2024.01-2024.09 暫停試驗。

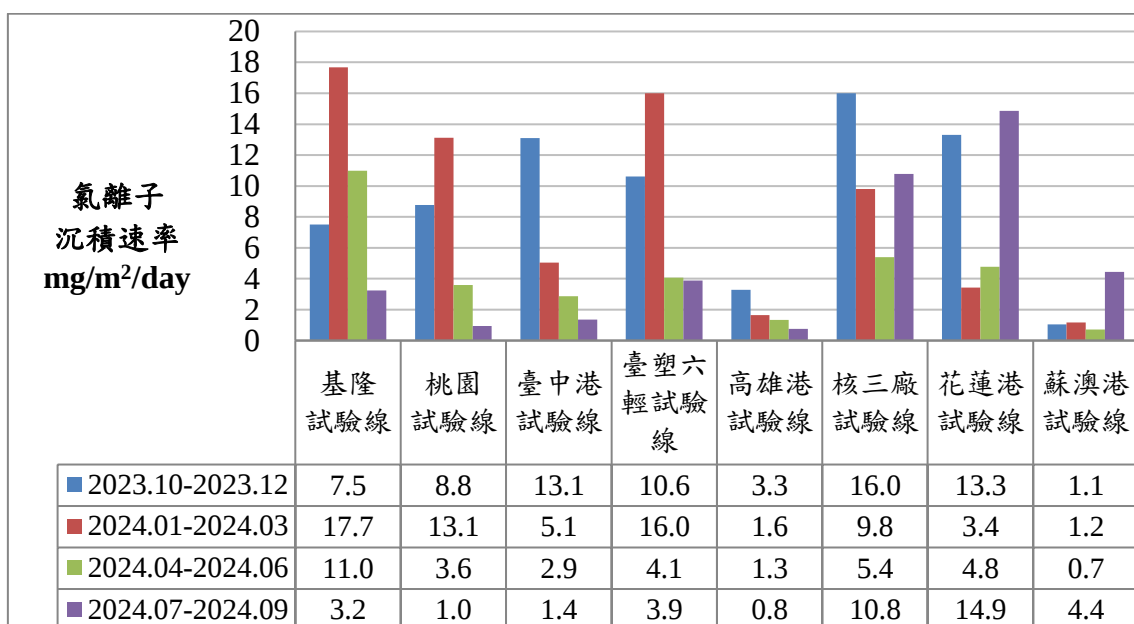


圖 4.1 垂直海岸試驗線之氯鹽平均沉積速率

4.2 二氧化硫沉積速率調查結果

表 4-2 為各試驗點二氧化硫沉積速率計算結果。採樣的調查時間與氯鹽沉積速率調查的時間相同，分別為 2023.10-2023.12(秋季)，2024.01-2024.03(冬季)，2024.04-2024.06(春季)，2024.07-2024.09(夏季)。

2023.10-2023.12 秋季期間，陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率最大 730.1 mg/m²/day，其餘介於太魯閣國家公園 2.8 mg/m²/day 至彰濱產業園區 205.5 mg/m²/day 之間。其餘相對較高的二氧化硫沉積速率依序為官田產業園區、十八王公橋、觀音產業園區、大發產業園區、陽明山國家公園、中鋼公司，其值為 CNS 13401 (ISO 9223) 的最高分類標準 P3(80<P3≤200 mg/m²/day)。高鐵三站的二氧化硫沉積速率介於 24.9~41.6 mg/m²/day 之間。

2024.01-2024.03 冬季期間，陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率最大 1604.6 mg/m²/day，其餘介於霧社監工站 20.7 mg/m²/day 至十八王公橋 317.4 mg/m²/day 之間。其餘相對較高的二氧化硫沉積速率依序為陽明山國家公園、觀音產業園區、官田產業園區、彰濱產業園區、中鋼公司、安平產業園區、澎湖工務段，其值皆超過 80 mg/m²/day，屬於分類標準 P3。高鐵三站的二氧化硫沉積速率介於 39.5 ~ 63.0 mg/m²/day 之間。

2024.04-2024.06 春季期間，陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率最大 1825.7 mg/m²/day，其餘介於復興工務段 6.9 mg/m²/day 至陽明山國家公園 156.1mg/m²/day 之間。較高的沉積速率依序為陽明山國家公園、官田產業園區及龍德產業園區，其值皆超過 80 mg/m²/day，屬於分類標準 P3。高鐵三站的二氧化硫沉積速率介於 30.6~65.5 mg/m²/day 之間。

2024.07-2024.09 夏季期間，陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率最大 1293.9 mg/m²/day，其餘介於太魯閣國家公園 7.7 mg/m²/day 至龍德產業園區 113.7 mg/m²/day 之間。較高的沉積速率發生在龍德產業園區及中鋼公司，其值皆超過 80 mg/m²/day，屬於分類標準 P3。高鐵三站

的二氧化硫沉積速率介於 $18.7 \sim 29.0 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 之間。

整體而言，除了靠近硫磺區的陽明山國家公園外，較高的二氧化硫沉積速率大多發生在西部產業園區及北部沿海十八王公橋，且以秋、冬 2 季較高。

表 4-3 及圖 4.2 為二氧化硫沉積速率在特定試驗點沉積速率。特定產業園區以彰濱產業園區、觀音產業園區及官田產業園區在秋、冬 2 季較高，且彰濱產業園區在秋季二氧化硫沉積速率為 $205.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 超過分類標準 P3，觀音產業園區、官田產業園區、大發產業園區及中鋼公司數值則落在 $91.8 \sim 192.9 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 屬於分類標準 P3。而東部龍德產業園區的數值反而在春、夏兩季較高，數值分別為 $96.8 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 和 $113.7 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 有達到分類標準 P3。

4 個電廠的二氧化硫沉積速率以臺中電廠冬季最高，超過 $80 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，達分類標準 P3 等級，中油林園廠、大潭電廠次之，數值 ($27.7 \sim 77.2 \text{ mg/m}^2/\text{day}$) 屬分類標準 P2 等級，通霄電廠的數值較低 ($22.3 \sim 38.4 \text{ mg/m}^2/\text{day}$)，屬分類標準 P1 等級或略高於 P1 等級；高鐵 3 個車站的二氧化硫沉積速率介於 $18.7 \sim 65.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，大多屬於分類標準 P1 或 P2 等級；臺北市的二氧化硫沉積速率介於 $16.5 \sim 32.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ ，屬分類標準 P1 等級。

表 4-2 二氧化硫沉積速率表

單位：mg/m²/day

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
1	龍德產業園區	43.2	45.4	96.8	113.7
2	和平產業園區	16.0	25.9	19.1	15.1
3	太魯閣國家公園管理處	2.8	23.1	15.8	7.7
4	美崙產業園區	13.1	28.2	17.0	12.6
5	豐樂產業園區	16.1	32.4	22.9	18.7
6	屏東產業園區	42.5	55.5	27.1	9.3
7	中油林園廠	71.0	77.2	40.7	27.7
8	中鋼公司	100.3	127.7	56.5	106.7
9	鳳山產業園區	47.8	60.6	37.9	23.9
10	大發產業園區	152.5	91.8	52.9	28.1
11	高鐵左營站	41.3	63.0	35.2	29.0
12	永安產業園區	53.7	83.4	35.5	23.5
13	興達火力電廠	58.2	67.1	41.7	21.7
14	安平產業園區	77.5	122.4	43.5	23.3
15	成大水工試驗所	46.3	51.8	36.0	26.7
16	官田產業園區	192.9	154.7	128.0	21.9
17	朴子產業園區	52.1	70.0	52.9	12.0
18	高鐵嘉義站	41.6	61.1	65.5	18.7
19	斗六產業園區	43.2	49.2	32.6	18.8
20	彰濱產業園區	205.5	138.1	49.8	12.7
21	田中產業園區	32.4	50.5	38.7	19.7
22	南崗產業園區	22.7	36.6	25.7	20.4
23	大里產業園區	20.7	35.2	18.4	15.2
24	高鐵臺中站	24.9	39.5	30.6	19.5
25	臺中產業園區	24.8	37.8	37.8	20.2
26	臺中港關連產業園區	29.9	41.1	37.9	32.4
27	臺中火力電廠	-	99.4	44.4	46.3
28	臺中港試驗線 300m	17.0	37.7	45.3	27.6
29	通霄火力電廠	25.0	38.4	26.7	22.3
30	竹南產業園區	28.3	38.1	34.5	23.3
31	頭份產業園區	17.2	61.4	22.5	20.8

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
32	工業技術研究院	23.4	32.7	33.5	22.1
33	新竹產業園區	25.2	34.9	21.2	20.6
34	平鎮產業園區	19.8	41.1	21.6	17.9
35	桃園試驗線 500m(大潭電廠)	68.8	76.5	49.8	37.6
36	桃園試驗線 2Km	39.4	43.8	38.3	43.5
37	樹林產業園區	23.9	41.1	22.2	16.1
38	臺北市自來水事業處	18.8	32.6	16.5	22.3
39	陽明山國家公園管理處	103.9	195.3	156.1	74.6
40	陽明山硫磺區	730.1	1604.6	1825.7	1293.9
41	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	15.5	27.7	30.3	11.0
42	平鎮產業園區(服務中心)	24.9	47.3	22.3	21.3
43	觀音產業園區(服務中心)	154.5	181.2	56.0	35.1
44	東北角風景區福隆遊客中心	20.4	24.4	20.1	60.1
45	永安安檢所	63.8	35.4	49.5	37.8
46	金門水頭商港	39.6	44.8	28.3	26.6
47	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	69.5	109.9	26.5	32.5
48	馬祖福澳港碼頭	21.4	42.5	21.5	29.1
49	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	3.8	21.3	14.9	9.6
50	公路局中區養護工程分局埔里工務段	25.2	38.0	32.9	-
51	公路局中區養護工程分局霧社監工站	7.1	20.7	11.8	8.0
52	公路局中區養護工程分局谷關工務段	8.1	20.8	14.4	9.1
53	公路局北區養護工程分局復興工務段	7.0	21.9	6.9	15.3
54	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	4.1	23.4	8.7	9.2
55	十八王公橋	155.0	317.4	78.2	36.6

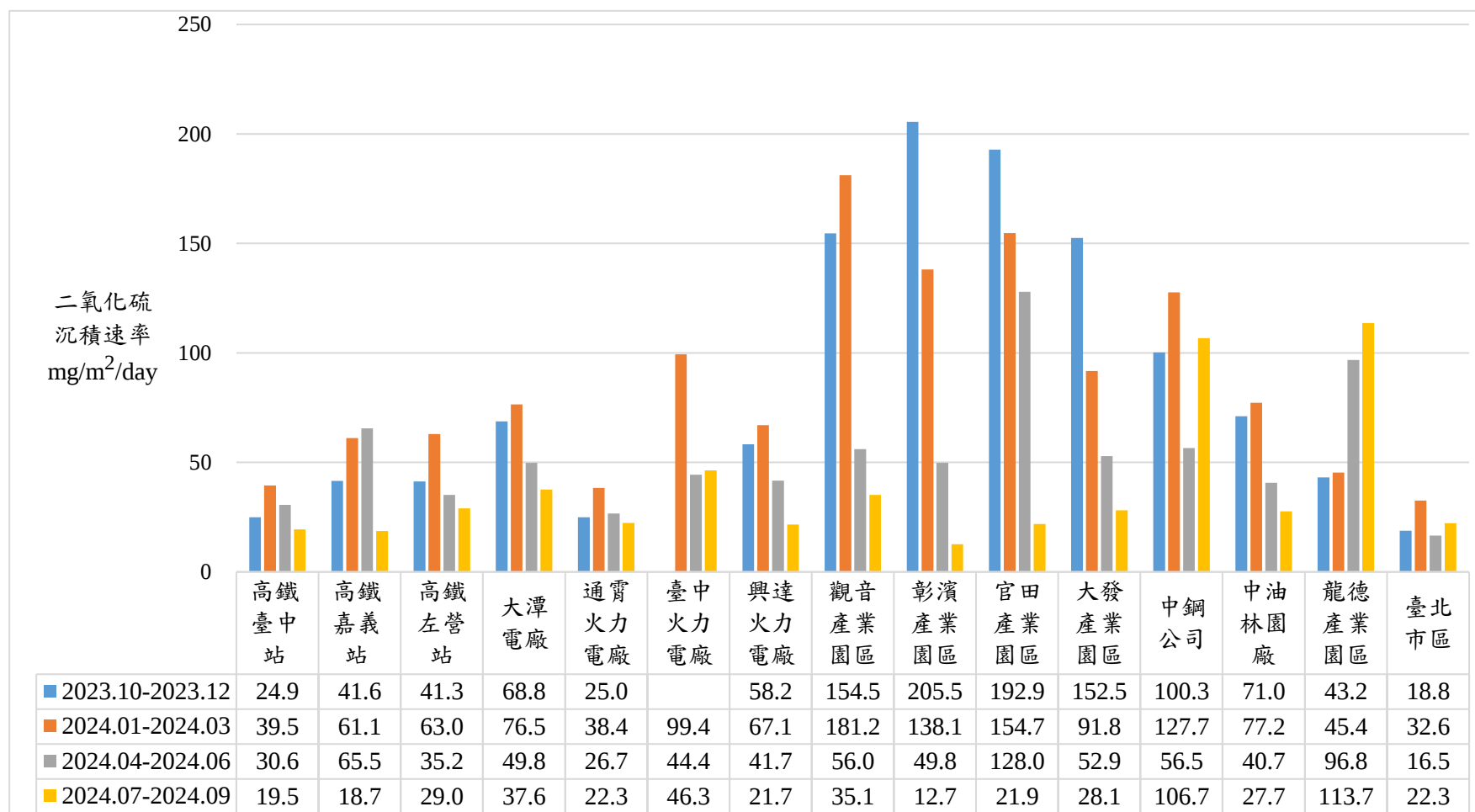
註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗。

表 4-3 特定試驗點之二氧化硫沉積速率表

單位：mg/m²/day

試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 – 2024.03	2024.04 – 2024.06	2024.07 – 2024.09
高鐵臺中站	24.9	39.5	30.6	19.5
高鐵嘉義站	41.6	61.1	65.5	18.7
高鐵左營站	41.3	63.0	35.2	29.0
大潭火力電廠	68.8	76.5	49.8	37.6
通霄火力電廠	25.0	38.4	26.7	22.3
臺中火力電廠	-	99.4	44.4	46.3
興達火力電廠	58.2	67.1	41.7	21.7
觀音產業園區	154.5	181.2	56.0	35.1
彰濱產業園區	205.5	138.1	49.8	12.7
官田產業園區	192.9	154.7	128.0	21.9
大發產業園區	152.5	91.8	52.9	28.1
中鋼公司	100.3	127.7	56.5	106.7
中油林園廠	71.0	77.2	40.7	27.7
龍德產業園區	43.2	45.4	96.8	113.7
臺北市區	18.8	32.6	16.5	22.3

註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗。



註：表格空白表示試片遺失或試驗地點施工暫停試驗。

圖 4.2 特定試驗點之二氧化硫沉積速率

4.3 現地暴露試驗結果

碳鋼、鋅、銅、鋁 4 種金屬 4 季在各試驗點採樣之腐蝕速率計算結果，分別彙整於表 4-4 至表 4-7，以下分別說明各季各金屬試驗結果。(試驗之腐蝕生成物清除檢量線、腐蝕速率等位線分布圖、腐蝕環境分類圖詳見附錄一)

秋季調查期間 2023.10-2023.12，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 $30.0 \mu\text{m/yr}$ (霧社監工站)至 $556.5 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 $537.9 \mu\text{m/yr}$ (十八王公橋)、 $511.2 \mu\text{m/yr}$ (王功安檢所)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 $6.0 \mu\text{m/yr}$ (高鐵臺中站及左營站)至 $39.0 \mu\text{m/yr}$ (臺中港試驗線 0m)之間；其他依序以 $38.1 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 300m)、 $37.0 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)及 $35.5 \mu\text{m/yr}$ (高雄港試驗線 300m)試片腐蝕速率較大。銅金屬介於 $07 \mu\text{m/yr}$ (新中橫監工站)至 $58.4 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 $39.7 \mu\text{m/yr}$ (王功安檢所)、 $36.9 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 300m)、 $31.9 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 0m)、 $31.5 \mu\text{m/yr}$ (東石安檢所)試片腐蝕速率較大。而鋁金屬則介於 $0.2 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (霧社監工站) 至 $42.1 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (臺中港試驗線 0m)之間，其他依序以 $26.4 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (台塑六輕試驗線 2Km)、 $25.5 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (王功安檢所)及 $22.7 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (陽明山硫磺區)。

冬季調查期間 2024.01-2024.03，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 $37.1 \mu\text{m/yr}$ (高雄港試驗線 0m)至 $549.8 \mu\text{m/yr}$ (十八王公橋)之間；其他依序以 $438.9 \mu\text{m/yr}$ (基隆試驗線 100m)、 $362.2 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)及 $352.9 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 300m)、 $345.1 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 800m)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 $6.0 \mu\text{m/yr}$ (斗六產業園區)至 $54.9 \mu\text{m/yr}$ (澎湖工務段)；其他依序以 $43.5 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 300m)、 $39.5 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 800m)及 $37.6 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)試片腐蝕速率較大；銅金屬介於 $0.5 \mu\text{m/yr}$ (新中橫監工站)至 $95.7 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 $30.2 \mu\text{m/yr}$ (王功安檢所)、 $29.2 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 300m)及 $29.1 \mu\text{m/yr}$ (十八王公橋)試片腐蝕速率較大；而鋁金屬則

介於 $1.2 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (新中橫監工站)至 $36.7 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (台塑六輕試驗線 2Km)之間，其他依序以 $35.2 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (王功安檢所)、 $29.2 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (台塑六輕試驗線 300m)及 $25.8 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (台塑六輕試驗線 800m)試片腐蝕速率較大。

春季調查期間 2024.04-2024.06，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 $17.0 \mu\text{m/yr}$ (霧社監工站)至 $691.0 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 $480.5 \mu\text{m/yr}$ (澎湖工務段)、 $476.4 \mu\text{m/yr}$ (十八王公橋)及 $311.6 \mu\text{m/yr}$ (王功安檢所)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 $2.6 \mu\text{m/yr}$ (基隆試驗線 0m)至 $26.8 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)；其他依序以 $24.4 \mu\text{m/yr}$ (外埔安檢所)、 $23.5 \mu\text{m/yr}$ (彰濱產業園區)及 $23.4 \mu\text{m/yr}$ (台塑六輕試驗線 800m)試片腐蝕速率較大；銅金屬介於 $0.2 \mu\text{m/yr}$ (平鎮產業園區服務中心)至 $82.3 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 $40.4 \mu\text{m/yr}$ (伽蘭安檢所)、 $30.7 \mu\text{m/yr}$ (王功安檢所)及 $27.0 \mu\text{m/yr}$ (陽明山國家公園管理處)試片腐蝕速率較大；而鋁金屬則介於 $0.4 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (谷關工務段)至 $22.8 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (陽明山硫磺區)之間，其他依序以 $17.5 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (永安安檢所)、 $15.4 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (台塑六輕試驗線 300m)、 $13.6 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (桃園試驗線 500m)及 $13.1 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (東石安檢所)試片腐蝕速率較大。

夏季調查期間 2024.07-2024.09，碳鋼金屬大氣腐蝕速率介於 $18.7 \mu\text{m/yr}$ (石卓監工站)至 $820.6 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 $236.5 \mu\text{m/yr}$ (馬祖福澳港碼頭)及 $224.5 \mu\text{m/yr}$ (十八王公橋)、 $203.8 \mu\text{m/yr}$ (永安安檢所)試片腐蝕速率較大。鋅金屬介於 $4.9 \mu\text{m/yr}$ (頭份產業園區)至 $66.0 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)；其他依序以 $36.8 \mu\text{m/yr}$ (永安安檢所)、 $23.8 \mu\text{m/yr}$ (臺中港關連產業園區)及 $23.5 \mu\text{m/yr}$ (新竹安檢所)試片腐蝕速率較大；銅金屬介於 $0.7 \mu\text{m/yr}$ (新中橫監工站)至 $83.0 \mu\text{m/yr}$ (陽明山硫磺區)之間；其他依序以 $23.9 \mu\text{m/yr}$ (永安安檢所)、 $20.8 \mu\text{m/yr}$ (桃園試驗線 500m)及 $20.5 \mu\text{m/yr}$ (伽蘭安檢所)試片腐蝕速率較大；而鋁金屬則介於 $0.9 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (埔里工務段及石卓監工站)至 $13.8 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (陽明山硫磺區)之間，其他依序以 $12.2 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (十八王公橋)、 $9.1 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (桃園試驗線 500m)、 $7.9 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (觀音產業園區服務中心)及 $7.4 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ (馬祖福澳港碼頭)試片腐蝕速率較大。

表 4-4 碳鋼金屬之腐蝕速率表

單位：μm/yr

項次	試驗地點	試驗期間 2023.10 - 2023.12	2024.01 – 2024.03	2024.04 – 2024.06	2024.07 – 2024.09
1	基隆試驗線 0m	160.6	261.3	126.4	154.5
2	基隆試驗線 100m	261.5	438.9	220.9	146.6
3	梗枋安檢所	168.7	128.0	140.7	155.6
4	龍德產業園區	125.6	111.3	218.4	170.9
5	蘇澳港試驗線 0m	-	-	-	-
6	蘇澳港試驗線 300m	116.3	135.1	117.2	90.1
7	南澳安檢所	123.8	100.8	137.6	146.2
8	和平產業園區	79.2	74.7	100.1	61.1
9	太魯閣國家公園管理處	101.4	76.2	92.5	52.2
10	美崙產業園區	107.0	138.1	113.0	77.0
11	花蓮港試驗線 0m	156.2	279.3	181.1	130.3
12	花蓮港試驗線 100m	97.2	122.8	115.0	82.1
13	花蓮港試驗線 500m	95.4	135.1	125.5	76.4
14	橄仔樹安檢所	147.7	249.3	212.3	140.9
15	石梯安檢所	125.0	150.5	156.8	77.0
16	成功安檢所	118.7	118.1	156.8	140.3
17	金樽安檢所	112.1	102.7	155.5	125.8
18	伽藍安檢所	107.6	105.1	160.6	154.3
19	豐樂產業園區	75.1	56.0	95.1	108.8
20	尚武安檢所	140.7	128.4	126.9	122.3
21	核三廠試驗線 0m	153.1	128.5	119.9	155.5
22	核三廠試驗線 100m	132.5	129.8	111.2	137.2
23	核三廠試驗線 300m	158.0	136.3	117.6	157.7
24	屏東產業園區	74.2	46.0	98.0	106.6
25	中油林園廠	85.7	61.5	115.0	157.6
26	中鋼公司	109.6	76.7	135.7	171.0
27	鳳山產業園區	70.5	51.9	90.6	73.7
28	大發產業園區	96.1	60.7	185.6	115.6
29	高雄港試驗線 0m	67.6	37.1	114.9	121.9
30	高雄港試驗線 300m	103.9	79.9	134.8	122.1
31	高鐵左營站	82.0	47.0	156.9	143.2
32	永安產業園區	267.9	122.8	117.7	107.8
33	興達火力電廠	106.6	99.5	93.6	138.9

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
34	安平產業園區	108.7	93.1	82.1	114.1
35	成大水工試驗所	129.3	104.7	80.6	76.1
36	官田產業園區	101.2	107.3	86.5	78.8
37	東石安檢所	243.8	229.0	175.9	131.8
38	朴子產業園區	171.6	98.6	110.9	84.5
39	高鐵嘉義站	98.1	89.5	78.4	76.4
40	斗六產業園區	--	41.1	44.3	44.0
41	台塑六輕試驗線 0m	140.3	314.9	172.7	151.7
42	台塑六輕試驗線 300m	129.6	352.9	230.8	154.6
43	台塑六輕試驗線 800m	147.6	345.1	212.0	140.6
44	台塑六輕試驗線 2Km	145.3	318.1	198.9	128.3
45	台塑六輕試驗線 3Km	133.4	250.3	177.0	136.2
46	王功安檢所	511.2	336.4	311.6	146.9
47	彰濱產業園區	217.9	203.5	138.6	97.5
48	田中產業園區	76.6	53.7	54.4	55.6
49	南崗產業園區	73.0	77.8	116.5	115.6
50	大里產業園區	54.3	71.2	107.3	94.3
51	高鐵臺中站	82.4	38.0	78.4	65.3
52	臺中產業園區	129.2	112.0	136.1	117.0
53	臺中港關連產業園區	189.9	136.5	149.2	129.3
54	臺中火力電廠	78.1	177.7	95.6	94.9
55	臺中港試驗線 0m	197.8	159.8	77.9	84.2
56	臺中港試驗線 300m	143.7	115.3	101.1	80.2
57	臺中港試驗線 2Km	186.6	119.0	101.9	101.3
58	五甲安檢所	--	187.7	143.1	120.4
59	通霄火力電廠	81.6	114.6	76.1	69.6
60	外埔安檢所	252.8	244.9	176.3	122.0
61	竹南產業園區	98.2	112.4	85.7	106.1
62	頭份產業園區	107.0	99.8	86.3	73.3
63	工業技術研究院	93.0	100.3	62.2	49.7
64	新竹產業園區	78.5	133.0	57.3	49.3
65	平鎮產業園區	106.7	158.9	140.5	94.6
66	桃園試驗線 500m	86.3	269.6	152.8	141.5
67	桃園試驗線 2Km	98.8	246.0	132.7	72.3
68	樹林產業園區	68.1	105.9	61.0	53.7
69	臺北市自來水事業處	70.4	119.3	69.5	51.0

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
70	陽明山國家公園管理處	177.8	318.5	146.8	63.8
71	陽明山硫磺區	556.5	362.2	691.0	820.6
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	79.7	42.0	59.5	47.1
73	東北角風景區福隆遊客中心	179.1	265.3	204.9	158.9
74	臺北港監測站	107.3	199.4	78.8	55.0
75	平鎮產業園區(服務中心)	100.6	214.4	94.1	55.5
76	觀音產業園區(服務中心)	177.1	237.9	179.0	96.9
77	永安安檢所	167.4	247.0	218.0	203.8
78	新竹安檢所	--	259.6	195.4	141.0
79	金門水頭商港	97.4	95.0	97.8	155.5
80	高雄港 39 號碼頭	148.4	87.3	112.7	84.5
81	高雄港 75 號碼頭	89.4	73.5	117.6	114.1
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	239.8	264.3	480.5	151.7
83	馬祖福澳港碼頭	212.5	147.0	119.5	236.5
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	33.1	40.0	55.6	19.2
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	64.8	69.1	48.3	50.3
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	33.0	55.5	17.0	25.1
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	36.1	52.3	37.1	27.8
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	47.9	68.4	44.7	26.8
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	39.1	50.9	20.3	18.7
90	十八王公橋	537.9	549.8	476.4	224.5

註：1. - 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗，其中蘇澳港試驗線 0m 進行頂樓防水工程，2023.10-2023.12 試體遺失，2024.01-2024.09 暫停試驗。

2. -- 表示試驗數值與過去數值差異過大，不予採用。

表 4-5 鋅金屬之腐蝕速率表

單位：μm/yr

項次	試驗地點	試驗期間 2023.10 - 2023.12	2024.01 – 2024.03	2024.04 – 2024.06	2024.07 – 2024.09
1	基隆試驗線 0m	7.5	12.5	2.6	15.5
2	基隆試驗線 100m	11.7	20.0	7.4	14.7
3	梗枋安檢所	13.6	13.5	6.5	8.9
4	龍德產業園區	9.2	15.9	9.6	21.7
5	蘇澳港試驗線 0m	-	-	-	-
6	蘇澳港試驗線 300m	6.2	16.7	4.9	8.5
7	南澳安檢所	7.9	13.8	6.7	9.5
8	和平產業園區	8.0	10.2	5.0	9.1
9	太魯閣國家公園管理處	11.7	11.8	13.0	14.5
10	美崙產業園區	11.4	19.0	5.4	10.8
11	花蓮港試驗線 0m	12.8	12.4	18.3	16.1
12	花蓮港試驗線 100m	8.4	8.6	5.5	11.1
13	花蓮港試驗線 500m	11.1	12.9	6.7	14.9
14	橄仔樹安檢所	18.2	24.4	20.0	18.0
15	石梯安檢所	8.9	21.2	10.4	15.9
16	成功安檢所	10.2	18.5	8.8	15.2
17	金樽安檢所	7.8	12.9	12.8	13.0
18	伽藍安檢所	14.5	27.7	19.9	18.8
19	豐樂產業園區	8.2	11.8	7.9	12.4
20	尚武安檢所	9.5	22.2	8.3	8.9
21	核三廠試驗線 0m	19.6	23.6	11.6	9.6
22	核三廠試驗線 100m	14.8	23.3	11.0	8.8
23	核三廠試驗線 300m	19.8	21.4	10.3	8.0
24	屏東產業園區	7.2	12.5	4.9	8.7
25	中油林園廠	8.2	15.4	7.4	12.7
26	中鋼公司	34.4	15.4	7.1	11.8
27	鳳山產業園區	10.9	9.1	6.4	12.3
28	大發產業園區	15.7	8.6	9.8	15.8
29	高雄港試驗線 0m	12.3	6.3	5.7	16.0
30	高雄港試驗線 300m	35.5	13.4	9.2	9.5
31	高鐵左營站	6.0	6.9	6.2	11.4
32	永安產業園區	14.2	8.5	9.0	11.9
33	興達火力電廠	14.1	8.6	11.3	10.4

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
34	安平產業園區	17.0	6.8	8.6	8.7
35	成大水工試驗所	10.3	6.8	14.9	8.5
36	官田產業園區	8.7	6.9	5.8	10.1
37	東石安檢所	33.4	19.9	22.7	15.0
38	朴子產業園區	11.2	13.2	5.3	12.1
39	高鐵嘉義站	9.8	10.6	8.7	7.3
40	斗六產業園區	7.6	6.0	6.4	5.1
41	台塑六輕試驗線 0m	34.5	22.3	12.5	8.2
42	台塑六輕試驗線 300m	38.1	43.5	14.3	11.0
43	台塑六輕試驗線 800m	34.5	39.5	23.4	10.0
44	台塑六輕試驗線 2Km	20.6	22.8	10.7	11.2
45	台塑六輕試驗線 3Km	26.2	21.6	15.8	12.2
46	王功安檢所	32.2	16.1	18.8	9.9
47	彰濱產業園區	23.9	16.6	23.5	14.6
48	田中產業園區	7.6	8.5	4.4	10.6
49	南崗產業園區	7.9	7.9	4.6	10.9
50	大里產業園區	7.1	6.1	6.8	18.2
51	高鐵臺中站	6.0	7.5	7.0	9.7
52	臺中產業園區	8.9	8.0	3.2	17.6
53	臺中港關連產業園區	16.1	21.8	6.0	23.8
54	臺中火力電廠	16.9	-	18.2	8.2
55	臺中港試驗線 0m	39.0	25.3	11.8	7.8
56	臺中港試驗線 300m	13.4	11.9	6.8	6.0
57	臺中港試驗線 2Km	17.4	13.3	7.7	10.5
58	五甲安檢所	33.9	24.4	17.6	15.9
59	通霄火力電廠	10.6	10.5	6.7	16.6
60	外埔安檢所	23.8	26.6	24.4	16.9
61	竹南產業園區	7.2	7.7	9.3	5.6
62	頭份產業園區	9.1	7.5	6.4	4.9
63	工業技術研究院	11.3	11.3	5.2	9.2
64	新竹產業園區	7.7	14.0	10.6	11.5
65	平鎮產業園區	7.3	13.0	6.6	13.2
66	桃園試驗線 500m	9.6	21.9	16.7	21.2
67	桃園試驗線 2Km	9.5	12.1	5.7	6.7
68	樹林產業園區	8.2	8.5	4.3	9.0
69	臺北市自來水事業處	7.9	9.4	5.2	15.2

項次	試驗地點	試驗期間 2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
70	陽明山國家公園管理處	8.6	18.3	16.3	6.4
71	陽明山硫磺區	37.0	37.6	26.8	66.0
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	6.6	11.3	7.4	8.8
73	東北角風景區福隆遊客中心	11.9	10.4	10.7	13.8
74	臺北港監測站	9.1	8.5	11.4	7.0
75	平鎮產業園區(服務中心)	13.5	15.1	8.5	5.2
76	觀音產業園區(服務中心)	8.7	19.5	8.2	10.1
77	永安安檢所	16.4	34.0	12.5	36.8
78	新竹安檢所	30.3	20.5	12.7	23.5
79	金門水頭商港	8.1	11.1	5.6	18.6
80	高雄港 39 號碼頭	14.8	9.5	8.1	13.0
81	高雄港 75 號碼頭	11.5	9.2	6.4	10.4
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	15.5	54.9	22.7	21.4
83	馬祖福澳港碼頭	14.5	14.1	7.0	20.7
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	18.0	7.5	11.6	16.3
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	8.0	8.1	9.8	10.7
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	8.7	8.5	6.6	12.2
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	8.0	10.7	9.5	14.9
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	8.5	9.3	8.3	6.9
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	6.6	11.4	6.5	10.0
90	十八王公橋	18.3	31.7	19.7	17.0

註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗，其中蘇澳港試驗線 0m 進行頂樓防水工程，2023.10-2023.12 試體遺失，2024.01-2024.09 暫停試驗。

表 4-6 銅金屬之腐蝕速率表

單位：μm/yr

項次	試驗地點	試驗期間 2023.10 - 2023.12	2024.01 – 2024.03	2024.04 – 2024.06	2024.07 – 2024.09
1	基隆試驗線 0m	10.1	9.8	8.8	15.2
2	基隆試驗線 100m	21.8	14.4	11.1	16.4
3	梗枋安檢所	9.9	14.0	10.5	12.9
4	龍德產業園區	9.3	10.1	15.5	15.7
5	蘇澳港試驗線 0m	-	-	-	-
6	蘇澳港試驗線 300m	3.2	10.2	4.1	1.8
7	南澳安檢所	6.0	7.2	6.9	7.5
8	和平產業園區	2.2	2.5	1.5	1.5
9	太魯閣國家公園管理處	1.6	1.5	1.6	1.3
10	美崙產業園區	7.4	8.5	4.4	2.5
11	花蓮港試驗線 0m	12.5	13.5	16.5	10.7
12	花蓮港試驗線 100m	7.6	9.9	6.8	4.2
13	花蓮港試驗線 500m	8.5	9.9	9.1	3.7
14	橄仔樹安檢所	13.7	21.8	15.8	16.8
15	石梯安檢所	9.0	7.9	9.7	6.6
16	成功安檢所	12.2	11.9	17.9	13.4
17	金樽安檢所	10.9	11.0	17.9	11.8
18	伽藍安檢所	18.0	25.5	40.4	20.5
19	豐樂產業園區	3.1	3.7	2.2	2.6
20	尚武安檢所	10.6	11.6	12.8	6.1
21	核三廠試驗線 0m	16.7	19.4	14.1	11.5
22	核三廠試驗線 100m	16.1	19.7	13.3	9.8
23	核三廠試驗線 300m	17.3	16.1	12.8	6.4
24	屏東產業園區	3.3	2.1	4.3	3.3
25	中油林園廠	5.7	4.4	4.0	4.8
26	中鋼公司	6.7	5.2	5.9	7.4
27	鳳山產業園區	5.4	2.4	2.9	3.0
28	大發產業園區	6.8	3.6	5.9	5.7
29	高雄港試驗線 0m	2.6	1.9	3.2	5.5
30	高雄港試驗線 300m	8.9	9.0	8.4	6.8
31	高鐵左營站	5.3	2.9	3.5	3.6
32	永安產業園區	8.5	1.4	6.3	5.4
33	興達火力電廠	9.6	8.5	9.2	9.5

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
34	安平產業園區	7.8	8.8	6.3	5.7
35	成大水工試驗所	9.5	5.2	5.5	5.0
36	官田產業園區	8.4	7.0	7.5	4.5
37	東石安檢所	31.5	20.7	19.0	16.9
38	朴子產業園區	9.1	4.7	6.3	3.6
39	高鐵嘉義站	7.0	4.6	4.1	2.9
40	斗六產業園區	1.8	1.3	2.7	2.0
41	台塑六輕試驗線 0m	31.9	22.7	13.9	10.7
42	台塑六輕試驗線 300m	36.9	29.2	17.0	11.1
43	台塑六輕試驗線 800m	24.6	27.3	13.2	7.8
44	台塑六輕試驗線 2Km	15.7	20.2	6.3	6.0
45	台塑六輕試驗線 3Km	22.7	20.5	12.2	9.4
46	王功安檢所	39.7	30.2	30.7	14.1
47	彰濱產業園區	28.0	13.2	10.0	6.1
48	田中產業園區	4.9	3.2	4.2	3.6
49	南崗產業園區	3.0	1.8	3.0	3.4
50	大里產業園區	1.8	1.4	2.0	2.2
51	高鐵臺中站	3.8	2.2	2.6	3.2
52	臺中產業園區	6.3	4.9	3.2	4.1
53	臺中港關連產業園區	26.2	15.8	5.2	4.6
54	臺中火力電廠	29.0	18.5	7.1	5.3
55	臺中港試驗線 0m	27.0	14.5	5.1	5.7
56	臺中港試驗線 300m	19.1	16.1	6.0	4.8
57	臺中港試驗線 2Km	23.1	13.3	5.7	5.9
58	五甲安檢所	22.5	17.6	13.4	17.7
59	通霄火力電廠	16.3	15.6	4.8	5.5
60	外埔安檢所	23.8	17.0	14.0	20.4
61	竹南產業園區	5.3	6.5	4.6	8.4
62	頭份產業園區	5.6	9.0	2.7	4.0
63	工業技術研究院	5.7	8.1	3.0	3.6
64	新竹產業園區	4.1	5.0	2.3	2.9
65	平鎮產業園區	4.1	4.4	3.7	3.6
66	桃園試驗線 500m	10.5	10.4	7.6	20.8
67	桃園試驗線 2Km	9.5	9.6	0.4	4.3
68	樹林產業園區	2.6	2.0	1.8	3.2
69	臺北市自來水事業處	7.6	6.8	3.8	2.5

項次	試驗地點	試驗期間 2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
70	陽明山國家公園管理處	18.6	24.8	27.0	14.8
71	陽明山硫磺區	58.4	95.7	83.2	83.0
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	2.5	3.6	2.5	1.4
73	東北角風景區福隆遊客中心	8.4	8.0	5.9	7.7
74	臺北港監測站	3.7	6.3	1.2	2.7
75	平鎮產業園區(服務中心)	11.0	9.7	0.2	3.3
76	觀音產業園區(服務中心)	9.6	10.7	6.2	3.7
77	永安安檢所	13.1	10.1	10.4	23.9
78	新竹安檢所	25.0	15.7	16.3	19.9
79	金門水頭商港	5.5	3.1	3.6	9.3
80	高雄港 39 號碼頭	21.6	5.6	1.8	4.6
81	高雄港 75 號碼頭	5.8	4.3	6.0	8.4
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	16.1	22.7	20.2	14.3
83	馬祖福澳港碼頭	14.0	9.4	5.7	17.9
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	0.7	0.5	1.9	0.7
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	4.3	3.5	4.7	4.3
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	1.1	0.6	2.5	0.9
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	2.0	1.3	3.8	1.7
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	2.2	2.0	4.0	2.5
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	2.5	2.0	1.5	1.1

註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗，其中蘇澳港試驗線 0m 進行頂樓防水工程，2023.10-2023.12 試體遺失，2024.01-2024.09 暫停試驗。

表 4-7 鋁金屬之腐蝕速率表

單位：g/m²/yr

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
1	基隆試驗線 0m	4.8	7.9	4.5	4.0
2	基隆試驗線 100m	8.4	11.9	7.1	4.6
3	梗枋安檢所	2.6	10.7	4.7	3.3
4	龍德產業園區	1.6	5.2	5.4	6.0
5	蘇澳港試驗線 0m	-	-	-	-
6	蘇澳港試驗線 300m	4.3	-	4.8	4.0
7	南澳安檢所	1.5	3.6	3.5	2.8
8	和平產業園區	1.2	2.1	1.4	1.2
9	太魯閣國家公園管理處	1.0	1.7	2.9	1.0
10	美崙產業園區	2.4	4.3	4.8	1.6
11	花蓮港試驗線 0m	9.6	12.9	6.9	2.9
12	花蓮港試驗線 100m	2.6	5.6	3.5	1.8
13	花蓮港試驗線 500m	2.9	6.2	3.7	1.2
14	橄仔樹安檢所	6.1	22.3	7.3	2.6
15	石梯安檢所	2.6	5.9	4.4	2.2
16	成功安檢所	3.8	6.2	6.1	4.4
17	金樽安檢所	2.5	5.3	7.3	4.1
18	伽藍安檢所	3.6	7.5	9.2	3.6
19	豐樂產業園區	0.9	1.5	2.3	3.5
20	尚武安檢所	3.4	5.1	3.2	3.4
21	核三廠試驗線 0m	4.6	7.5	3.5	3.7
22	核三廠試驗線 100m	3.6	9.4	2.4	3.4
23	核三廠試驗線 300m	5.2	11.4	3.2	4.1
24	屏東產業園區	1.7	2.6	1.4	3.1
25	中油林園廠	2.8	4.4	3.1	4.0
26	中鋼公司	6.3	8.5	5.8	5.7
27	鳳山產業園區	3.0	2.6	1.9	2.2
28	大發產業園區	3.4	4.1	1.6	3.3
29	高雄港試驗線 0m	2.9	3.7	1.3	3.2
30	高雄港試驗線 300m	8.7	10.6	4.6	2.8
31	高鐵左營站	1.5	2.6	3.5	2.9
32	永安產業園區	-	13.4	3.4	2.6
33	興達火力電廠	6.5	6.1	4.4	4.5

項次	試驗地點 \ 試驗期間	2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
34	安平產業園區	4.2	3.0	3.6	3.5
35	成大水工試驗所	7.5	3.7	2.4	3.1
36	官田產業園區	3.5	2.2	2.1	2.8
37	東石安檢所	18.1	21.0	13.1	6.2
38	朴子產業園區	9.9	9.4	-	2.0
39	高鐵嘉義站	6.6	10.8	3.5	2.6
40	斗六產業園區	3.7	1.2	3.1	1.9
41	台塑六輕試驗線 0m	10.4	12.1	8.8	4.1
42	台塑六輕試驗線 300m	17.6	29.2	15.4	4.3
43	台塑六輕試驗線 800m	16.0	25.8	12.9	5.9
44	台塑六輕試驗線 2Km	26.4	36.7	10.3	2.6
45	台塑六輕試驗線 3Km	9.6	11.9	7.9	3.0
46	王功安檢所	25.5	35.2	12.7	5.8
47	彰濱產業園區	18.9	19.0	9.5	5.3
48	田中產業園區	3.1	1.9	3.7	2.6
49	南崗產業園區	1.8	1.8	2.7	1.7
50	大里產業園區	1.1	2.1	2.9	1.9
51	高鐵臺中站	3.5	7.5	5.1	4.9
52	臺中產業園區	4.7	4.6	5.8	3.3
53	臺中港關連產業園區	9.9	8.3	6.1	3.1
54	臺中火力電廠	13.8	7.3	2.9	4.2
55	臺中港試驗線 0m	42.1	14.8	6.2	4.6
56	臺中港試驗線 300m	8.2	10.1	4.6	4.9
57	臺中港試驗線 2Km	12.7	14.6	7.4	5.4
58	五甲安檢所	17.7	19.4	7.9	7.1
59	通霄火力電廠	5.5	9.2	3.7	3.1
60	外埔安檢所	12.4	20.1	8.4	5.9
61	竹南產業園區	2.6	3.9	3.5	3.1
62	頭份產業園區	4.2	8.0	3.8	3.0
63	工業技術研究院	4.1	3.8	2.4	3.4
64	新竹產業園區	3.7	4.2	2.1	2.9
65	平鎮產業園區	2.0	4.2	4.8	1.5
66	桃園試驗線 500m	13.3	17.9	13.6	9.1
67	桃園試驗線 2Km	10.2	13.5	7.0	6.0
68	樹林產業園區	2.5	3.2	2.7	2.9
69	臺北市自來水事業處	3.4	2.6	3.7	3.5

項次	試驗地點	試驗期間 2023.10 - 2023.12	2024.01 - 2024.03	2024.04 - 2024.06	2024.07 - 2024.09
70	陽明山國家公園管理處	3.4	3.7	4.1	2.9
71	陽明山硫磺區	22.7	24.3	22.8	13.8
72	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	2.5	10.9	2.7	1.9
73	東北角風景區福隆遊客中心	3.9	6.3	5.3	2.0
74	臺北港監測站	2.5	6.6	-	3.5
75	平鎮產業園區(服務中心)	5.9	9.5	-	3.5
76	觀音產業園區(服務中心)	8.0	11.7	6.9	7.9
77	永安安檢所	14.0	20.1	17.5	7.1
78	新竹安檢所	15.5	19.3	8.1	6.5
79	金門水頭商港	2.0	4.0	3.5	-
80	高雄港 39 號碼頭	11.0	7.2	3.4	3.5
81	高雄港 75 號碼頭	3.5	4.0	2.7	6.8
82	公路局南區養護工程分局澎湖工務段	6.7	15.7	8.9	5.7
83	馬祖福澳港碼頭	9.7	11.3	6.7	7.4
84	公路局中區養護工程分局新中橫監工站	0.4	1.2	2.2	6.9
85	公路局中區養護工程分局埔里工務段	0.7	1.5	1.4	0.9
86	公路局中區養護工程分局霧社監工站	0.2	1.9	1.5	2.0
87	公路局中區養護工程分局谷關工務段	0.3	1.5	0.4	1.1
88	公路局北區養護工程分局復興工務段	0.4	2.8	1.1	1.2
89	公路局雲嘉南區養護工程分局石卓監工站	0.6	1.6	6.4	0.9
90	十八王公橋	12.6	-	10.4	12.2

註：- 表示試體遺失或試驗地點施工暫停試驗，其中蘇澳港試驗線 0m 進行頂樓防水工程，2023.10-2023.12 試體遺失，2024.01-2024.09 暫停試驗。

4.3.1 垂直海岸試驗線各金屬腐蝕速率之比較

圖 4.3 至圖 4.6 分別顯示碳鋼、鋅、銅、鋁 4 種金屬於垂直海岸試驗線試驗點腐蝕速率平均值之比較。

碳鋼金屬(圖 4.3)，以基隆試驗線及台塑六輕試驗線的腐蝕速率平均值較高，且在冬季的腐蝕速率最高，腐蝕速率平均值超過 $300 \mu\text{m/yr}$ ；而核三試驗線及蘇澳港試驗線 4 季的腐蝕速率差異較緩和，分別介於 $116.3\sim150.1 \mu\text{m/yr}$ 之間及 $90.1\sim135.1 \mu\text{m/yr}$ 之間。

鋅金屬(圖 4.4)，以台塑六輕試驗線最高，在秋、冬 2 季的腐蝕速率皆超過 $30 \mu\text{m/yr}$ ，其次是臺中港試驗線、高雄港試驗線及核三試驗線，在秋季或冬季的腐蝕速率超過 $20 \mu\text{m/yr}$ ；而在 4 季的腐蝕速率同樣以台塑六輕試驗線差異最大介於 $10.5\sim30.8 \mu\text{m/yr}$ ，花蓮港試驗線差異最小介於 $10.2\sim14.0 \mu\text{m/yr}$ 。

銅金屬(圖 4.5)，以台塑六輕試驗線在秋、冬 2 季的腐蝕速率最高，臺中港試驗線秋季的腐蝕速率次之，皆超過 $20 \mu\text{m/yr}$ ；在腐蝕速率季節差異上，台塑六輕試驗線的 4 季差異最大，數值介於 $4.0\sim23.1 \mu\text{m/yr}$ ，而高雄港試驗線的 4 季差異最小，數值介於 $5.5\sim6.2 \mu\text{m/yr}$ 。

鋁金屬(圖 4.6)，以西部的台塑六輕、臺中港、桃園等 3 條試驗線的腐蝕速率較高，且以秋、冬 2 季的腐蝕速率明顯高於其他試驗線，腐蝕速率平均值多超過 $10 \text{g/m}^2/\text{yr}$ ；其中臺中港試驗線及台塑六輕試驗線的季節性差異極大，且在秋、冬 2 季明顯高於其他試驗線，臺中港試驗線腐蝕速率平均值介於 $5.0\sim21.0 \text{g/m}^2/\text{yr}$ 、台塑六輕試驗線腐蝕速率平均值介於 $4.0\sim23.1 \text{g/m}^2/\text{yr}$ 。南部及東部試驗線在 4 季中數值較低，於春、夏 2 季腐蝕速率數值不超過 $5.0 \text{g/m}^2/\text{yr}$ 。

4.3.2 特定試驗點各金屬腐蝕速率之比較

圖 4.7 至圖 4.10 顯示石化廠、火力電廠、產業園區、高鐵沿線與都市地區等特定測站各金屬之腐蝕速率比較。

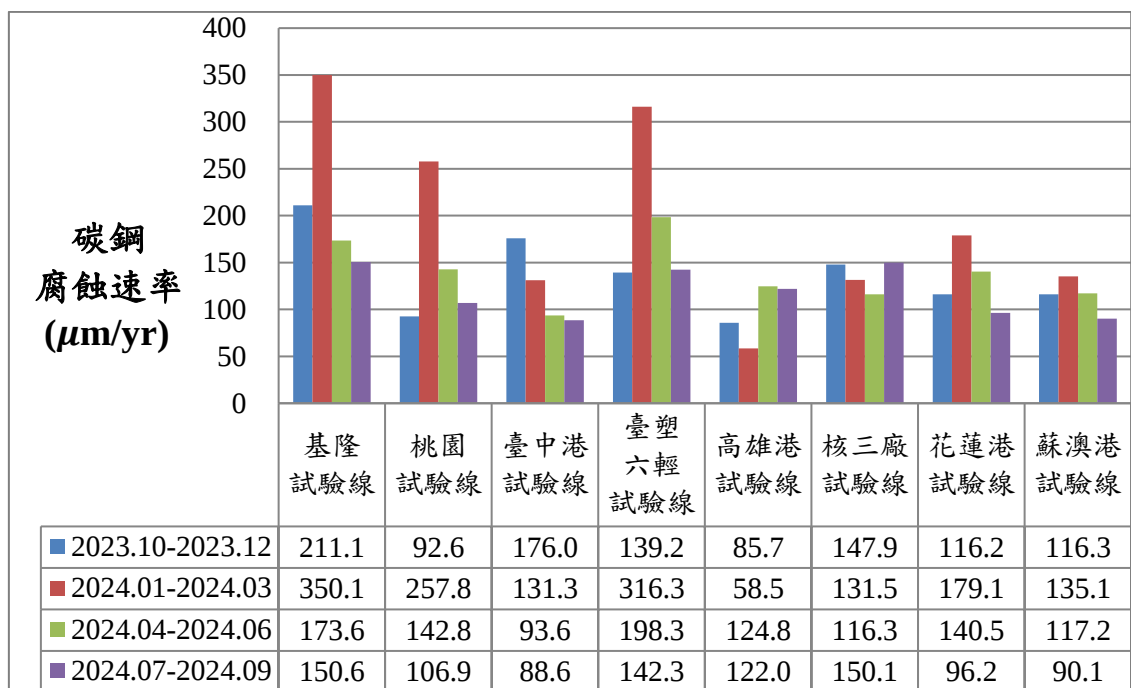
碳鋼金屬(圖 4.7)以台塑六輕及大潭電廠在冬季時的腐蝕速率最高，

達 $250 \mu\text{m/yr}$ 以上。其中，在各產業園區中以台塑六輕產業園區的腐蝕速率最高，其次是觀音產業園區與彰濱產業園區；在 4 個電廠中以大潭電廠的腐蝕速率較高；臺北市區與高鐵 3 個車站的腐蝕速率，以高鐵左營站春、夏 2 季腐蝕速率達 $156.9 \mu\text{m/yr}$ 、 $143.2 \mu\text{m/yr}$ 較高。

鋅金屬(圖 4.8) 在各產業園區的腐蝕速率以中鋼公司(臨海產業園區)冬季的腐蝕速率最高，其次是台塑六輕產業園區在秋、冬季的腐蝕速率次高，均達 $30 \mu\text{m/yr}$ 以上，另彰濱產業園區秋、春季的腐蝕速率亦高，達 $20 \mu\text{m/yr}$ 以上；4 個電廠以大潭電廠的腐蝕速率最高；臺北市區與高鐵 3 個車站的腐蝕速率相對較低，除臺北市區夏季腐蝕速率達 $15.2 \mu\text{m/yr}$ 外，其他介於 $5.2 \sim 11.4 \mu\text{m/yr}$ 之間。

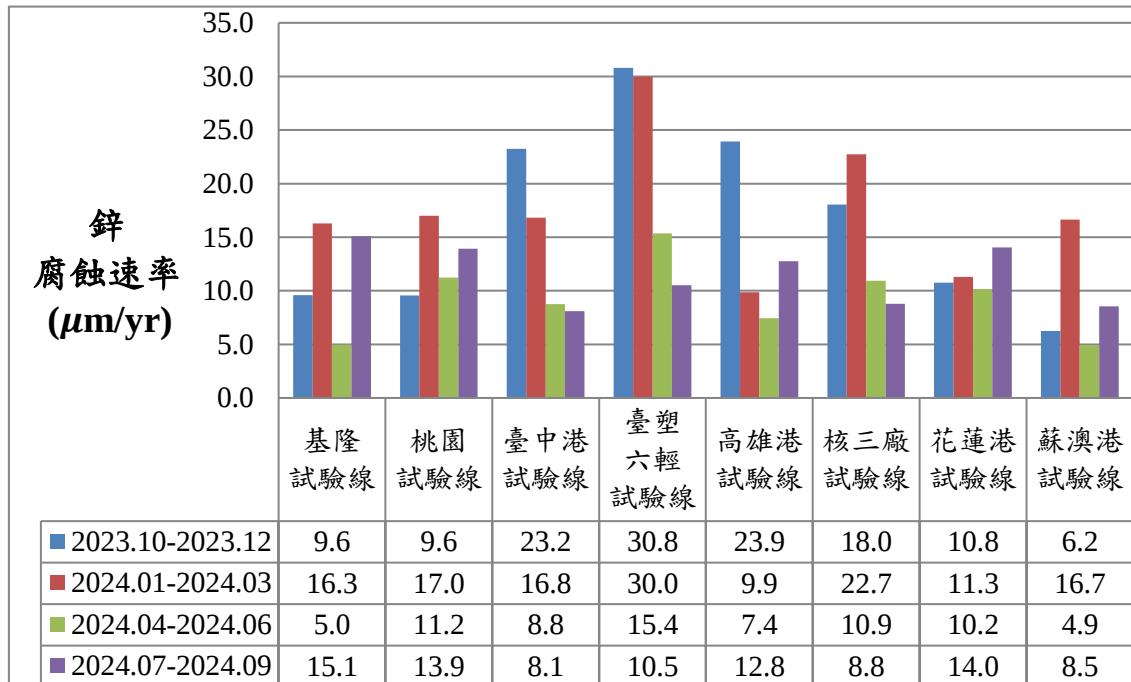
銅金屬(圖 4.9)在各產業園區中以彰濱產業園區、台塑六輕產業園區的腐蝕速率較高；在 4 個電廠中以臺中火力電廠、通霄火力電廠秋、冬 2 季的腐蝕速率，以及大潭電廠夏季的腐蝕速率較高、皆超過 $15 \mu\text{m/yr}$ ；臺北市區與高鐵 3 個車站的腐蝕速率相對較低，介於 $2.2 \sim 7.6 \mu\text{m/yr}$ 。

鋁金屬(圖 4.10)在各產業園區中以台塑六輕產業園區、彰濱產業園區的腐蝕速率較高；在 4 個電廠中以大潭電廠的腐蝕速率較高；臺北市區的腐蝕速率相對較低，腐蝕速率介於 $2.6 \sim 3.7 \text{ g/m}^2\text{/yr}$ 之間，而高鐵 3 個車站除在臺中站及嘉義站冬季腐蝕速率較高，分別為 $7.5 \text{ g/m}^2\text{/yr}$ 及 $10.8 \text{ g/m}^2\text{/yr}$ ，其餘季節的腐蝕速率則介於 $1.5 \sim 6.6 \text{ g/m}^2\text{/yr}$ 。



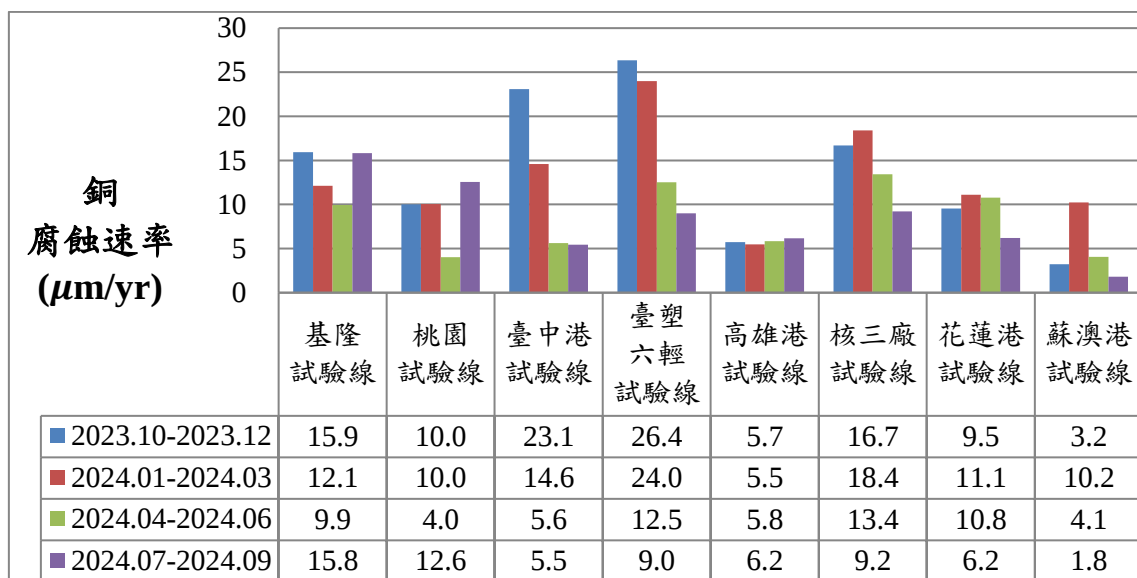
註：腐蝕速率為試驗線測站平均值

圖 4.3 垂直海岸試驗線碳鋼金屬腐蝕速率比較圖



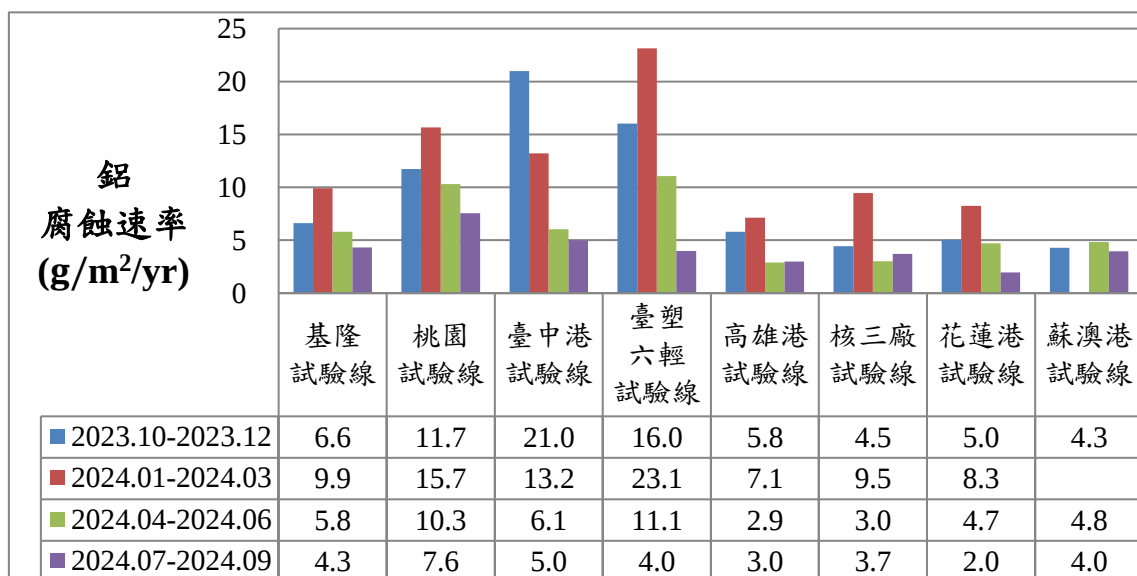
註：腐蝕速率為試驗線測站平均值

圖 4.4 垂直海岸試驗線鋅金屬腐蝕速率比較圖



註：腐蝕速率為試驗線測站平均值

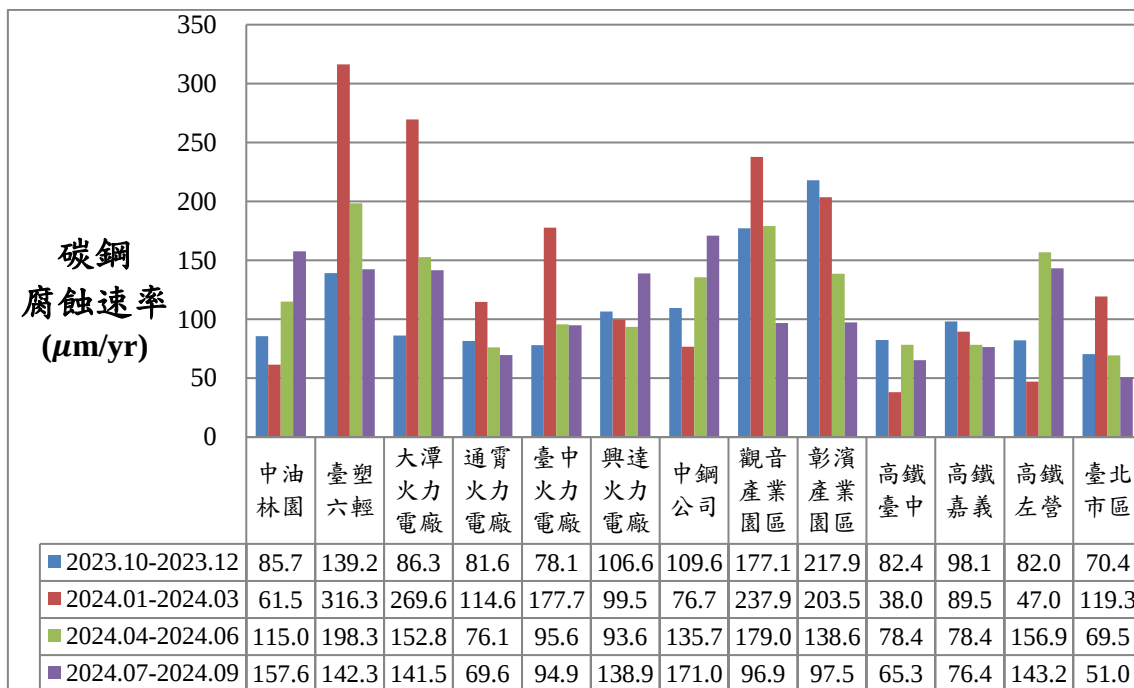
圖 4.5 垂直海岸試驗線銅金屬腐蝕速率比較圖



註 1：腐蝕速率為試驗線測站平均值

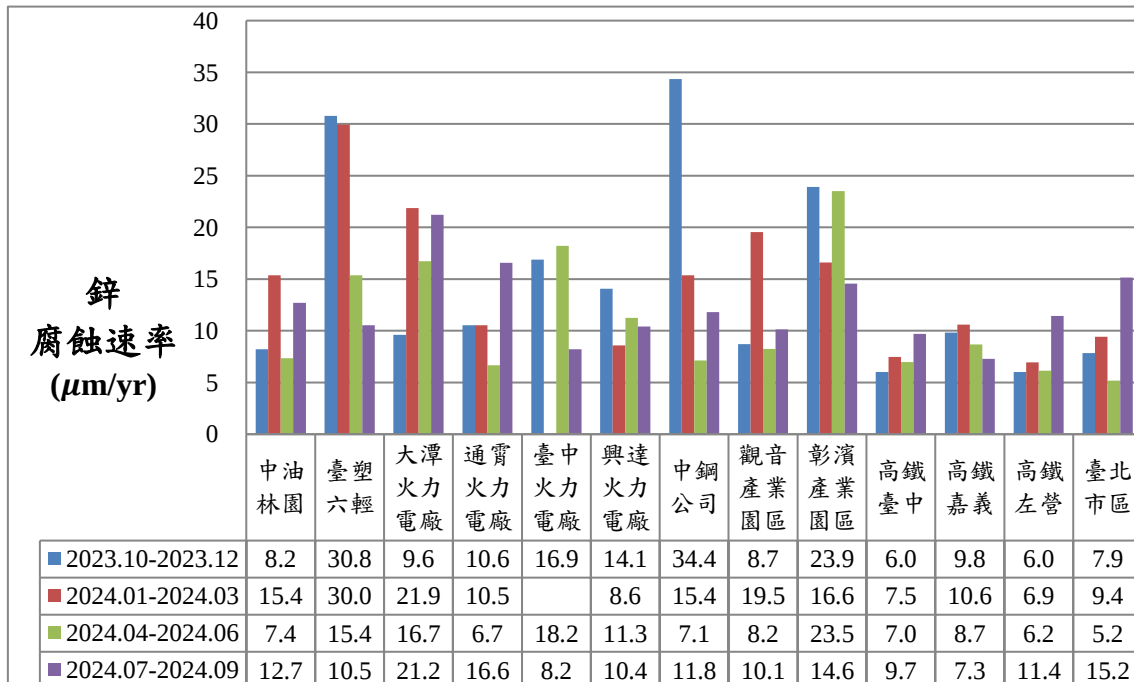
註 2：空白為試體遺失

圖 4.6 垂直海岸試驗線鋁金屬腐蝕速率比較圖



註：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

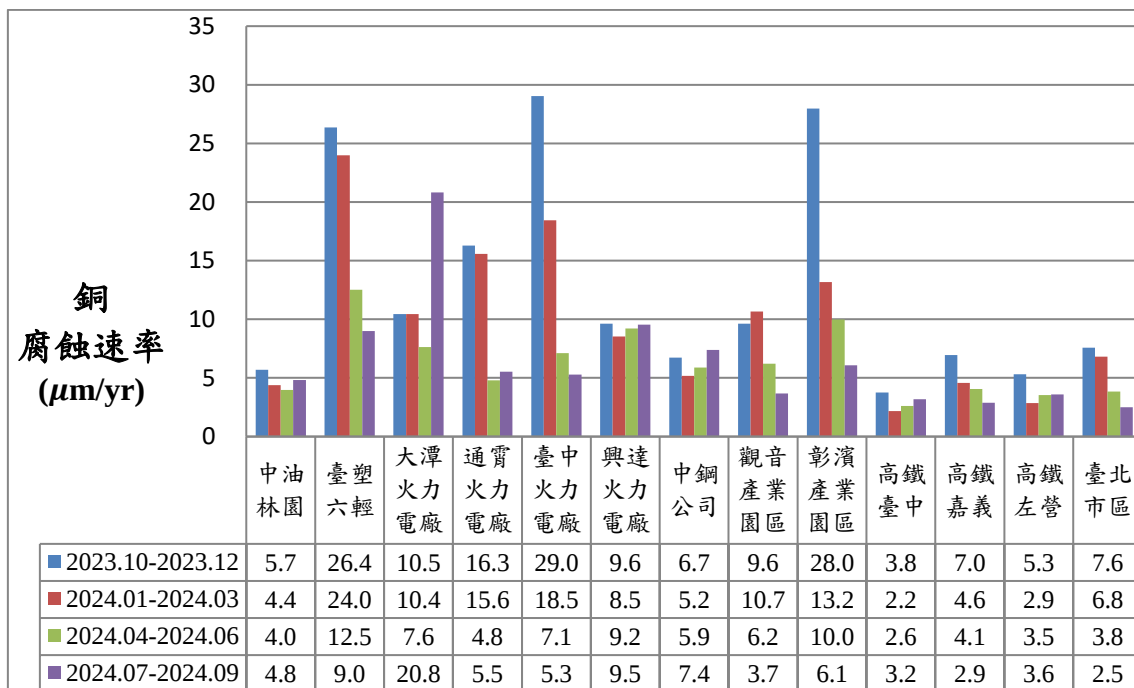
圖 4.7 特定測站碳鋼金屬腐蝕速率比較圖



註 1：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

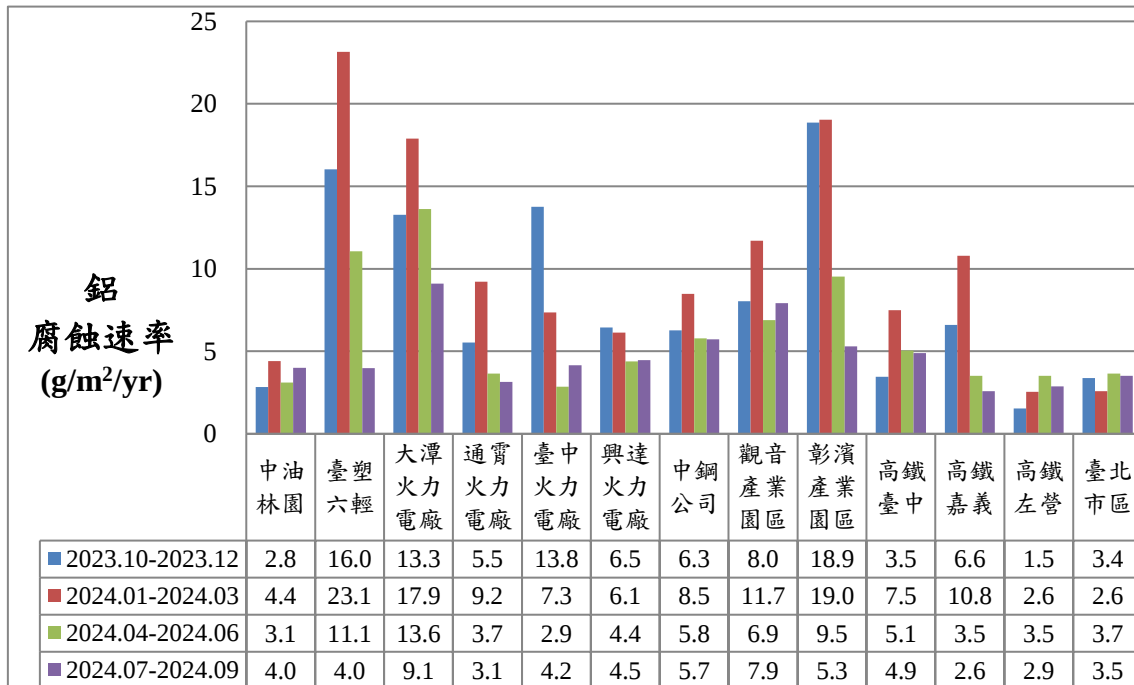
註 2：空白為試體遺失

圖 4.8 特定測站鋅金屬腐蝕速率比較圖



註：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

圖 4.9 特定測站銅金屬腐蝕速率比較圖



註：台塑六輕腐蝕速率為測站平均值

圖 4.10 特定測站鋁金屬腐蝕速率比較圖

第五章 鋅金屬腐蝕關聯性統計分析

臺灣為一海島，地處熱帶、亞熱帶，高溫、高濕與高鹽份的環境，造成金屬在大氣中容易腐蝕劣化。金屬材料的大氣腐蝕機制主要是受大氣中所含水分、氧氣、和腐蝕性物質聯合作用而產生的破壞；因此，為瞭解臺灣地區大氣腐蝕狀況，本所自 96 年起進行臺灣地區大氣腐蝕劣化因子與金屬材料腐蝕之調查與研究，做為辦理公共工程設計與維護管理之參考。

大氣腐蝕調查內容包括：(1)依據中華民國國家標準(以下簡稱 CNS)，就金屬及合金之大氣腐蝕性污染測定方法，進行臺灣全島及澎湖、金門與馬祖等地區之大氣腐蝕劣化因子調查，(2)依據 CNS 製作碳鋼、鋅、銅、鋁標準試樣，並進行現地暴露試驗與腐蝕速率量測，(3)彙整調查試驗結果，進行大氣腐蝕環境分類與建立網站，提供外界查詢及應用。

基於全球各地氣候條件受緯度、地形、距離海洋遠近及當地或附近腐蝕污染物質排放等因素影響，大氣腐蝕具有強烈地域性，為評估臺灣地區大氣腐蝕劣化因子對於鋅金屬腐蝕的影響，本章將運用前期調查得到的數據，以迴歸分析法(Regression Analysis)建立大氣腐蝕劣化因子與鋅金屬腐蝕速率間的迴歸模式，據以說明在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下，各項大氣腐蝕劣化因子對於鋅金屬腐蝕之影響。

接下來在 5.1 節先說明研究方法，在 5.2 節進行迴歸分析，在 5.3 節以構建的迴歸模式進行預測。

5.1 關聯性統計分析方法

研究方法採用迴歸分析法，迴歸分析是社會科學研究方法中最基本也是最重要的統計分析技術以及假說驗證方法，是常用來研究多個變數關係的一種方法，可依據統計數據配適一條合適的直線或曲線，找出解釋變數(或稱自變數、影響變數)與反應變數(或稱應變數、依變數)

間的函數關係，據以說明變數間的關聯性。迴歸分析法在大氣金屬腐蝕與腐蝕因子關聯性分析上經常使用，例如：Mendoza (1999)^[65]、Legault(1978)^[66]、Pourbaix(1993)^[67]、Morales(2007)^[68]、Su (1988)^[69]、Tsai (1993)^[70]、Chou(2011)^[71]、Lo (2014)^[72]等。

迴歸分析的步驟如圖 5.1 所示。以下分別說明各步驟的主要內容：

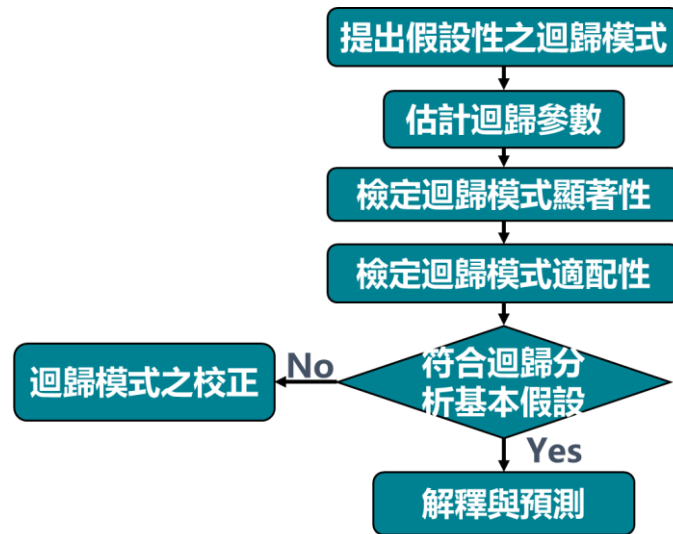


圖 5.1 迴歸分析的步驟

1. 提出假設性之迴歸模式

依照變數與變數之間的關係，針對問題選擇適當的反應變數與解釋變數，提出假設性的迴歸模式。

2. 估計迴歸參數

整理各變數的統計數據，據以配適一條迴歸方程式，估計模式中的迴歸參數。

3. 檢定迴歸模式的顯著性

顯著性檢定係在確定解釋變數與反應變數之間是否有顯著的線性關係，通常以 F 檢定值來檢定整個模式的顯著性，以 t 檢定值來檢定常

數項與各解釋變數參數值的顯著性，並以 95%為判斷是否具顯著性的顯著水準。

4. 檢定迴歸模式的適配性

適配性檢定係在確定模式具有說明能力，通當檢視迴歸模式的判定係數 R^2 (coefficient of determination ; R squared)或調整後判定係數 R^2_{adj} (Adjusted R squared)。判定係數 R^2 表示模式可說明反應變數的變異比例，數值愈高代表模式可說明反應變數的變異量愈大，模式的配適度愈好。一般而言，判定係數 0.5 就算可以接受。

在進行多元迴歸分析時，以檢視調整後判定係數 R^2_{adj} 較適當。因為判定係數 R^2 值會有隨著自變數增加，但模式解釋能力不增之高估現象，而調整後判定係數 R^2_{adj} 經過調整後，可避免此一問題。

5. 確認迴歸模式的基本假設

在確認迴歸模式的顯著性與適配性之後，必須進一步確認迴歸模式是否符合迴歸分析之基本假設，包含常態性、均質性、獨立性和線性重合等基本假設。

- (1) 常態性：可利用常態機率圖(又稱 P-P 圖)作為判斷方法，當數據來自一個常態分配的母體時，在常態機率圖上殘差值的累積機率會約略呈現一條左下至右上的 45° 直線。
- (2) 均質性：可由殘差與反應變數預測值之殘差圖(以下簡稱殘差圖)檢視。因為殘差是不可解釋的部分，如果模式符合均質性，則殘差圖應是沒有規則性的散佈，若殘差有一規則性，則應再將它抽離放在可解釋的部分。若殘差圖呈現非線性狀，表示模式中解釋變數與反應變數間的關係可能是非線性關係，若殘差圖呈現外張喇叭狀或大小不一狀，表示殘差可能不具有相同的變異數，違反均質性。
- (3) 獨立性：亦透過檢視殘差圖來判斷，如果模式符合獨立性，殘差彼此獨立、無自我相關問題，殘差圖應是沒有規則性的散佈，若

數據是時間序列資料，則可再進行 DW 檢定，以判斷誤差項是否具有自我序列相關(autocorrelation)的特性。

- (4) 線性重合：當 2 個(或以上)的自變數互不獨立(即彼此相關)時，就是具有共線性(collinearity)，共線性會使迴歸模式中存在著重複的解釋變數，提高某一解釋變數的解釋力與預測力，使得理論的建構不正確。線性重合問題可由變異數波動因數(variance inflation factor, VIF)檢視，通常 VIF 值愈小愈好，當 VIF 值大於 10 時，表示解釋變數間可能有高度線性重合的問題。
- (5) 離群值：在以殘差圖確認迴歸模式的基本假設時，亦會同時檢視離群值，避免模式受到極端值的影響而產生不妥當的迴歸模式，一般視 3 個標準差以上的數值為離群值。

6. 校正迴歸模式

若模式不符合迴歸分析的基本假設，則需進行迴歸模式之校正，重新檢視模式的特性，進行模式轉換或調整。

7. 解釋與預測

若確認模式符合迴歸分析的基本假設，則完成模式的建置工作，可進行後續的解釋與預測工作。

5.2 迴歸分析

以下將運用本所大氣腐蝕調查得到的數據，以迴歸分析法建立大氣腐蝕劣化因子與鋅金屬腐蝕速率間的迴歸模式。

1. 提出假設性之迴歸模式

(1) 確定反應變數與解釋變數

建立迴歸模式的目的在說明大氣腐蝕劣化因子與鋅金屬腐蝕速率間的關聯性，因此，模式中的反應變數為鋅金屬腐蝕速率，解釋變數為大氣腐蝕劣化因子。

關於解釋變數的選擇，依據 CNS13401^[48] (對應 IOS 9223 國際標準)^[41] 規範中以溫度—濕度複合因子(濕潤時間百分比)、二氧

化硫與氯鹽 3 項因子為金屬在大氣中腐蝕的主要腐蝕因子，爰本文選擇濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率 3 項因子為解釋變數。

因此，本文提出之假設性迴歸模式中的反應變數為鋅金屬腐蝕速率，解釋變數 3 項，分別是濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率，各變數說明如表 5-1。

表 5-1 迴歸模式變數說明

變數名稱	變數代號	單位	說明
鋅金屬腐蝕速率	Zn _{corr}	$\mu\text{ m/yr}$	反應變數
濕潤時間百分比	TOW	%	解釋變數
氯鹽沉積速率	Cl	$\text{mg/m}^2/\text{day}$	解釋變數
二氧化硫沉積速率	SO ₂	$\text{mg/m}^2/\text{day}$	解釋變數

(2) 資料說明

為探討目前大氣環境下臺灣地區鋅金屬腐蝕速率與 3 項大氣腐蝕劣化因子間的關聯性，將以前 2 年(111-112 年)全臺 89 個大氣腐蝕試驗站的季資料為分析基礎。資料扣除試樣點施工、試樣遺失無數據，以及離群值(陽明山硫磺區的二氧化硫沉積速率相對應於一般地區過高)不納入分析外，共計有 170 筆數據。

各試驗站均有鋅金屬腐蝕速率的現地試驗資料；部分試驗站無調查氯鹽沉積速率或二氧化硫沉積速率，在分析時引用鄰近試驗站的調查數據；另各試驗站的濕潤時間百分比以中央氣象署鄰近氣象站的溫度、相對濕度數據計算。

(3) 模式假設

假設在真實情況下臺灣地區鋅金屬腐蝕速率，主要受到濕潤時間百分比、氯鹽、二氧化硫等 3 項大氣腐蝕劣化因子影響；鋅

金屬腐蝕速率與 3 項大氣腐蝕劣化因子之間的關係是線性關係模式；且此一關係模式可以用本所在臺灣各地試驗站的數據來推估。

令臺灣地區鋅金屬腐蝕速率與 3 項大氣腐蝕劣化因子濕潤度、氯鹽、二氧化硫之迴歸模式為：

$$Zn_{corr} = b_0 + b_1TOW + b_2 Cl + b_3SO_2 + e \quad (5-1)$$

式中 b_0 為常數項， b_1 、 b_2 、 b_3 為各大氣腐蝕劣化因子的迴歸參數， e 是誤差項。

2. 配適迴歸模式

(1) 估計迴歸參數

以 111-112 年 89 個試驗站的年資料 170 筆應用統計軟體 SPSS 22.0 進行迴歸分析、估計迴歸參數。配適得到線性迴歸模式如下：

$$Zn_{corr} = 2.613 - 0.003TOW + 0.074 Cl + 0.034SO_2 \quad (5-2)$$

線性迴歸模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 5-2。

表 5-2 線性模式

(a) 摘要表

模式	R	R ²	R ² _{adj}
線性模式	0.589	0.347	0.335

註：R 為皮爾森積差相關係數，是 R^2 開根號； R^2 為判定係數； R^2_{adj} 為調整後判定係數。

(b)變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	1107.223	3	369.074	29.425	0.000*
殘差	2082.123	166	12.543	-	-
總計	3189.346	169	-	-	-

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤差	t	顯著性(P)	VIF
(常數)	2.613	0.954	2.739	0.007*	-
TOW	-0.003	0.020	-0.153	0.879	1.169
Cl	0.074	0.009	8.407	0.000*	1.169
SO ₂	0.034	0.008	4.138	0.000*	1.032

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(2)檢定模式顯著性

由模式的 F 檢定值=29.425($P=0.000$) 達 95%顯著水準，可知模式顯著；檢視各參數的 t 檢定值，由參數 b_0 、 b_2 、 b_3 的 t 檢定值達 95%顯著水準，可知常數項不為 0，解釋變數 Cl、SO₂ 影響顯著，但參數 b_1 的 t 檢定值未達 95%顯著水準，參數 b_1 可能為 0，解釋變數 TOW 影響不顯著。

由於參數 b_1 的 t 檢定未通過，顯示參數 b_1 可能為 0。因此，將解釋變數 TOW 刪除，重新配適一個 2 個解釋變數的線性模式。以同樣 170 筆數據配適得到模式如下：

$$Zn_{\text{corr}} = 2.482 + 0.074 \text{ Cl} + 0.034 \text{ SO}_2 \quad (5-3)$$

2 解釋變數線性模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 5-3。

表 5-3 2 解釋變數線性模式

(a)摘要表

模式	R	R ²	R ² _{adj}
2 解釋變數線性模式	0.589	0.347	0.339

註：R 為皮爾森積差相關係數，是 R² 開根號；R² 為判定係數；R²_{adj} 為調整後判定係數。

(b)變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	1106.929	2	553.464	44.385	0.000*
殘差	2082.417	167	12.470	-	-
總計	3189.346	169	-	-	-

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤差	t	顯著性(P)	VIF
(常數)	2.482	0.424	5.849	0.000*	-
Cl	0.074	0.008	8.962	0.000*	1.022
SO ₂	0.034	0.008	4.185	0.000*	1.022

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

2 解釋變數線性模式的 F 值=44.385(P=0.000)，常數項與各解釋變數參數的 t 值均達 95%顯著水準，可知模式顯著、各解釋變數的影響亦均顯著。

(3)檢定模式適配性

2 解釋變數線性模式的 R²_{adj} =0.339，表示模式中解釋變數能說明鋅金屬腐蝕速率變異的 33.9%，基於本研究試驗站是設置在戶外，較易受地區環境不可控制因素影響，模式的 R²_{adj} 值若達 50%是屬可接受範圍，但此模式的 R²_{adj} 值低於 50%，顯示模式的解釋能力不佳。

(4)確認模式的基本假設

進一步確認迴歸模式是否符合迴歸分析之基本假設，包含常態性、均質性、獨立性和線性重合等基本假設，並一併檢視離群值。

常態性：由線性模式常態機率圖(圖 5.2)上各點分佈情形來看，圖形均略有偏離直線，判斷模式可能違反常態分配之假設。

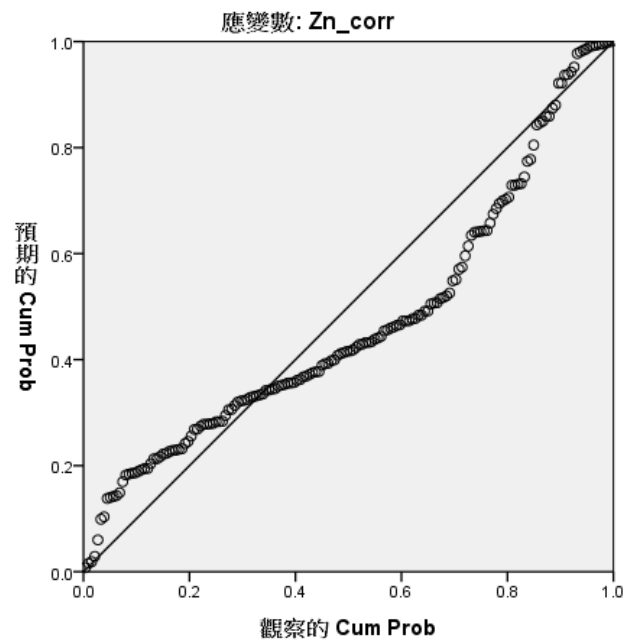


圖 5.2 線性模式的常態機率圖

均質性：由線性模式的殘差圖(圖 5.3)上各點分佈情形來看，殘差圖無顯示特定圖型，判斷模式可能無違反變異數相同之均質性假設。

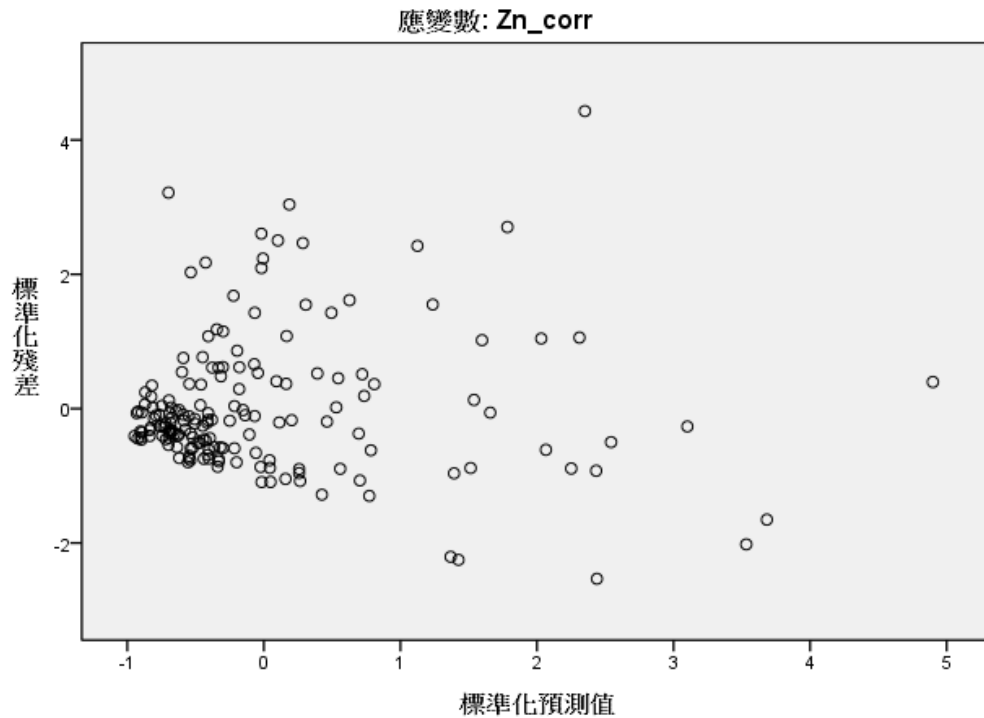


圖 5.3 線性模式的殘差圖

獨立性：由模式的殘差圖(圖 5.3)上各點分佈情形來看，殘差值均隨機分布在 0 的中心線周圍，無明顯規律性，判斷殘差可能彼此獨立，無自我相關問題，另基於資料非時間序列資料，不再進行 DW 檢定。

線性重合：由模式中各解釋變數的 VIF 值均小於 10，判斷解釋變數間無高度線性重合問題。

離群值：模式有 2 個反應變數預測值在 3 個標準差之外。

(5)綜合判斷

綜而言之，在顯著性方面，配適 3 解釋變數的線性模式時，模式顯著，但解釋變數 TOW 的影響不顯著，改配適 2 解釋變數時，可知模式顯著、各解釋變數的影響亦均顯著，模式的顯著性檢定通過；在配適度方面，2 解釋變數的線性模式的 R^2_{adj} 值低於 50%，顯示模式的配適度不佳，在基本假設方面，依殘差圖與 VIF 值來看，模式無嚴重違反均質性、獨立性、線性重合等基本假設，但依常態機率圖判斷模式可能違反常態性之基本假設。依此分析

結果，判斷配適的線性迴歸模式可能不太妥適，有需要進行模式校正，重新配適一個新的模式。

3.校正迴歸模式

前經檢視常態機率圖，判斷建立的線性模式可能違反常態性的基本假設，在此嘗試進行模式轉換。

考慮到大氣腐蝕是一種水膜下的電化學反應，空氣中水分子在金屬表面凝聚生成水膜，與空氣中氧氣通過水膜進入金屬表面，是產生大氣腐蝕的基本條件；濕潤時間是指能在金屬表面上產生水膜而發生腐蝕的時間，而氯鹽、二氧化硫等環境因子是在水膜產生後加速大氣腐蝕的因子。

並考慮到在 CNS13401^[48] (對應 IOS 9223 國際標準)^[41] 中建議由環境條件與暴露情境計算出適用於鋅金屬腐蝕速率的公式為：

$$r_{\text{corr}} = 0.0129P_d^{0.44}\exp(0.046RH+f_{\text{Zn}})+0.0175S_d^{0.57}\exp(0.008RH+0.085T)$$
$$f_{\text{Zn}} = 0.38(T-10)\text{當 } T \leq 10^\circ\text{C} ; \text{除此外}-0.071(T-10) \quad (5-4)$$

式中 r_{corr} 是鋅金屬腐蝕速率； P_d 是二氧化硫沉積速率； S_d 是氯鹽沉積速率； RH 是相對濕度； T 是溫度。

此一公式顯示：在溫度、濕度為定值時，鋅金屬腐蝕速率與氯鹽、二氧化硫沉積速率間的關係是線性關係；在氯鹽、二氧化硫沉積速率為定值時，鋅金屬腐蝕速率與溫度、濕度間的關係是指數關係。

參考大氣腐蝕理論與上述公式所顯示鋅金屬腐蝕速率與溫度、濕度、氯鹽、二氧化硫沉積速率，嘗試將腐蝕速率取對數值為反應變數，以氯鹽、二氧化硫等 2 項腐蝕因子各取對數值為解釋變數，加上濕潤時間此 1 既有解釋變數，建立一個新的對數線性迴歸模式，轉換後的模式如下：

$$\ln(Zn_{\text{corr}}) = b_0 + b_1TOW + b_2 \ln(\text{Cl}) + b_3 \ln(\text{SO}_2) + e \quad (5-5)$$

式中 b_0 為常數項， b_1 、 b_2 、 b_3 為各解釋變數的迴歸參數， e 是誤差項。

估計迴歸參數後，配適得到對數線性模式如下：

$$\ln(Z_{n_{\text{corr}}}) = -0.104 - 0.001 \text{ TOW} + 0.303 \ln(\text{Cl}) + 0.287 \ln(\text{SO}_2) \quad (5-6)$$

對數線性模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表詳如表 5-4。

表 5-4 對數線性模式

(a)摘要表

模式	R	R^2	R^2_{adj}
對數線性模式	0.627	0.394	0.383

註：R 為皮爾森積差相關係數，是 R^2 開根號； R^2 為判定係數； R^2_{adj} 為調整後判定係數。

(b)變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	37.961	3	12.654	35.913	0.000*
殘差	58.490	166	0.352	-	-
總計	96.451	169	-	-	-

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤差	t	顯著性(P)	VIF
(常數)	-0.104	0.252	-0.412	0.681	-
TOW	-0.001	0.004	-0.329	0.742	1.361
$\ln(\text{Cl})$	0.303	0.034	9.010	0.000*	1.308
$\ln(\text{SO}_2)$	0.287	0.054	5.352	0.000*	1.120

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(1)檢定模式的顯著性

由模式的 F 檢定值=35.913($P=0.000$)，可知模式顯著；由解釋變數 $\ln(\text{Cl})$ 、 $\ln(\text{SO}_2)$ 參數 b_2 、 b_3 的 t 檢定值達 95%顯著水準，可

知 $\ln(\text{Cl})$ 、 $\ln(\text{SO}_2)$ 的影響顯著，由常數項 b_0 、解釋變數 TOW 參數 b_1 的 t 檢定值未達 95% 顯著水準，推測 TOW 的影響不顯著，常數項 b_0 可能為 0。

因此，將解釋變數 TOW 刪除，並改配適無常數項對數線性模式。以同樣 170 筆數據配適得到模式如下：

$$\ln(\text{Zn}_{\text{corr}}) = 0.285 \ln(\text{Cl}) + 0.251 \ln(\text{SO}_2) \quad (5-7)$$

無常數項對數線性模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表詳如表 5-5。

表 5-5 無常數項對數線性模式

(a) 摘要表

模式	R	R^2	R^2_{adj}
無常數項 對數線性模式	0.925	0.855	0.854

註：R 為皮爾森積差相關係數，是 R^2 開根號； R^2 為判定係數； R^2_{adj} 為調整後判定係數。

(b) 變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	347.647	2	173.824	496.809	0.000*
殘差	58.780	168	0.350	-	-
總計	406.427	170	-	-	-

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95% 顯著水準。

(c) 參數估計表

模式	b	標準誤差	t	顯著性(P)	VIF
$\ln(\text{Cl})$	0.285	0.025	11.239	0.000*	2.186
$\ln(\text{SO}_2)$	0.251	0.022	11.642	0.000*	2.186

註：符號「*」表示顯著性 $P \leq 0.05$ ，達統計上 95% 顯著水準。

由各參數的 t 檢定值均達 95% 顯著水準，可知各解釋變數對反應變數的影響均顯著，模式的顯著性檢定通過。

(2)檢定模式適配性

無常數項對數線性模式的 $R^2_{adj}=0.854$ ，表示模式中解釋變數能說明鋅金屬腐蝕速率變異的 85.4%，基於本研究試驗站是設置在戶外，較易受地區環境不可控制因素影響，模式的 R^2_{adj} 值達 80%表示模式的解釋能力很好，模式的適配性檢定通過。

(3)確認迴歸分析的基本假設

接下來確認無常數項對數線性模式的常態性、均質性、獨立性和線性重合等迴歸分析之基本假設。在常態性方面，由常態機率圖(圖 5.4)上各點分佈情形來看，圖形接似直線，推論模式無嚴重違反常態分配之假設；在均質性方面，由殘差圖(圖 5.5)上各點分佈情形來看，殘差隨機分布無明顯圖形，推論模式無嚴重違反變異數相同之假設；在獨立性方面，由殘差與預測值散佈圖(圖 5.5)上各點分佈情形來看，殘差隨機分布在 0 的中心線周圍，無明顯規律性，推論殘差可能彼此獨立，無自我相關問題；在線性重合方面，由各解釋變數的 VIF 值 <10 ，顯示解釋變數間無高度線性重合問題。此外，模式中沒有反應變數預測值在 3 個標準差之外的離群值。

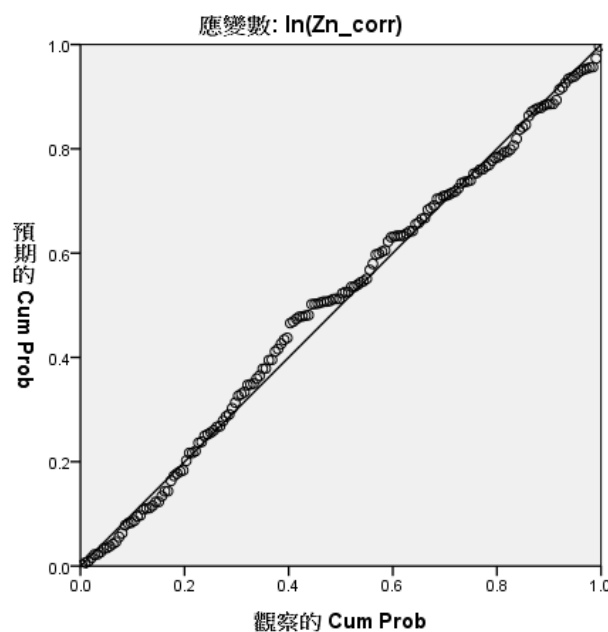


圖 5.4 無常數項對數線性模式的常態機率圖

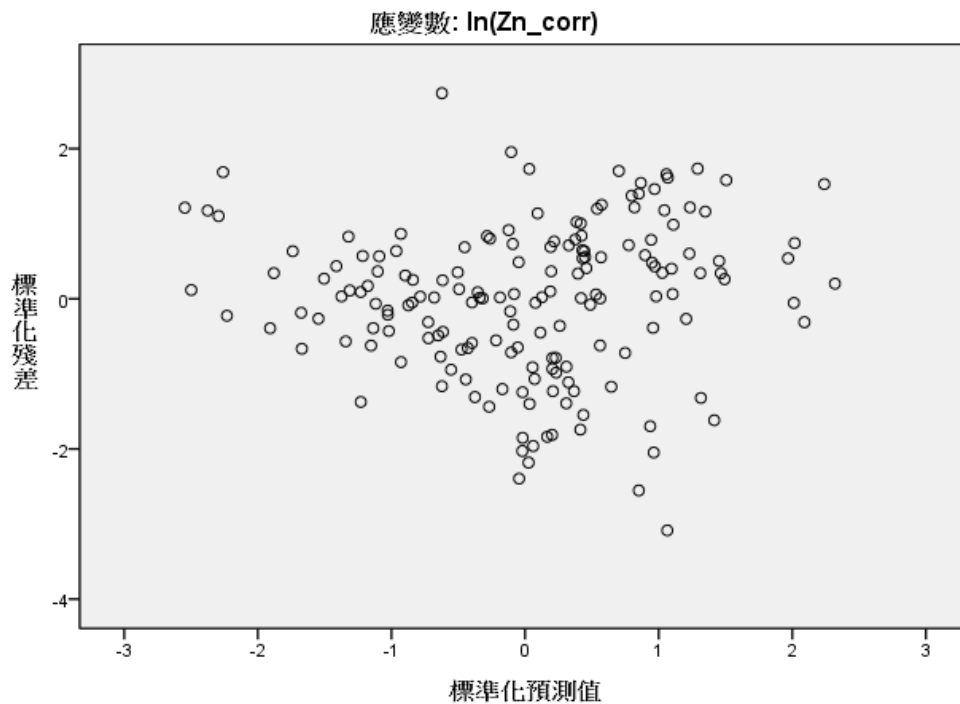


圖 5.5 無常數項對數線性模式的殘差圖

(4)綜合判斷

綜而言之，無常數項對數線性模式的顯著性檢定通過，適配性達可接受範圍，並確認模式沒有嚴重違反迴歸分析基本假設的問題。

4.解釋與說明

迴歸分析結果顯示在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下，鋅金屬腐蝕速率主要受到氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率 2 項腐蝕因子的影響，濕潤時間百分比對鋅金屬腐蝕速率的影響則未達顯著水準。鋅金屬腐蝕速率與 2 項腐蝕因子間的關係是無常數項對數線性關係，關係模式如下：

$$\ln(\text{Zn}_{\text{corr}}) = 0.285 \ln(\text{Cl}) + 0.251 \ln(\text{SO}_2) \quad (5-8)$$

依此關係模式，2 項腐蝕因子的變動可說明鋅金屬腐蝕速率變動的 85.4%。

5. 討論

關於腐蝕因子濕潤時間(TOW)在迴歸模式中影響不顯著的結果，推測可能是降雨作用所造成，因為濕潤時間(TOW)是全年溫度高於 0℃，且相對濕度大於 80%之小時數或百分比，在相對濕度大於 80%時當地有可能下雨，亦有可能不下雨，降雨對大氣腐蝕有 2 種影響，一方面因降雨沖洗掉金屬表面的污染物與灰塵，減少了金屬表面水膜的腐蝕性，減緩大氣腐蝕，另一方面亦因降雨的沖刷，破壞了金屬表面腐蝕生成物的保護性，加速大氣腐蝕，後續可再針對此一課題做深入探討。

此外，本研究在構建迴歸模式時，係依據 CNS 13401 規範，選擇以濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率 3 項因子為解釋變數，後續可考慮將溫度、濕度、風速、風向、降雨、日照等氣象因子納入考量，探討降雨沖刷效應對氯鹽、二氧化硫累積量的影響，以及探討季風氣流對腐蝕的影響。

至於金屬腐蝕與腐蝕因子間的關聯性研究，在建立線性迴歸模式外，亦可考慮建立非線性迴歸模式，或機器學習模式，另可應用多變量分析技術評估腐蝕因子間的交互作用。

5.3 腐蝕環境分類等級預測

依據構建好的迴歸模式，可由大氣腐蝕劣化因子氯鹽(Cl)與二氧化硫(SO₂)的沉積速率，進行鋅金屬腐蝕速率(Zn_{corr})的預測，並進而按腐蝕環境分類標準，預測鋅金屬的腐蝕環境分類等級。

以迴歸模式進行預測時，可以選擇進行點預測，或進行區間預測。當某一新地點的氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率分別是 Cl_h 與 SO_{2h} 時，若令 Zn_{corr-h} 表示該地的鋅金屬腐蝕速率值，且以 ln(Zn_{corr-h})表示該值的對數值，則運用前一節構建的迴歸模式(式 5-8)，可計算出鋅金屬腐蝕速率的點預測值，計算式為：

$$\ln(\text{Zn}_{\text{corr-h}}) = 0.285 \ln(\text{Cl}_h) + 0.251 \ln(\text{SO}_{2h}) \quad (5-9)$$

亦可進行區間預測，計算出 $\ln(\text{Zn}_{\text{corr-h}})$ 在信賴水準為 $(1-\alpha)\%$ 時的預測區間上下限，計算式為：

$$0.285 \ln(\text{Cl}_h) + 0.251 \ln(\text{SO}_{2h}) \pm t_{(\alpha/2, 168)} * 0.59190660 \sqrt{X_0' (X'X)^{-1} X_0} \quad (5-10)$$

式中 $t_{(\alpha/2, 168)}$ = 信賴水準為 $(1-\alpha)\%$ 時的 t 分配值，可查表得到，

$$X_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ \ln(\text{Cl}_h) \\ \ln(\text{SO}_{2h}) \end{bmatrix},$$

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.10075117 & -0.00886802 & -0.02544317 \\ -0.00886802 & 0.00261289 & 0.00109055 \\ -0.02544317 & 0.00109055 & 0.00775332 \end{bmatrix},$$

例如：在臺灣某一試驗地點調查得到氯鹽與二氧化硫的年平均沉積速率分別是 $7.3\text{mg/m}^2/\text{day}$ 與 $16.1\text{mg/m}^2/\text{day}$ ，則運用式 5-9 可計算出鋅金屬腐蝕速率的點預測值為 $3.54 \mu\text{m/yr}$ ，再依腐蝕環境分類標準(表 3-8)預測鋅金屬的腐蝕環境分類為 C4 等級；亦可進行區間預測，運用式 5-10 計算出鋅金屬腐蝕速率對數值在信賴水準為 90% 的預測區間上下限，得到鋅金屬腐蝕速率的 90% 預測區間為

$$1.33\mu\text{m/yr} \leq \text{Zn}_{\text{corr-h}} \leq 9.45 \mu\text{m/yr} \quad (5-11)$$

此一鋅金屬腐蝕速率在信賴水準為 90% 的預測區間，其所相對應的腐蝕環境分類為 C3、C4、C5、CX 等級。

以迴歸模式進行點預測或區間預測的理論基礎，主要是依據迴歸模式的常態性基本假設。也就是說，因為在真實情況下尚有模式無法解釋的變數存在，爰相對應於特定解釋變數(氯鹽、二氧化硫)之反應變數值(鋅金屬腐蝕速率)不是一個特定值，而是呈現常態機率分配情形；因此，當以迴歸模式進行預測時，點預測值為相對應於特定氯鹽沉積速率值(Cl_h)、二氧化硫沉積速率值(SO_{2h})之鋅金屬腐蝕速率($\text{Zn}_{\text{corr-h}}$)常態機率分配平均數，預測區間值為按照常態機率分配計算出不同信賴水準下的預測區間。

在實務應用上，採用點預測計算較簡便，採用區間預測雖計算較繁複，但預測正確率(實際值落在預測區間中的機率)較高，且區間預測的信賴水準愈高時，預測準確率愈高，不過，當信賴水準愈高時的預測區間愈大，將不利於決策判斷。如同前例所述，鋅金屬腐蝕速率的 90% 預測區間，所對應的腐蝕環境分類跨越 4 個等級(C3~CX)，對於後續要因應不同腐蝕環境分類辦理工程防蝕設計或執行工程養護管理的應用單位而言，將不能依此做決斷。

腐蝕環境分類等級是辦理工程防蝕設計或工程養護管理之重要參考依據，因此，一個腐蝕環境分類等級預測方案，最好是能符合一定水準的準確率，且預測區間不要過大而不利應用單位做決策。

為找出一個適當的腐蝕環境分類等級預測方案，能符合一定水準的正確率，且預測區間不要過大。在此，擬以 110 年試驗站的年資料(共計 86 筆)進行預測正確率測試；也就是說，將 110 年 86 筆大氣腐蝕劣化因子氯鹽(Cl_h)與二氧化硫(SO_{2h})的沉積速率值，代入迴歸模式，進行鋅金屬腐蝕速率($\text{Zn}_{\text{corr-h}}$)預測，並預測鋅金屬的腐蝕環境分類等級，然後，與 110 年試驗站的鋅金屬腐蝕速率實際值(86 筆)所對應的腐蝕環境分類等級相比較，計算出預測正確率。接著分別計算出點預測，以及 5 種預測區間(30%、40%、50%、60%、90%)的預測正確率。

表 5-6 顯示 110 年 86 筆鋅金屬腐蝕環境分類等級的點預測與 5 種預測區間的預測正確率。可知：點預測的預測正確率為 52.33%，隨著預測區間的信賴水準由 30%增加至 90%，預測正確率由 68.60%增加至 100.00%。

表 5-6 點預測與 5 種預測區間的預測正確率

預測方式	預測正確率
點預測	52.33%
30%預測區間	68.60%
40%預測區間	73.26%
50%預測區間	81.40%
60%預測區間	91.86%
90%預測區間	100.00%

註：本研究整理。

依據以 110 年資料進行的預測正確率測試結果，本研究建議在應用本迴歸模式進行鋅金屬腐蝕環境分類等級預測時，採用 60%預測區間進行預測，則預期正確率可達 90%以上。

第六章 結論與建議

臺灣為一海島，四面環海，高溫、高濕與高鹽份的環境，腐蝕環境嚴重。歷年來公共工程建設常引用國外腐蝕數據進行腐蝕速率評估與防蝕設計，結果常有未及設計年限就已銹蝕損壞的情形；有鑑於此，腐蝕因子的調查與掌握對金屬與鋼筋混凝土結構物耐久性防蝕設計的影響，有其重要性。

本計畫目標包括：1.臺灣大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗；2.港區水下腐蝕長期暴露試驗與海水水質調查；3.精進及擴充大氣與水下腐蝕資訊系統資料庫；4.鋅金屬腐蝕與環境因子關聯性分析之工作。

在此目標下，本計畫調查分析全臺各大氣腐蝕試驗站之氯離子、二氧化硫沉積量等大氣腐蝕劣化因子沉積速率、金屬螺旋試樣腐蝕速率，並調查分析各港區水下腐蝕試驗站各季海水水質與各年期金屬材料腐蝕速率，歸納整理數據並繪製比較圖，建置於臺灣腐蝕環境分類資訊系統，提供工程單位做為材料設計選用及防救災決策支援使用。

6.1 結論

1. 在氯鹽沉積速率調查結果發現，4季中以秋、冬2季的氯鹽沉積速率較高，春、夏2季較低，較高的氯鹽沉積速率大多發生在秋、冬2季北部至西部沿海地區的試驗點；以地區來看，在距離海岸線較遠之山區的氯鹽沉積速率最低，多在 $2\text{ mg/m}^2/\text{day}$ 以下，在距離海岸線有一段距離的高鐵沿線3個車站氯鹽沉積速率亦在 $2\text{ mg/m}^2/\text{day}$ 以下，沿海地區以南部高雄沿海的氯鹽沉積速率較低，東部沿海地區以花蓮壽豐橄仔樹安檢所的氯鹽沉積速率較高，而外島地區以澎湖工務段的氯鹽沉積速率最高，且季節差異最大。垂直海岸試驗線的平均氯鹽沉積速率以高雄港試驗線及蘇澳港試驗線的平均氯鹽沉積速率較其他試驗線低，另西部沿海試驗線的氯鹽沉積速率通常在秋、冬2季較高。
2. 二氧化硫沉積速率調查結果發現，除了靠近硫磺區的陽明山國家公園外，較高的二氧化硫沉積速率大多發生在西部產業園區及北部沿海十八王公橋，且以秋、冬2季較高；在特定試驗點調查結果發現，特定產

業園區以彰濱產業園區、觀音產業園區及官田產業園區在秋、冬 2 季較高，且彰濱產業園區在秋季二氧化硫沉積速率為 $205.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 超過分類標準 P3 等級。

3. 垂直海岸試驗線各金屬腐蝕速率之比較，碳鋼金屬以基隆試驗線及台塑六輕試驗線的腐蝕速率高於其他試驗線，又以冬季的腐蝕速率較高，腐蝕速率平均值超過 $300 \mu\text{m/yr}$ ；鋅金屬以台塑六輕試驗線最高，其次是臺中港試驗線、高雄港試驗線及核三試驗線；銅金屬以臺中港試驗線、台塑六輕試驗線在秋、冬 2 季腐蝕速率較高，且台塑六輕試驗線在 4 季的腐蝕速率差異也最大；鋁金屬以西部的桃園、臺中港、台塑六輕等 3 條試驗線的腐蝕速率較高，且以秋、冬 2 季較高。
4. 在特定試驗點各金屬腐蝕速率之比較，碳鋼金屬以台塑六輕及大潭電廠在冬季時的腐蝕速率最高，達 $250 \mu\text{m/yr}$ 以上。其中，產業園區以台塑六輕產業園區的腐蝕速率最高，觀音產業園區、彰濱產業園區次之，4 個電廠中以大潭電廠的腐蝕速率較高；鋅金屬在各產業園區的腐蝕速率以中鋼公司(臨海產業園區)冬季的腐蝕速率最高，其次是台塑六輕產業園區在秋、冬季的腐蝕速率次高，均達 $30 \mu\text{m/yr}$ 以上；4 個電廠以大潭電廠的腐蝕速率最高；銅金屬在各產業園區中以彰濱產業園區、台塑六輕產業園區的腐蝕速率較高；在 4 個電廠中以臺中火力電廠、通霄火力電廠秋、冬 2 季的腐蝕速率，以及大潭電廠夏季的腐蝕速率較高、皆超過 $15 \mu\text{m/yr}$ ；鋁金屬在各產業園區中以台塑六輕產業園區、彰濱產業園區的腐蝕速率較高；在 4 個電廠中以大潭電廠的腐蝕速率較高。
5. 在鋅金屬與大氣腐蝕因子關聯性分析，運用迴歸分析法建立腐蝕因子與鋅金屬腐蝕速率間的迴歸模式，結果顯示鋅金屬腐蝕速率主要受到氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 2 項腐蝕因子的影響，兩者間是對數線性關係，關係模式為： $\ln(\text{Zn}_{\text{corr}}) = 0.285 \ln(\text{Cl}) + 0.251 \ln(\text{SO}_2)$ 。依據模式可進行鋅金屬腐蝕環境分類等級，透過正確率測試，建議以本模式預測時採用 60%預測區間預測，預期正確率可達 90%以上。

6.2 建議

1. 未來持續建立臺灣地區構造物腐蝕環境潛勢分析之完整數據資料庫，並針對前期累積量測與試驗分析資料，進行統計與大數據分析，研析大氣腐蝕因子與金屬材料之關聯性。
2. 持續藉由辦理教育訓練、研討會及出版年報，推廣「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」於交通部、公路局、高速公路局、港務公司及顧問公司等選用金屬材料及防蝕工法參考應用，確保公共工程如橋梁、碼頭等構造物，能達到或超過設計使用年限。

6.3 研究成果之效益

1. 學術效益：
 - (1) 113 年發行交通部運輸研究所專刊，出版「2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」1 冊。
 - (2) 在港灣季刊第 128 期（113 年 6 月出版）發表論文「臺灣地區碳鋼金屬腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析」。
 - (3) 在 113 年 9 月 6-7 日 113 年防蝕工程年會暨論文發表會上發表論文「臺灣地區鋅金屬大氣腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析」，並獲防蝕工程論文競賽佳作。
 - (4) 在 113 年 7 月 9 日「大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會」中簡報「臺灣腐蝕環境分類資訊系統介紹」。
2. 社會環境安全影響：本計畫建立臺灣大氣腐蝕環境分類資訊系統，目前全島建置 90 個金屬暴露試驗點與 14 個水下金屬長期腐蝕試驗，藉由環境因子調查，了解金屬構造物劣化情形及探討其發生機理，並依腐蝕環境分類特性，選用適當之維修材料與工法，以提升我國之整體防災能力及環境之安全與資源之永續利用。
3. 資料庫建置效益：逐年完成臺灣地區構造物腐蝕環境分類數據資料庫的建立且發行臺灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報，提供工程單位瞭解金

屬構造物在臺灣各腐蝕環境中的耐久性與其防蝕控制之重要，可作為臺灣地區之地震災前預防、災時應變計畫與決策之參考依據。

6.4 提供政府單位應用情形

1. 本計畫建置「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」網站並出版年報，提供公民營事業單位營運安全防護採用。例如，公路局橋梁養護與設計塗裝分級選用、維護頻率訂定及經費補助順序考量，套疊橋梁位址篩選高鹽害潛勢橋梁，以加強巡檢及採取補強措施。
2. 國內大氣腐蝕環境分類成果提供中華民國防蝕工程學會、台塑企業、中國鋼鐵、公路局、國道新建工程局、經濟部工業局、台灣高鐵、臺灣世曦工程顧問公司、中興工程顧問公司等產官學研各界參考應用。

參考文獻

1. ISO 9223/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification.
2. 陳桂清、柯正龍、羅建明、羅俊雄，「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(2/2)」，交通部運輸研究所，2009。
3. 陳桂清、柯正龍、羅俊雄、羅建明、陳新北、劉益雄、翁榮洲，「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(1/2)」，交通部運輸研究所，2008。
4. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(1/4)」，交通部運輸研究所，2012。
5. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(2/4)」，交通部運輸研究所，2013。
6. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(3/4)」，交通部運輸研究所，2014。
7. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「大氣腐蝕因子調查及腐蝕環境分類之研究(4/4)」，交通部運輸研究所，2015。
8. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2)」，交通部運輸研究所，2016。
9. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「金屬材料腐蝕環境調查研究(2/2)」，交通部運輸研究所，2017。
10. 羅建明、陳桂清、柯正龍，「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究(1/4)」，交通部運輸研究所，2017。
11. 羅建明、黃宇謙，「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」，交通部運輸研究所，2019。
12. 羅建明、黃宇謙，「108 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」，交通部運輸研究所，2020。
13. 羅建明、莊凱迪、黃宇謙，「109 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕

環境調查研究」，交通部運輸研究所，2021。

14. 羅建明、蔡立宏、張道光、莊凱迪、黃宇謙，「110 年臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」，交通部運輸研究所，2022。
15. 羅建明、蔡立宏、賴俊呈、黃宇謙，「111 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與工業區關聯性研究」，交通部運輸研究所，2023。
16. 謝幼屏、蔡立宏、羅建明，「112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究」，交通部運輸研究所，2024。
17. 林維明、陳桂清、饒正、周祖望、黃永光、吳信昇、柯正龍、徐如娟、洪健龍、楊淵洲、蔡克群、毛維雲、高志勇、魏豐義，「臺灣海域之腐蝕特性、防蝕設計、材料之選用及開發研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1991。
18. 林維明、饒正，「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所專刊第 59 號，1990。
19. 饒正、林維明、陳桂清，「港灣 R.C 結構物修理系統評估研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1994。
20. 林維明、饒正，「澎湖跨海大橋腐蝕調查研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所專刊第 41 號，1987。
21. 林維明、饒正等，「港灣鋼構造物耐久性研究第一年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1990。
22. 饒正、柯正龍等，「港灣鋼構造物耐久性研究第二年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1991。
23. 陳桂清、饒正、柯正龍等，「港灣鋼構造物耐久性研究第三年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1992。
24. 陳桂清、饒正、柯正龍，「港灣鋼構造物耐久性研究第四年報告」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1993。
25. 林維明、陳桂清、饒正、黃永光、吳信昇、柯正龍、徐如娟、陳正義、何木火、王培源、林隆貞，「港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1991。

26. 饒正、林維明，「港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1996。
27. 饒正、陳桂清、柯正龍、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究(一)」臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1997。
28. 陳桂清、饒正、張道光、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究(二)」臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1998。
29. 饒正、李賢華、宋克義、羅俊雄，「現有結構物安全評估及維護研究(三)」臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1999。
30. 饒正、陳桂清、李釗、李賢華，「現有結構物安全評估及維護研究(四)」交通部運輸研究所，2000。
31. 饒正、柯正龍，「水文及污損生物對材料腐蝕之探討」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1995。
32. 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港工結構材料海生物附著與對策研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1997。
33. 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港港工結構腐蝕與海生物附著研究」，臺灣省政府交通處港灣技術研究所，1999。
34. 饒正、陳桂清、柯正龍、張道光，「碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究」，交通部運輸研究所，2002。
35. ISO 9224/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres –Guiding values for the corrosivity categories.
36. ISO 9225/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of pollution.
37. ISO 9226/1992: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
38. Corvo F. Haces C, Betancourt N., et al., Atmospheric corrosivity in the Caribbean Area. Corrosion Science, 1997, 39(5): 823-833.
39. Veleva L., Pérez G., Acosta M., Statistical analysis of the

temperature-humidity complex and time of wetness of a tropical climate in the Yucatán Peninsula in Mexico. *Atmospheric Environment*. 1997, 31(5): 773-776.

40. Morales J., Martin-Krijer S., Diaz F., et al., Atmospheric corrosion in subtropical areas: influences of time of wetness and deficiency of the ISO 9223 norm[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47: 2005-2019.
41. Morales J., Diaz F., Hernandez-Borges J., et al., Atmospheric corrosion in subtropical areas: Statistic study of the corrosion of zinc plates exposed to several atmospheres in the province of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49:526-541.
42. ISO 9223/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation.
43. 孫飛龍、蔣荃、劉婷婷、劉玉軍、趙春芝、馬麗萍，「ISO 9224 大氣腐蝕性等級的指導值標準更新解讀」，*環境技術*，2015 年第 2 期，74-76 頁，2015。
44. ISO 9224/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres –Guiding values for the corrosivity categories.
45. ISO 9225/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of pollution.
46. ISO 9226/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
47. ASTM G116: Standard Practice for Conducting Wire-on-Bolt Test for Atmospheric Galvanic Corrosion, 2020.
48. ISO 8565/2011: Metals and alloys - Atmospheric corrosion testing - General requirements for field tests.
49. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13401 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-分級、測定與評估，2019。

50. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13753 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-測定標準試片之腐蝕速率以評估腐蝕性，2019。
51. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13754 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)，1996。
52. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 14122 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕－試片腐蝕生成物清除法，1997。
53. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS14123 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕測試-現場測試之一般要求，2020。
54. Metals Handbook- Corrosion, Metals Handbook Ninth Ed., Vol. 13, ASM International, Ohio, 1988.
55. Odnevall I., and C. Laygraf, "Atmospheric corrosion", ASTM STP 1239, W.W. Kirk and Herbert, H. Lawson, Eds., Philadelphia, 1995.
56. Outdoor atmospheric corrosion", ASTM STP 1421, H.E. Townsend Ed., West Conshohocken, PA, 2002.
57. Gray K.O., "Enviroment of Deep Ocean Test Site, U.S.Navel Civil Engineering Laboratory, Technical Note, N-657", p. 41, 1965.
58. Whitman W., R.Russll, V.Altieri, "Industrial Engineering Chemistry", Vol.16, p. 665, 1924.
59. Fink F.W., "Corrosion of Metals in Seawater", U.S. Department of the Interior, Office of Saline Water, Research and Development Progress Report, No.46, 1960.
60. Uhlig H.H., "The Corrosion Handbook," (La Que), John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 387-388, 1948.
61. Samuel A. Bradford H.H. "Corrosion Control", Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 1993.
62. LaQue, F. L., Marine Corrosion cause and Prevention, John Wiley & Sons, New York, 1975.

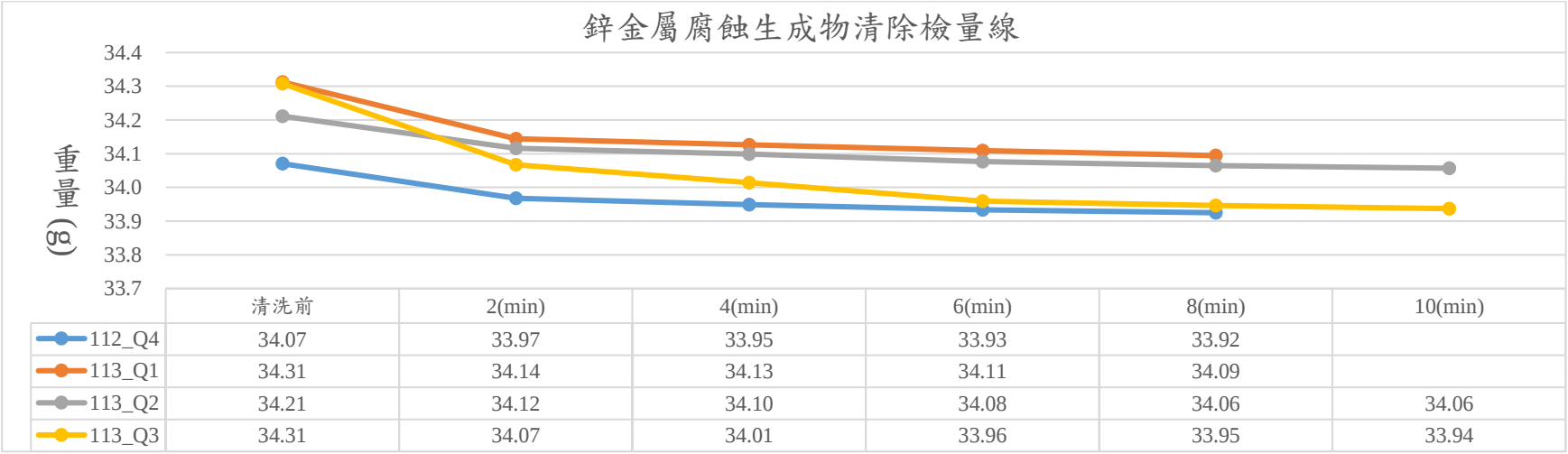
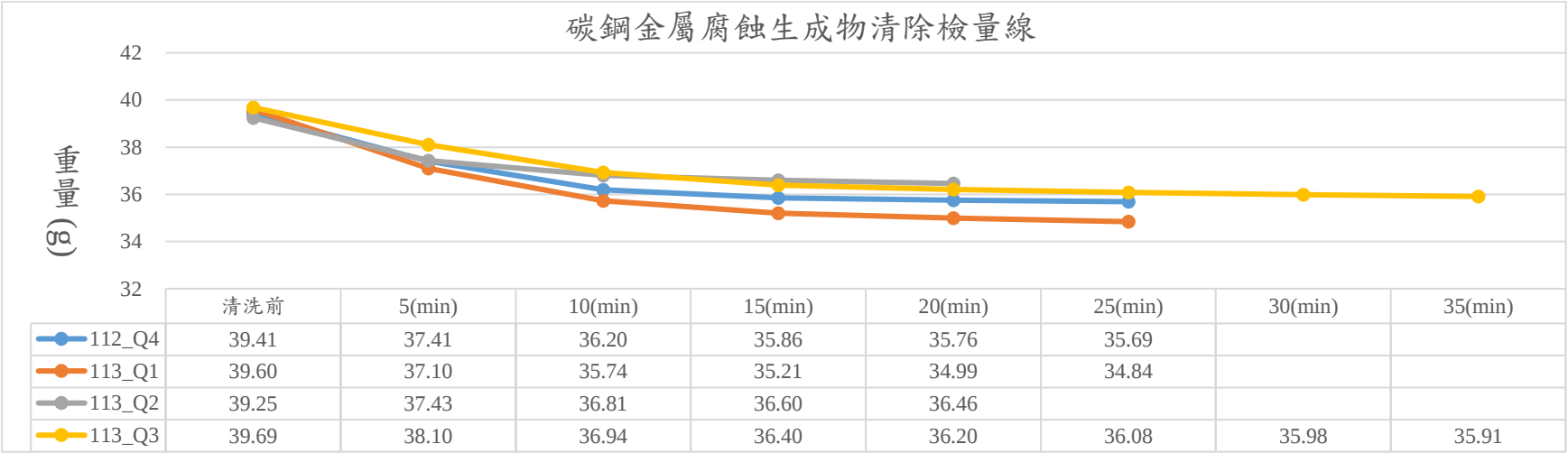
63. Roberge P.R., R.D. Klassen, & P.W. Haberecht, Atmospheric corrosivity modeling-a review. *Materials and Design*, 23, 321-330, 2002.
64. Corvo, F., Perez, T., Dzib, L. R., Martin, Y., Castañeda, A., Gonzalez, E., & Perez, J. Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Corrosion Science*, 50(1), 220-230, 2008.
65. Luo J. S., Y. H. Liu , H. P. Chen , Y. F. Chiu , K. C. Chen , J. L. Ko Comparison of Seasonal Atmospheric Corrosion in Taiwan *Journal of Chinese Corrosion Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 55 ~ 68, 2011.
66. Mendoza, A.R., & Corvo, F., Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel. *Corrosion Science*, 41, pp.75-86, 1999.
67. Legault R.A., and V.P. Pearson, in: *Atmospheric factors affecting the corrosion of engineering metals* ASTM STO, 646, ASTM, Philadelphia, 1978.*engineering metals* ASTM STO, 646, ASTM, Philadelphia, 1978.
68. Pourbaix M., *The Linear Bilogrithmic Law for Atmospheric Corrosion in Atmospheric Corrosion*, W.H. Ailor, Ed., John Wiley & Sons, 1982.
69. Morales J., F. Diaz, J. Hernandez-Borges, S. Gonzalez and V. Cano, *Corrosion Science*, No. 49, pp.526-541, 2007.
70. Su F.R., *Investigate the corrosion relationship of atmosphere and metal*, National Taiwan University Department of Environmental Engineering Master's Thesis, 1988.
71. Tsai K.J., *Electricity atmospheric corrosion testing and related materials database set up summary report*, Industrial Technology Research Institute, Taiwan Power Research Institute, 1993.
72. Chou S.F., C.J. Wang, J.S. Luo, Y.F. Chiu, K.C. Chen, J.L. Ko, A Regression Model for Predicting the Corrosion Rate of Zinc in Taiwan *Journal of Chinese Corrosion Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp.219-230, 2011.

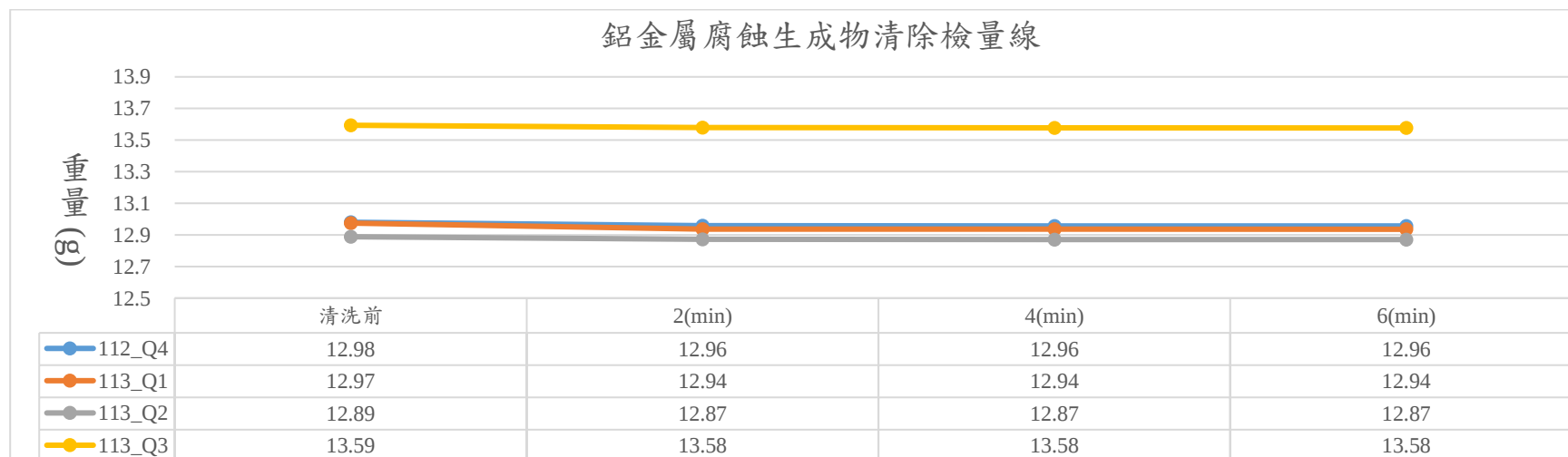
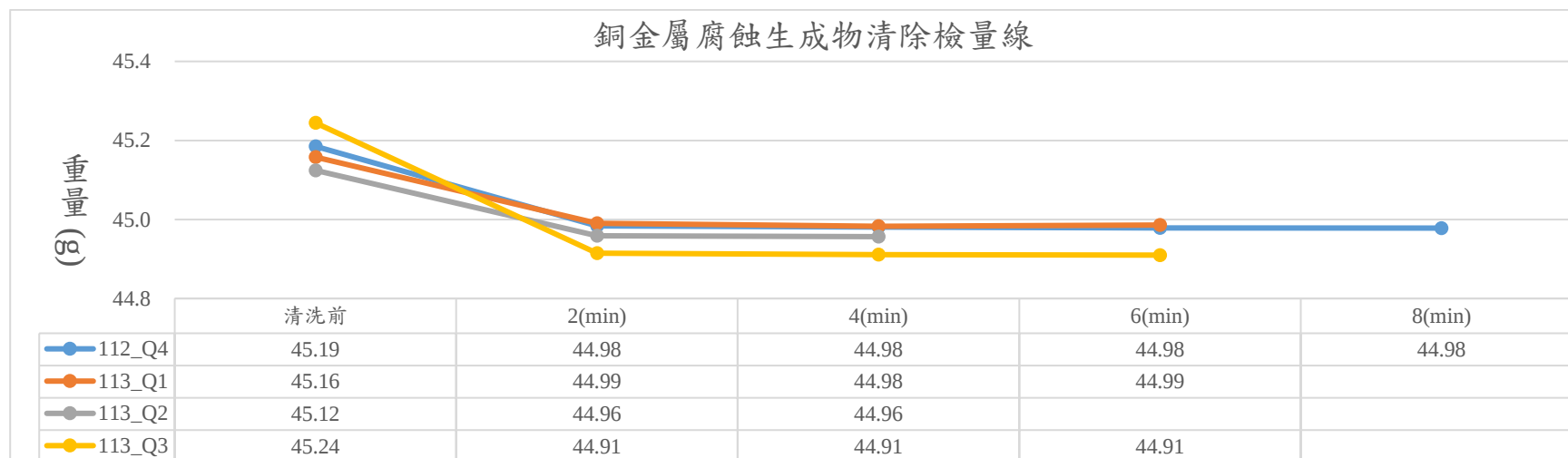
73. Lo C.M., L.H. Tsai, M.D. Lin, Correlation between carbon steel corrosion and Atmospheric factors in Taiwan, in: Proceedings of the 19th International Corrosion Congress, Jeju Korea, 2014.
74. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16238：2024 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-腐蝕性級別的指引值，2024。
75. ISO 8407/2009: Corrosion of metals and alloys —Removal of corrosion products from corrosion test specimens, 2009.

附錄一

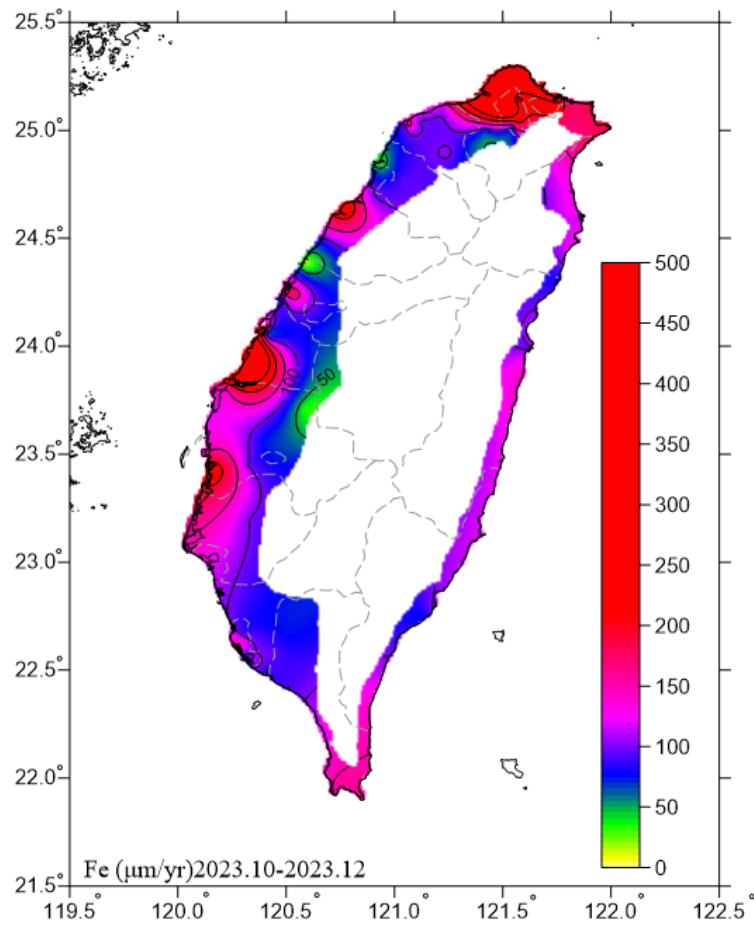
腐蝕生成物清除檢量線、腐蝕速率等
位線分布圖及腐蝕環境分類圖

腐蝕生成物清除檢量線

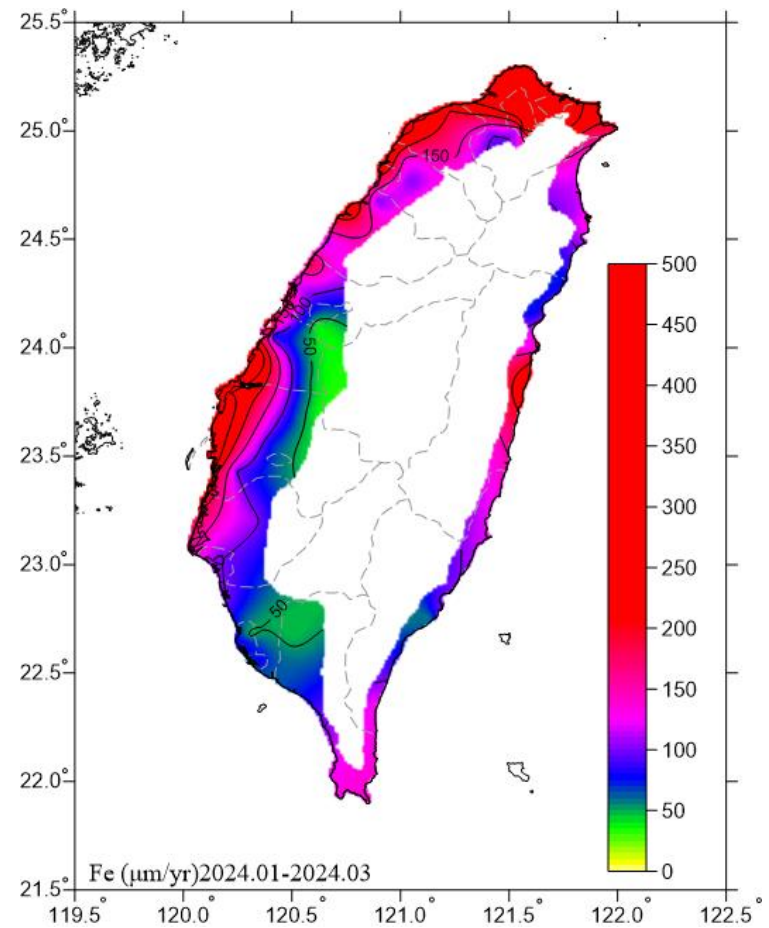




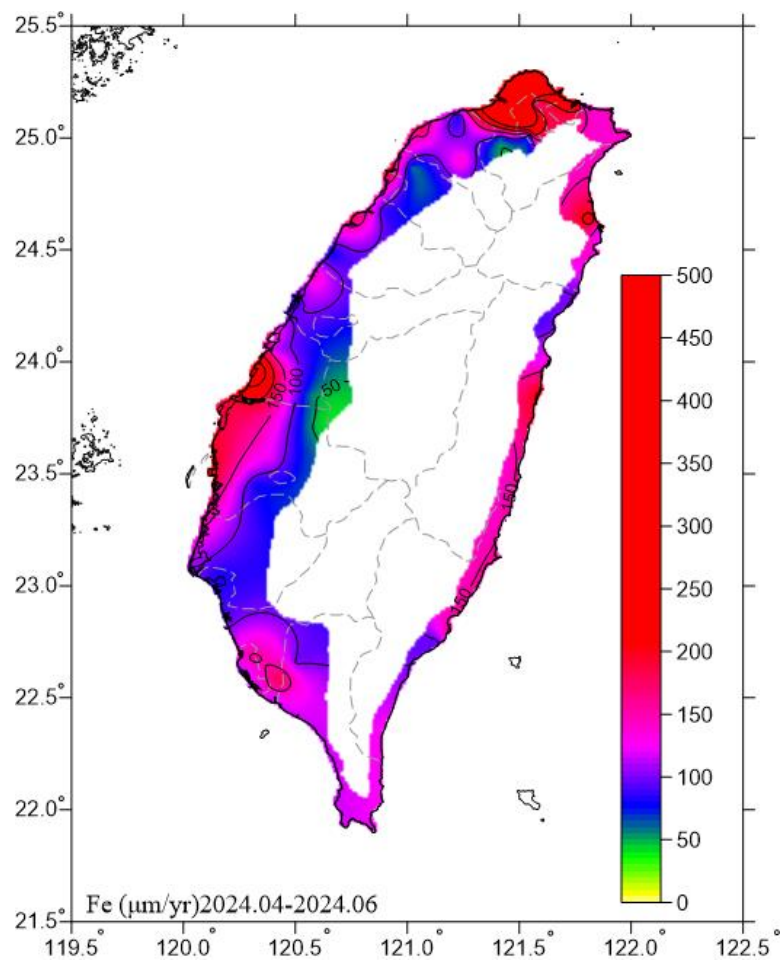
腐蝕速率等位線分布圖



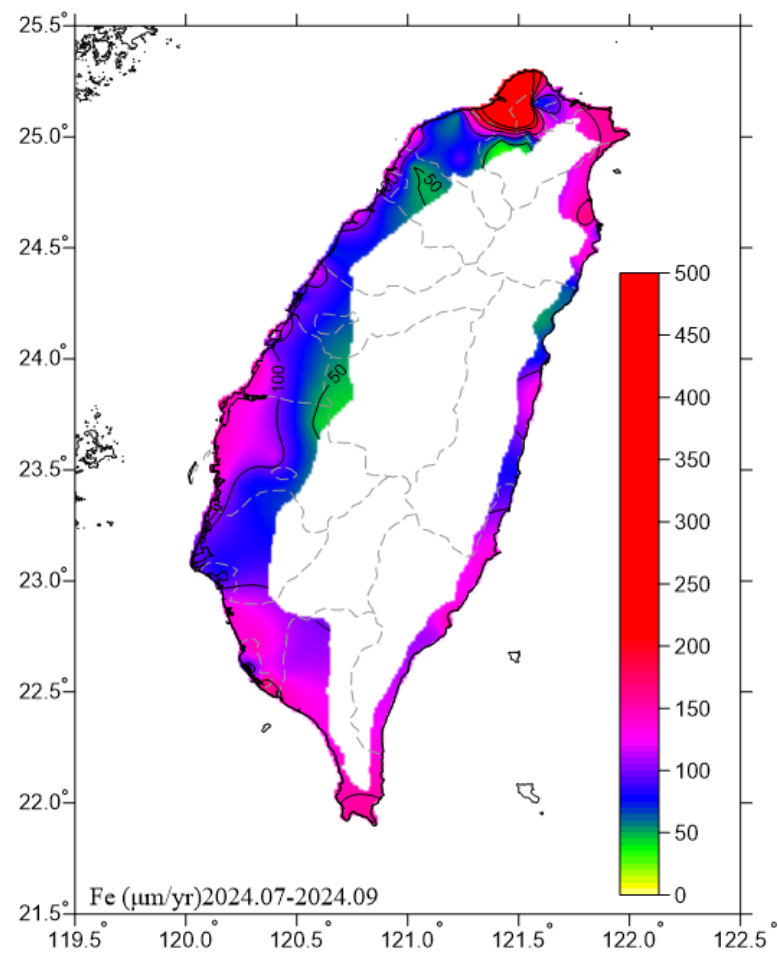
2023.10-2023.12 碳鋼腐蝕速率圖



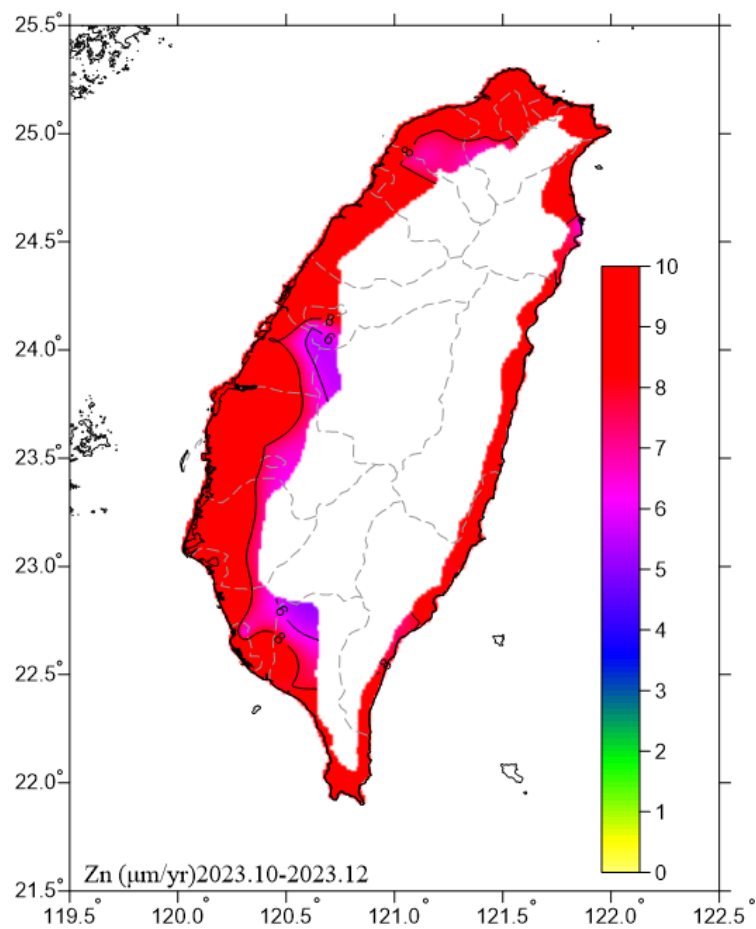
2024.01-2024.03 碳鋼腐蝕速率圖



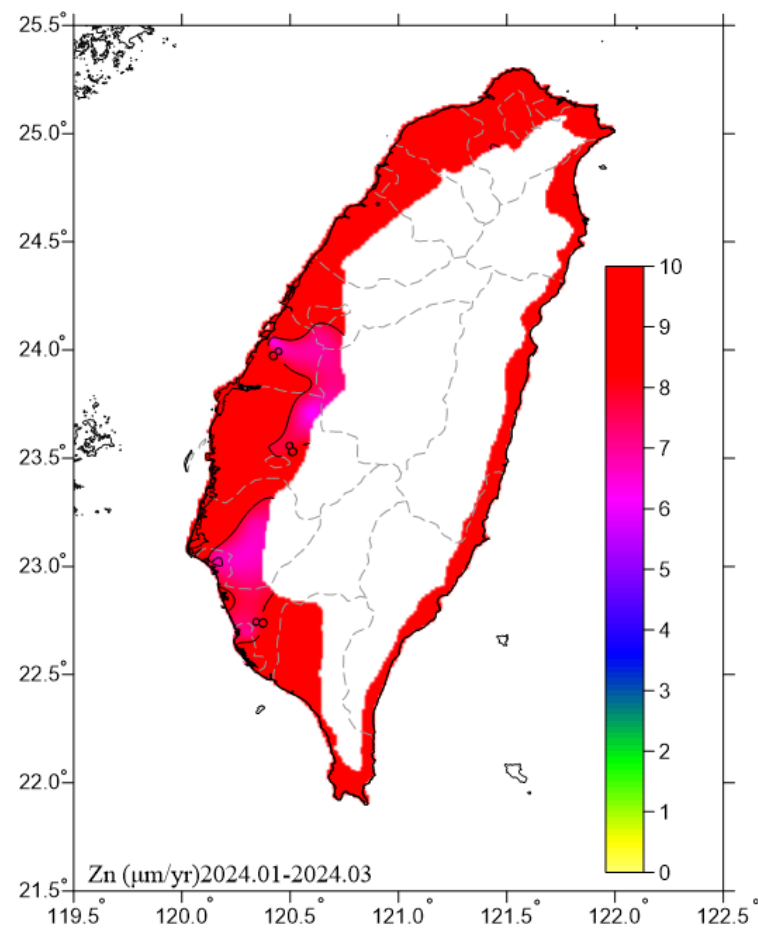
2024.04-2024.06 碳鋼腐蝕速率圖



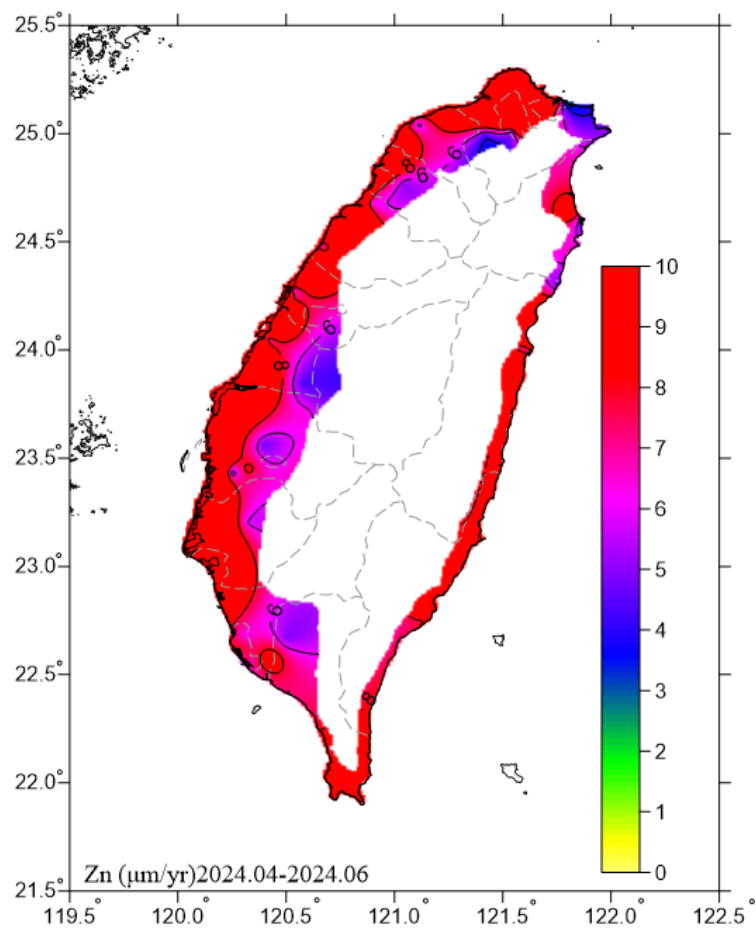
2024.07-2024.09 碳鋼腐蝕速率圖



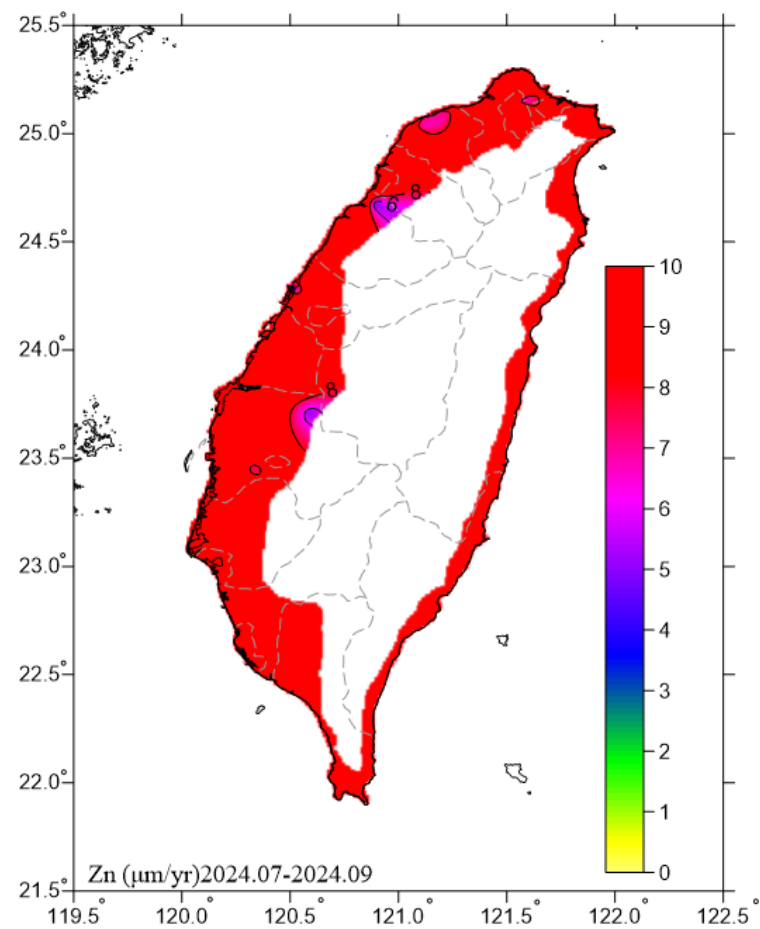
2023.10-2023.12 鋅腐蝕速率圖



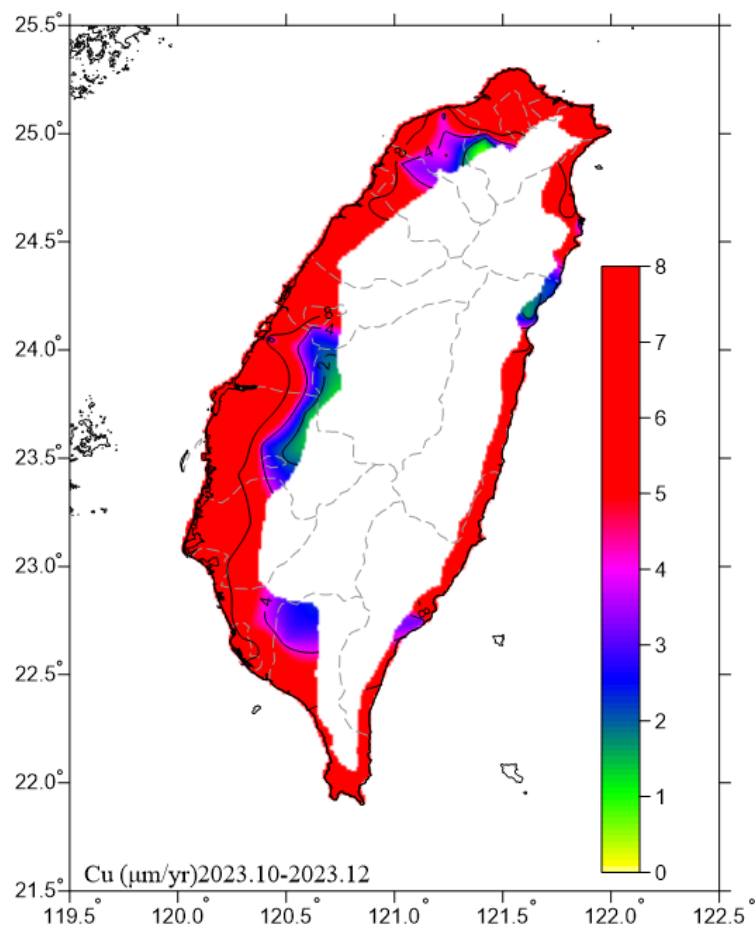
2024.01-2024.03 鋅腐蝕速率圖



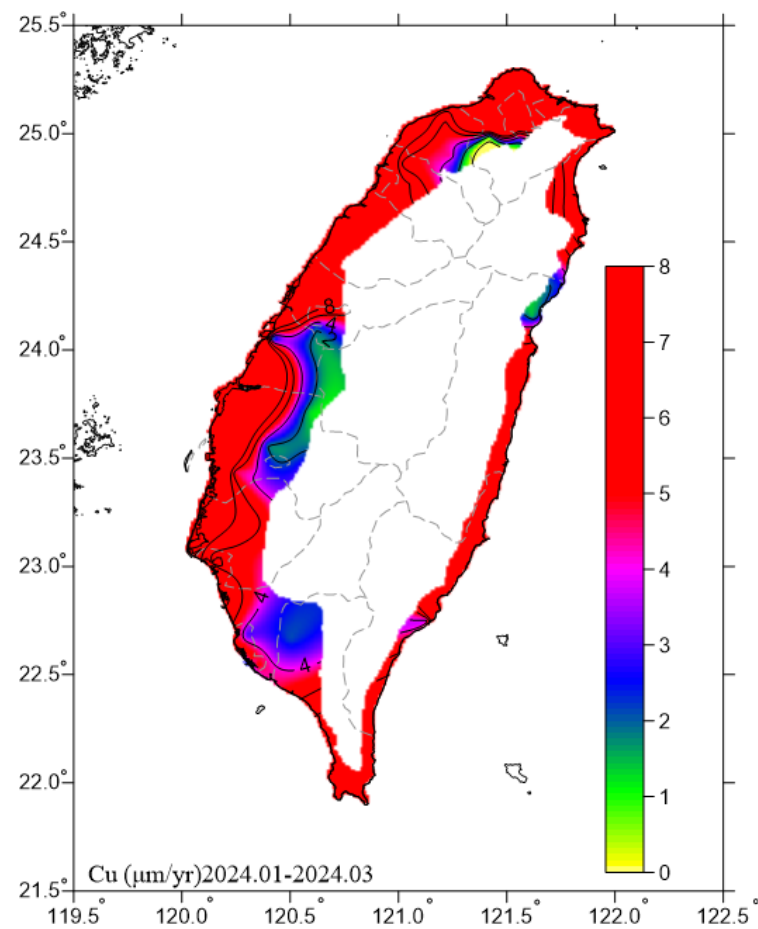
2024.04-2024.06 鋅腐蝕速率圖



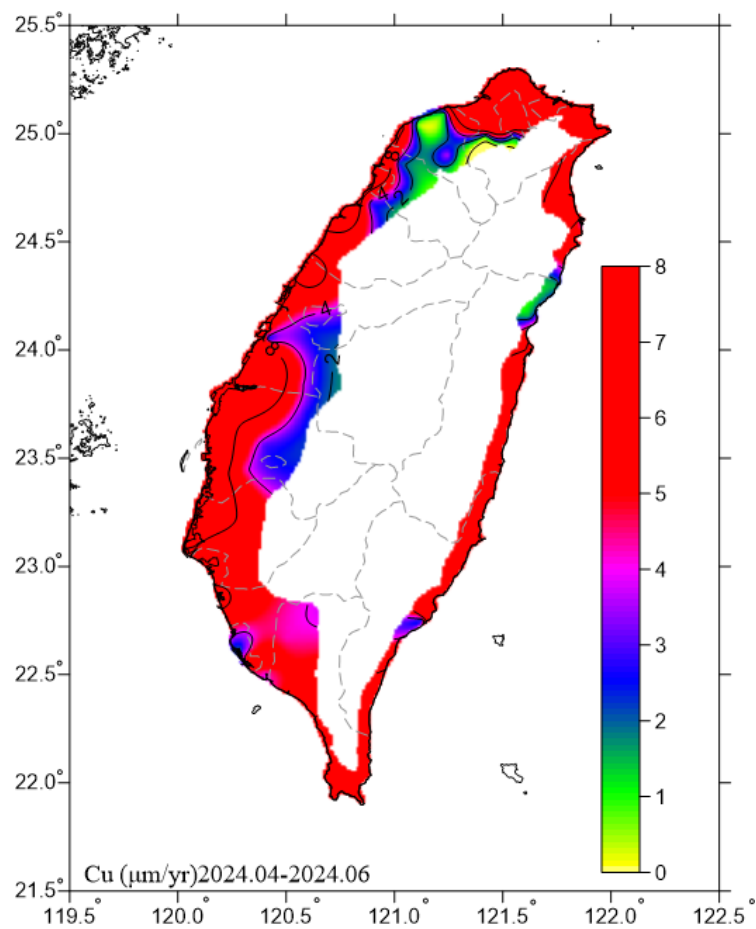
2024.07-2024.09 鋅腐蝕速率圖



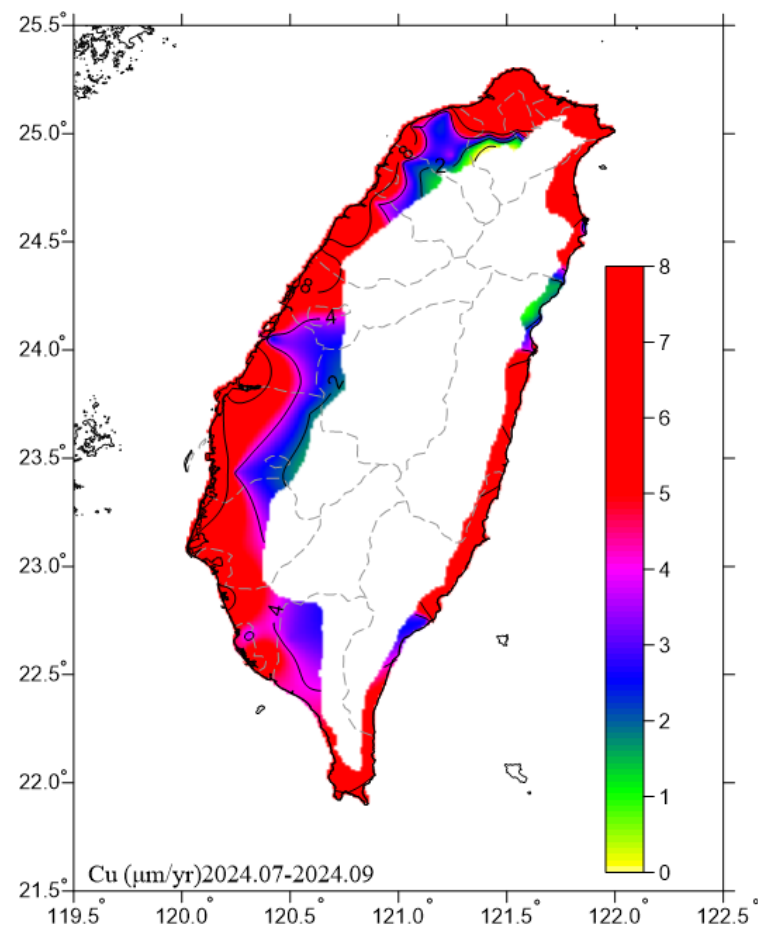
2023.10-2023.12 銅腐蝕速率圖



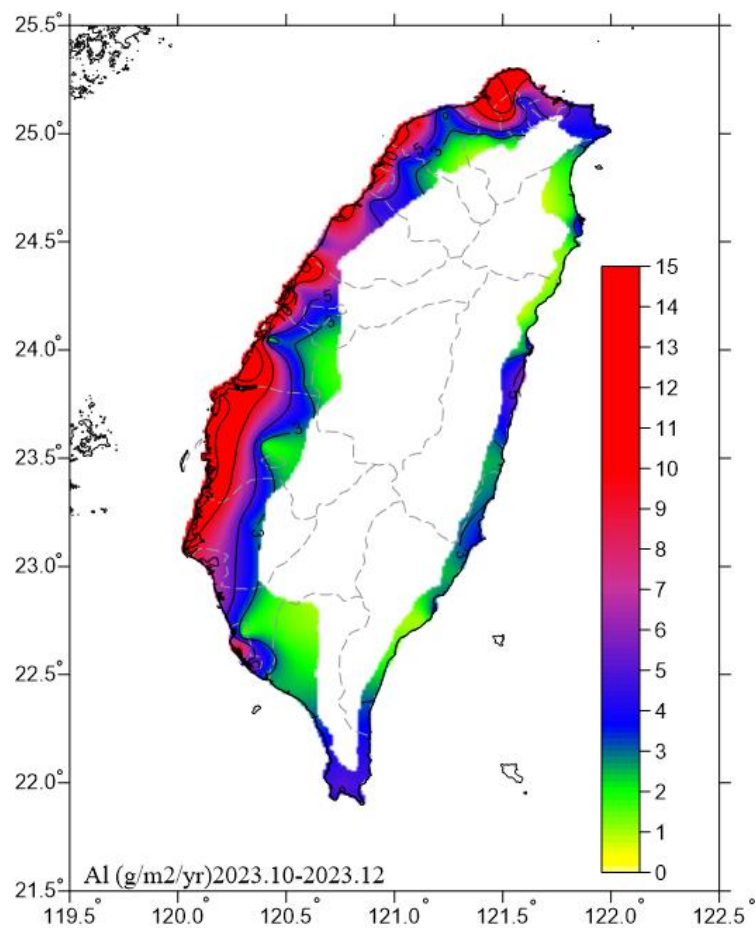
2024.01-2024.03 銅腐蝕速率圖



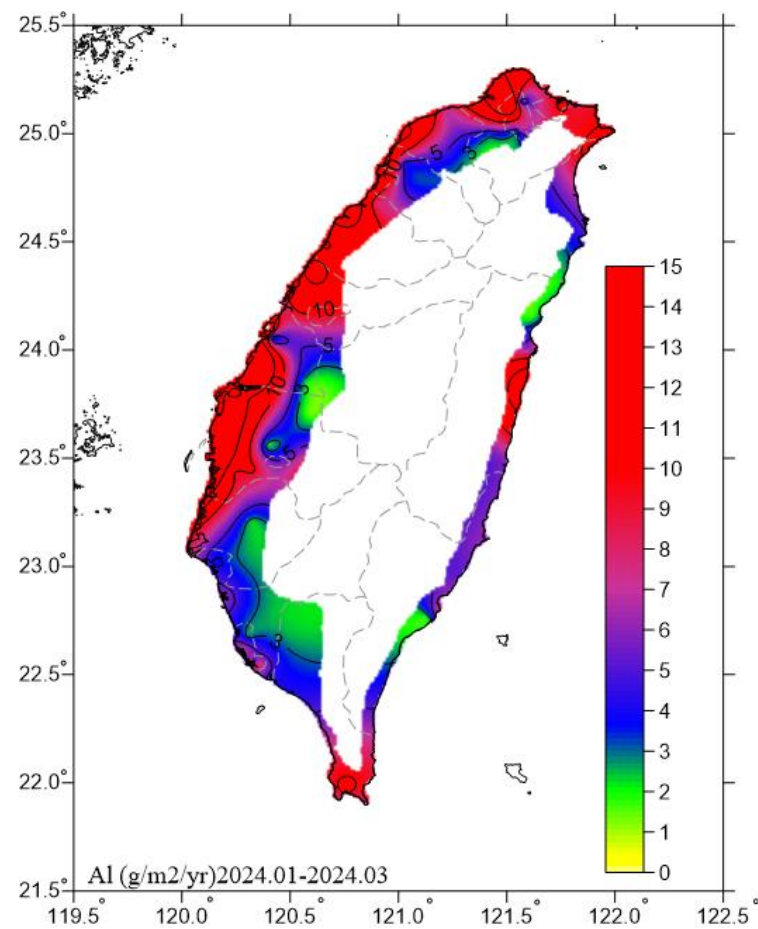
2024.04-2024.06 銅腐蝕速率圖



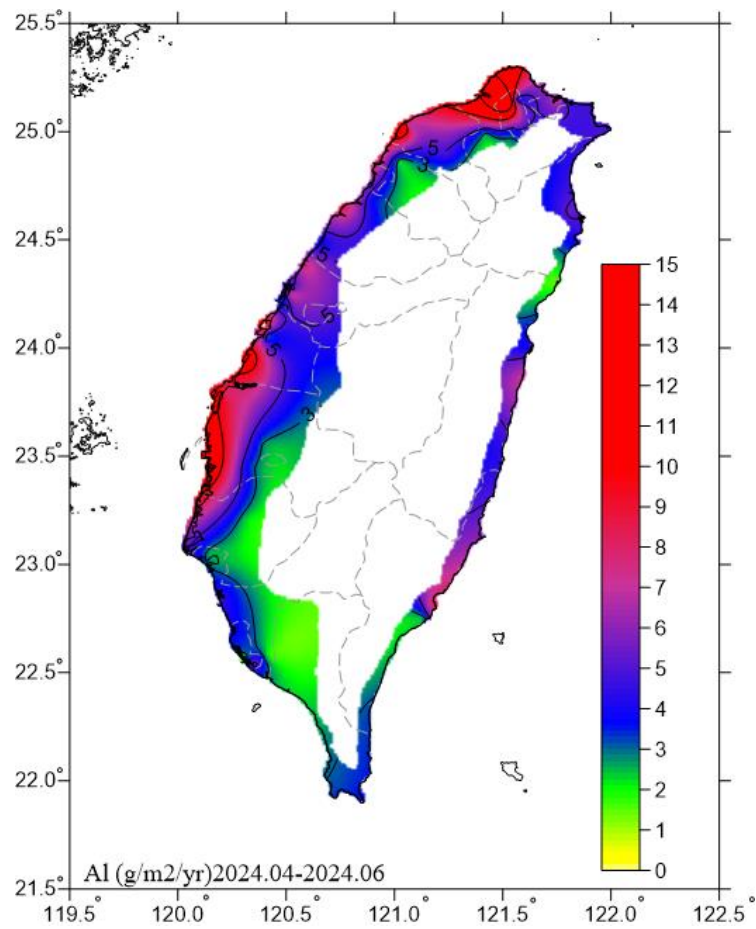
2024.07-2024.09 銅腐蝕速率圖



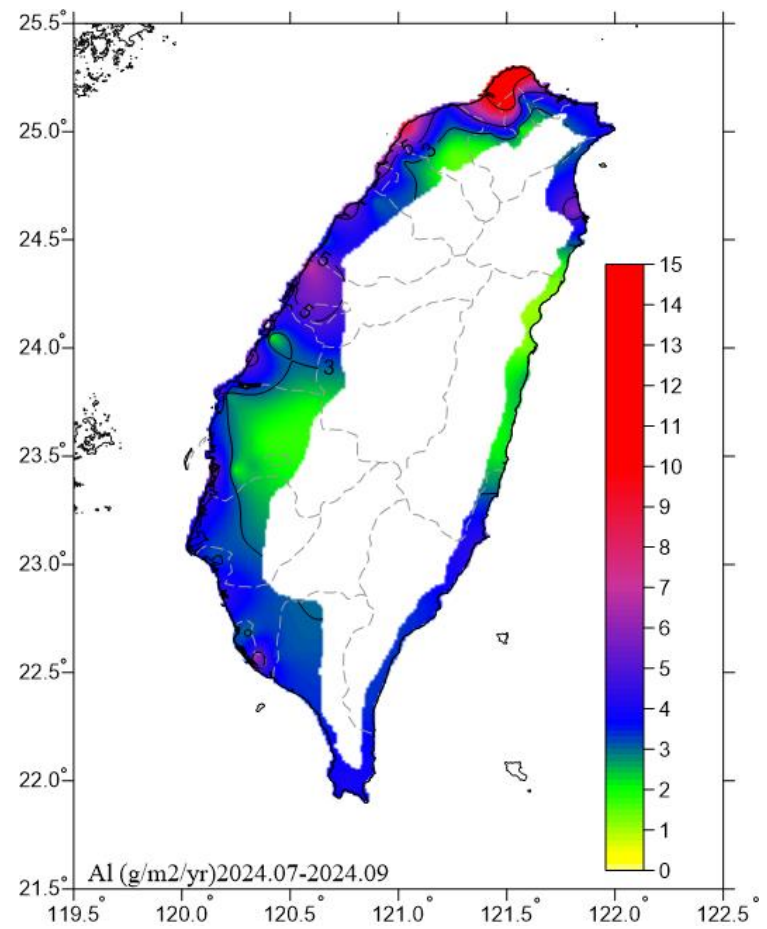
2023.10-2023.12 鋁腐蝕速率圖



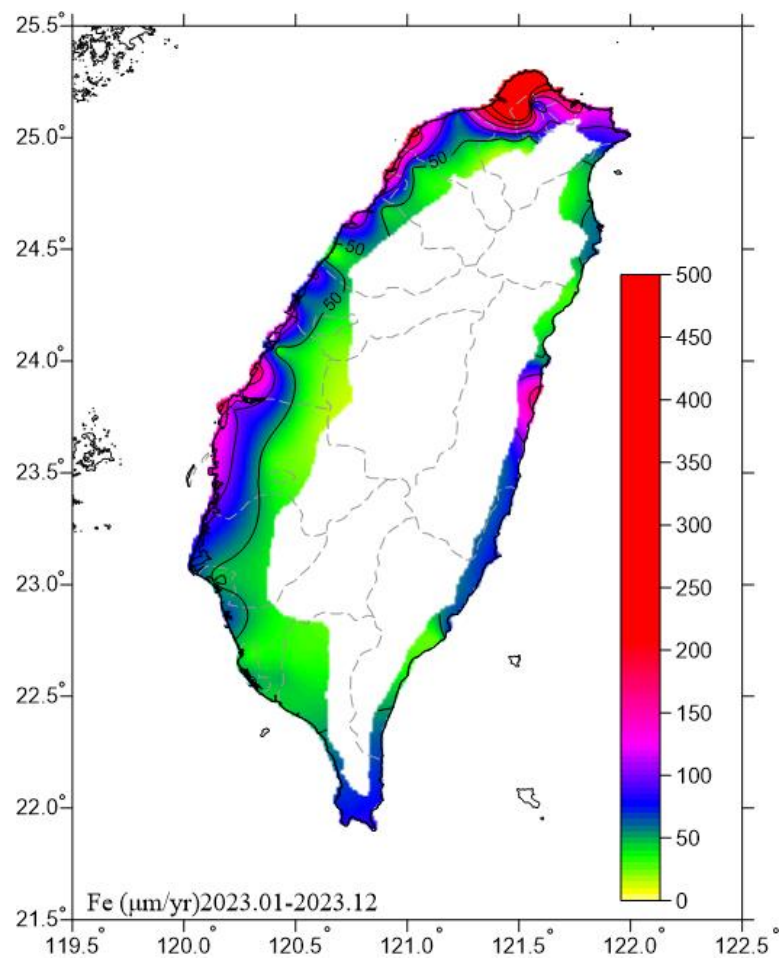
2024.01-2024.03 鋁腐蝕速率圖



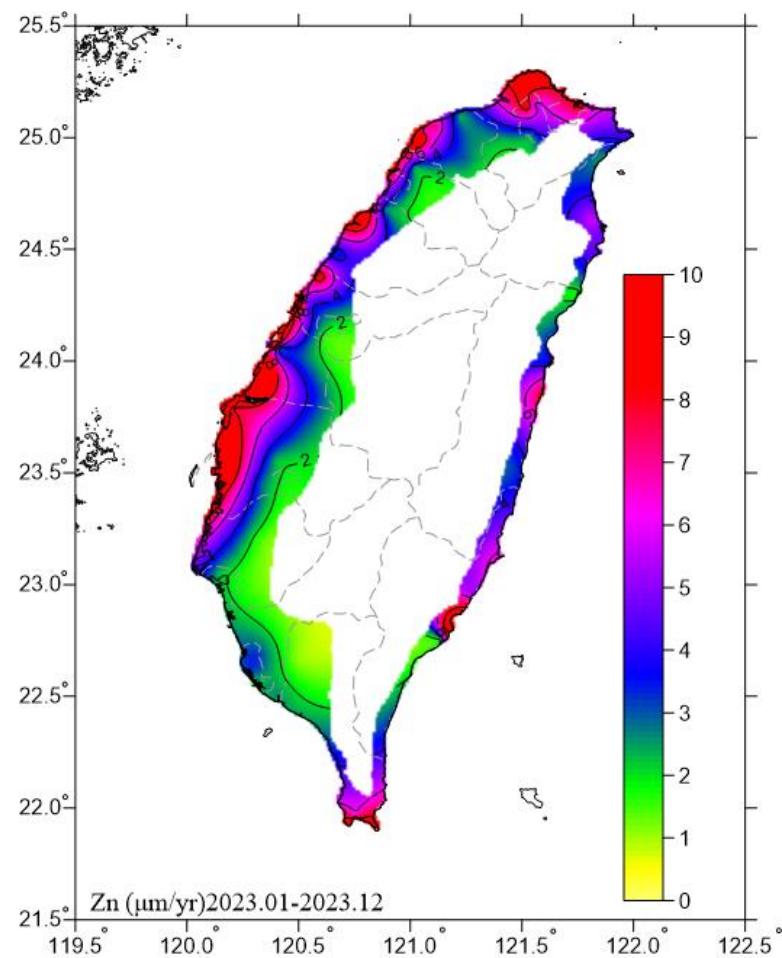
2024.04-2024.06 鋁腐蝕速率圖



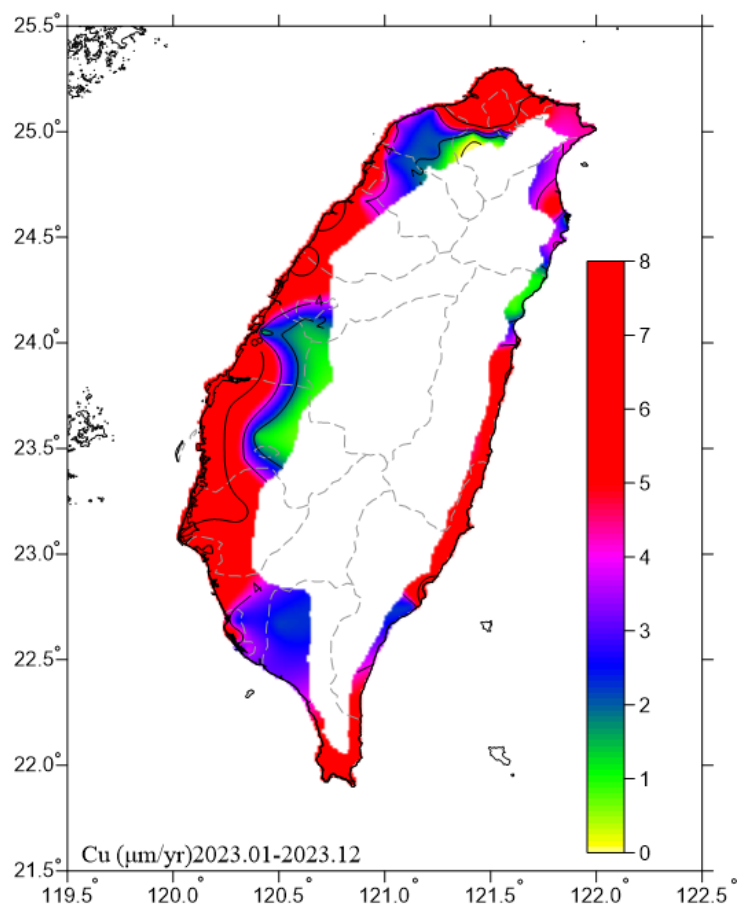
2024.07-2024.09 鋁腐蝕速率圖



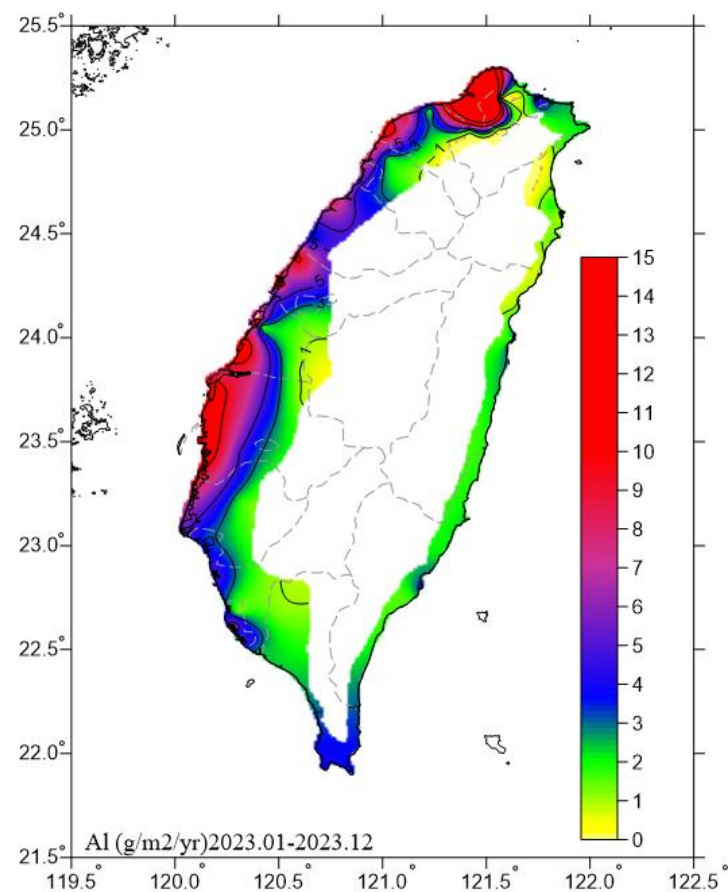
2023 年一年期碳鋼腐蝕速率



2023 年一年期鋅腐蝕速率



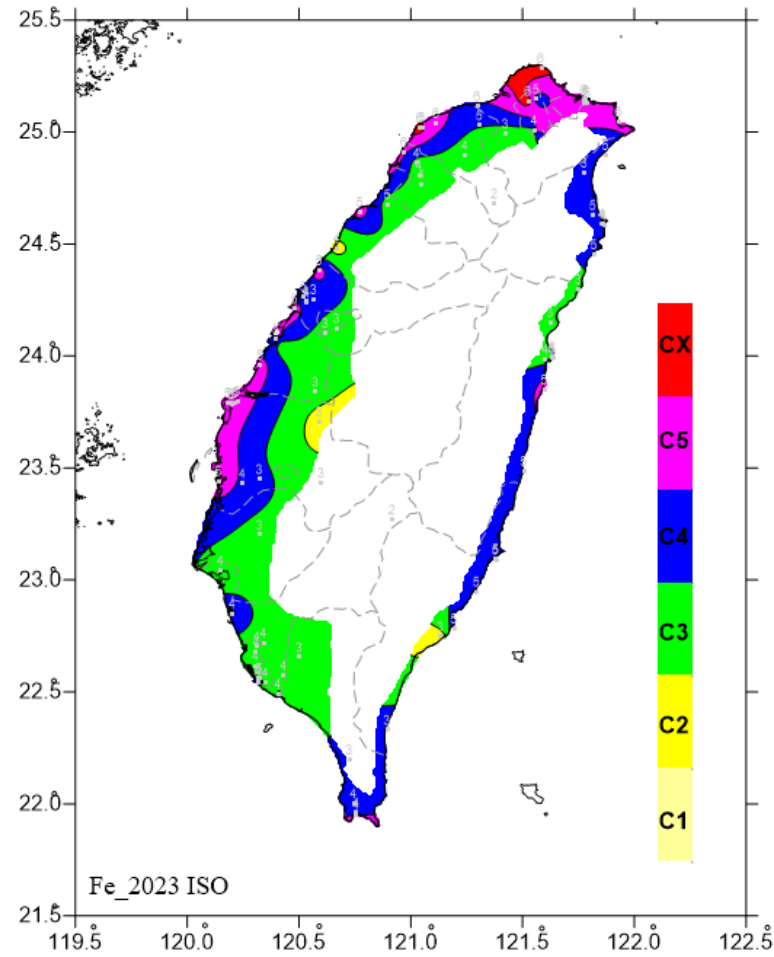
2023 年一年期銅腐蝕速率



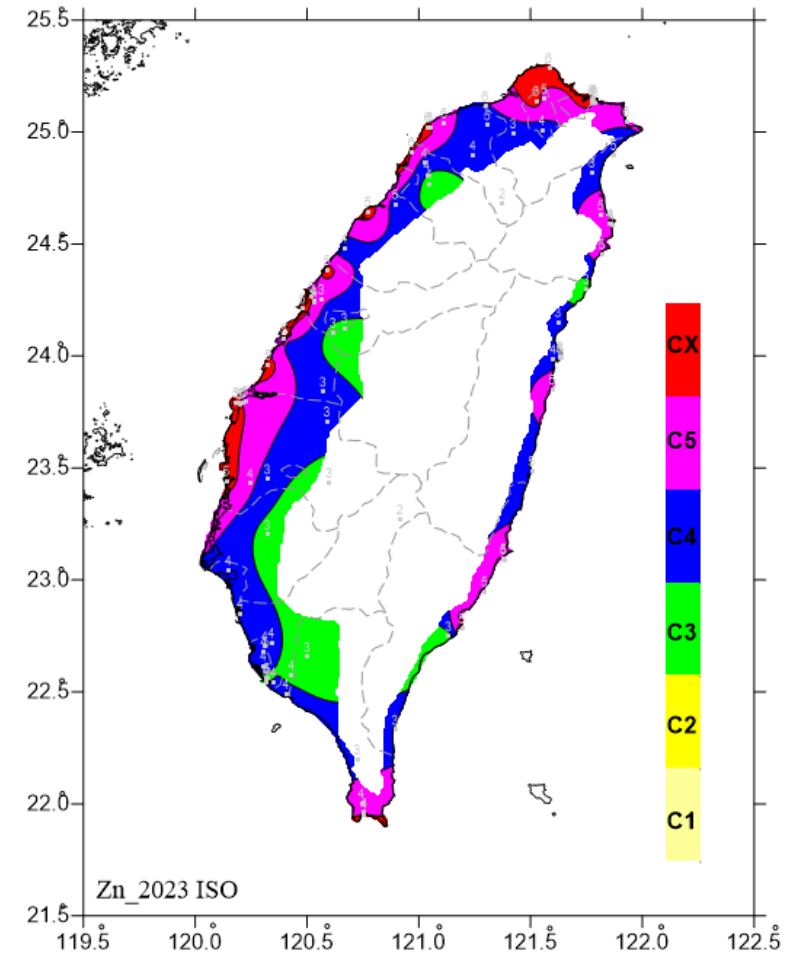
2023 年一年期鋁腐蝕速率

註：臺灣山區試驗站屬鄉村地區，與沿海地區、工業區之地區特性差距大，不適合一併繪製等位線圖，爰圖中以空白表示。

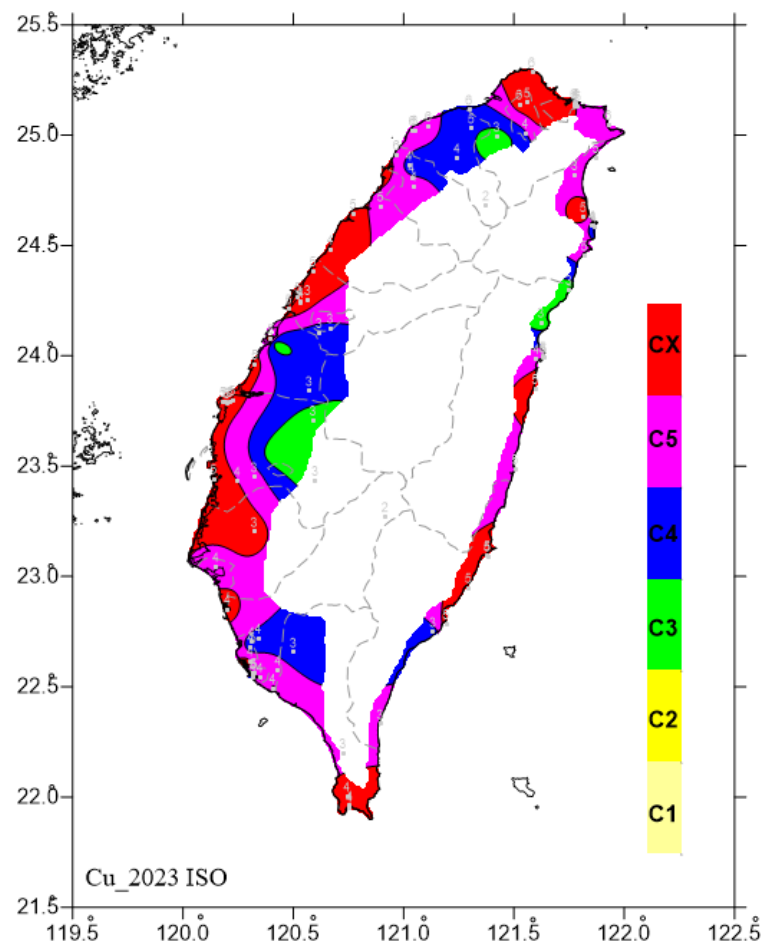
腐蝕環境分類圖



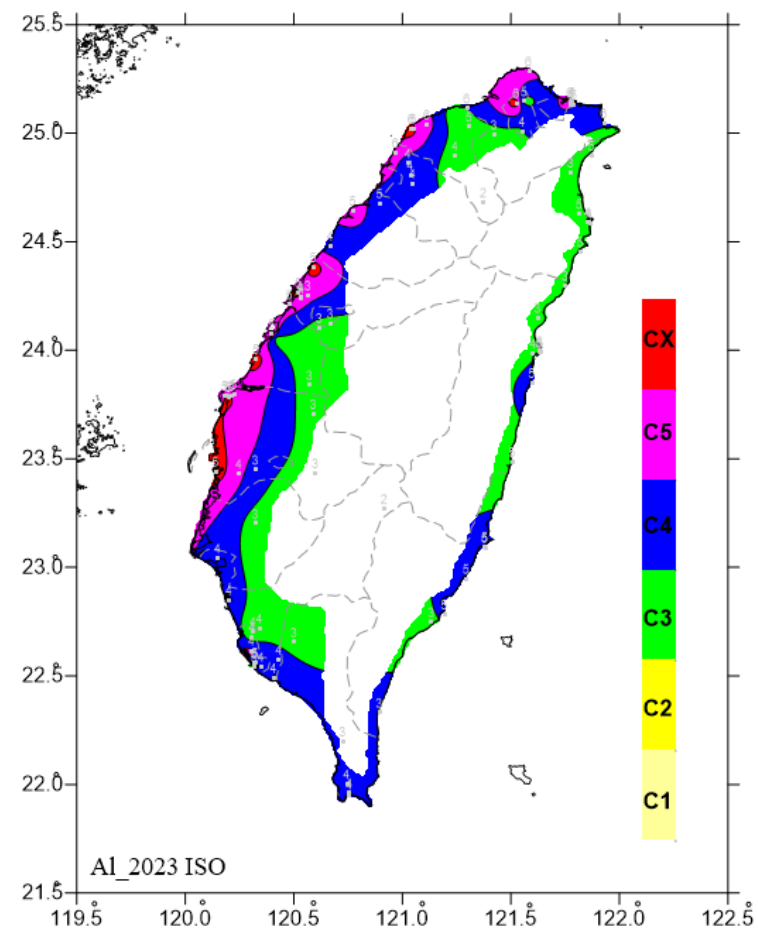
2023 年碳鋼年腐蝕速率 ISO 分類



2023 年鋅年腐蝕速率 ISO 分類圖



2023 年銅年腐蝕速率 ISO 分類圖



2023 年鋁年腐蝕速率 ISO 分類圖

註：臺灣山區試驗站屬鄉村地區，與沿海地區、工業區之地區特性差距大，不適合一併繪製腐蝕環境分類圖，爰圖中以空白表示。

附錄二

專家學者座談會會議紀錄

交通部運輸研究所運輸技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 113 年度自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：112 年 4 月 23 日(星期二) 下午 2 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任

紀錄：黃宇謙

伍、出單位及人員：如簽到表

陸、與會委員意見：

一、王委員錦榮

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 橋基保護是維持橋梁結構安全最重要的一環，本研究利用地工織布鋪設與鼎型塊結合，既可保護橋基，也可減少鼎型塊之流失，效益顯著，應可推廣應用，建議建立長期觀測，進一步驗證使用性及探討後續如何再精進。

2. 本工法是否可運用於港區橋梁？建議後續可評估。

(二) 113年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究，對港灣結構物之防蝕工法具有指導性之指標，可提供公共工程金屬結構物防蝕設計、延長使用壽齡及降低維護成本之應用，故本案有其推動的必要性及可行性。

(三) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

港灣構造物巡檢作業是港口管理機構日常工作之一，如何利用新興科技來進行實有必要性。

(四) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 港區土地碼頭大部分均由填海造陸而成，故地震時土壤液化有其風險性，例如：0403花蓮地震，花蓮港確實產生土

壤液化，並對碼頭造成破壞，爰此，針對港區地震液化風險的評估研究，確有必要性。

2. 建議本研究可長期進行，並建立臺灣各商港液化風險模式及高液化風險資料庫為最終目標。

二、何委員鴻文

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

本案研究成果對於橋梁維管單位未來辦理橋基保護工作有助益，後續建議能依國 3 大甲溪橋試辦成效提出適用河段、織布規格、鋪設及固定綁紮方式等指南。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 本案研究成果有助於檢測空間受限之橋梁檢測工作，未來申請專利建議需對目前已實際使用之檢測設備差異性及未來專利使用原則慎予評估。
2. 本工法是否可運用於港區橋梁？建議後續可評估。

(三) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

運用透地雷達於道路養護巡查並應用 AI 辨識將為未來趨勢，本案擬整合常用廠牌之資料前處理問題，將對後續 AI 辨識影像資料庫建置有助益。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

臺灣地區颱風、地震、豪雨頻繁，UAV 應用於邊坡防災之研議建議除公路主管單位外，亦可結合其他單位，例如：農業部農村發展及水土保持署、林業及自然保育署等。

三、吳委員松旺

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 大甲溪近年較無劇烈沖刷，相關驗證成果仍需視未來降雨規模持續進行追蹤。
2. 本年度公路管理單位仍將繼續進行橋墩鼎塊保護，後續可

配合研究討論相關現地鋪設，以達理論及實務合作。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

建議可配合定期橋檢作業，持續研討合適之工具與方式，例如：鋼箱梁內部檢測。

(三) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

公路管理單位使用 UAV 多是針對路權內邊坡，針對單一場址路權外邊坡非屬公路單位管養，然若需整體分析建議可一併納入資料蒐集。

四、林委員鎮華

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

橋梁監測資料，例如：水位、流速等，建議回饋數值模擬進行驗證，另可考量不同環境情境之模擬。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

建議蒐集開放式橋梁及封閉式橋梁之比例，藉以思考後續工具的研發或如何搭配其他檢測工具。

(三) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

建議可調查各式相關軟體的通用性，並取得不同單位的透地雷達使用資料，以增加資料量和 AI 學習之相容性。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

建議可針對有監測儀器之邊坡進行探討，以和 UAV 影像辨識結果進行比較及相互驗證。

(五) 113年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

建議納入在該環境中公共設施材料進行比對，探討其腐蝕速率變化以及如何回饋至防蝕和延壽，降低維護成本。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

建議建立防波堤透地雷達資料庫，並比對震後或其他災害發

生時之變化。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

建議配合鑽探報告資料，未來可於地震前後進行比對。

五、張委員欽森

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 本研究計畫共分111~114年共4年執行，之前尚有107~110年的相關研究，運輸技術研究中心(以下簡稱運技中心)同仁前前後後耗費8年時間進行本項研發工作，其中包括水工模型試驗、現場實作測試、數值模擬等作業，值得肯定，也希望本項研究最後能有良好成效，並實際推廣到相關政府單位來引用。
2. 有關採用鼎型塊做為橋基保護工雖為一般橋梁河川慣用型式，惟因後續機關執行時，依政府採購法規定需有同等品之規定，以避免有綁標之嫌，因此，建議研究成果分析儘量可以較通則參數訂定此工法之材料型式，以利後續機關執行。
3. 相關文獻及資料收集僅提到河道地形、歷年沖刷變化及流速等資料，建議應再增加相關河川流量、輸沙量及水位等水文資料，並進行必要之極值統計分析，以利試驗結果可對應後續設計所需採用之回歸期條件。
4. 運技中心前往華光工程顧問股份有限公司(以下簡稱華光公司)推廣本研究成果時，曾提到本保護工法適用於卵礫石層，對砂質地形較不適用，在建置數值模式時對卵礫石層之模擬及試驗地形之重現合理性應是模式較為困難之處，也將攸關模式未來推測之成果，希望運技中心同仁多多費心思考相關議題，必要時可拜訪業界或學術界，共同討論研究。
5. 建議本計畫可納入相關國內外經驗公式分析結果比較，如中興大學林呈教授對此領域有許多研究成果，除可進一步

驗證國內適用之經驗公式之可行性外，亦可做為該工法量化評估成效之參考。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 感謝運技中心蔡主任率領研究團隊到華光公司來分享本項研發成果，會中雙方進行相關技術及意見交流，希望對雙方都能有所助益。近期華光公司將爭取公路局橋梁檢測及耐震評估工作，以及鐵道局高架橋梁檢測業務，若能順利取得標案，將會適時與運技中心協商，應用此項研究成果在實際檢測工作之可行性。
2. 前次推廣會議中，華光公司同仁曾建議鏡頭影像納入尺寸之可行性，以便在檢測時可即時判斷構件之劣化情形，及是否需再進一步仔細檢測之必要性。
3. 在簡報中，辦理方式之推廣活動提到「評估本橋檢工具後續精進方向，或研發新型橋檢工具之可行性」，依以往工作經驗，港埠棧橋碼頭面板底部及港外碼頭連絡棧橋底部之檢測，各有其檢測之難處與限制，例如：棧橋碼頭面板底部或空間狹小，易受潮汐漲退影響，或碼頭縱深較深等；港外碼頭棧橋底部以往係以搭船並配合施工架方式進行檢測，需克服潮汐及風浪之影響，檢測作業都十分不方便，除耗時外，成果亦不易掌握。建議可思考納入後續研究之方向。
4. 水管橋之檢測作業，沒有行車動線，如何考量應用於此類橋檢工作？

(三) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 目前運用透地雷達檢測辨識地下管線及孔洞等的位置正確率僅60%，且與雷達波長有關，探測深度約2~5米，因此，如何蒐集及整理成正確的訓練樣本，提供後續人工智慧進行AI辨識，應是關鍵課題。
2. 透地雷達影像如若受到干擾訊號，都需要利用處理軟體進行消除，增益等方式處理，各廠牌透地雷達的分析應用軟體，可能有所差異，透過與業界或學者等訪談瞭解，應是

正確之方向，可藉此加強後端由 AI 判別之能力。

3. 各道路面層、基層、底層及下方土層等層面及材料的差異所造成的圖像特徵不盡相同，是否能夠針對此差異分類蒐集，以利後續研究之進行。
4. 未來人工智慧辨識 AI 成果，建議應與實地資料比對，建立檢核方法及標準。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 針對裸露型落石邊坡之浮落石、張力裂縫之 AI 深度學習之訓練樣本，建議可先找開源資料集，並納入本地訓練樣本，一起進行模型訓練，以提升 AI 判識之成效。
2. 邊坡防災之危險因子多，且非常複雜，建議可以納入：坡度、坡向、地質條件等其它因素進行整體性之判斷，其中坡度、坡向可利用 UAV 成果進行 DEM 計算取得。
3. 未來建議評估利用 Insar 之資料進行 AI 訓練之可能性。

(五) 113年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 本研究包含大氣腐蝕及水下腐蝕，自96年開始執行大氣腐蝕、104年加入水下腐蝕，應累積足夠多資料可做比對，目前研究是否都是針對該年度的腐蝕進行分析，建議可加入歷年分析，以瞭解大氣腐蝕環境及水下環境的長年趨勢。
2. 建議補充試驗對應之腐蝕因子，如螺旋金屬暴露試驗主要所得之腐蝕因子為何？
3. 簡報35頁有辦理大氣腐蝕環境調查取樣維護作業，但並無辦理水下腐蝕環境調查作業說明。
4. 計畫有說明大氣腐蝕因子，但是否針對水下腐蝕因子進行調查並分析，請補充說明。另建議補充目前所研析之腐蝕因子有哪些？是否有針對流速及水溫對水下腐蝕之影響？

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 建議可與臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)討論調整防波堤劣化度判定標準，依據「港灣構造物維護管理

手冊」，部分判定標準過於嚴苛，例如：沉箱部分劣化判定標準2及3是規定3mm之裂紋；而沉箱量體大，3mm之裂紋判定為缺損尺度有失比例原則、差異過大，且沉箱大部分位於水下，透過水下攝影判斷3mm之裂紋難度高。另外，上部工亦有類似之規範，1cm之裂紋可能為施工所致，且並不影響防波堤功能，建議可適度調整。

2. 建議防波堤進行檢修時，將檔案蒐整及歸類可納入應辦工作項目中，以利後續5年一次結構安全檢核之正確性及延續性。
3. 相關資料中均未提及新興科技是哪些項目，是否有預想項目？
4. 拋石防波堤之破壞通常由堤腳沖刷開始，導致消波塊移動及滑落，然人工巡檢僅能執行水面上之目視，初步判斷是否有異常情形，而水面下部分則需由潛水俠下水檢查，但因水流及波浪影響，潛水俠基於安全不容易接近防波堤檢視，因此，多音速測量應可被納入考量進行水面下結構物是否移動之佐證工具，提供參考。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 研究名稱所指精進定義是否僅為納入新建工程增加之地質資料，建議定義清楚是否僅為新增液化分析資料？
2. 研究項目及內容中，除液化潛能之評估及推估液化後沉陷量外，是否能增加其他可能造成碼頭損害之評估？

六、游委員中榮

(一) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 發明專利之標的較廣，通常是物質、物品、方法、材料及其用途的描述，新型專利之標的則僅及於物品之形狀、構造或組合的創作，建議可以發明專利為主。
2. 取得專利後，建議供我國研究機構或企業在我國管轄區域內製造或使用為優先，並鼓勵於橋檢相關專案推廣使用，提升國內橋檢技術發展。

(二) 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 提醒應用 AI 需要辨識者對於異徵的知識，並且樣本和基礎圖資需標準化。
2. 透地雷達管線資料或許比較容易取得，就個人所知已經有數個地方政府，例如：臺北市、新北市、桃園市、臺中市等，有利用透地雷達調查管線，並與管線資料庫做比對，或許有機會可以取得透地雷達斷面資料提供 AI 訓練，惟縣市政府應無圖像前處理的經驗。
3. 是否可以取得適當的地下孔洞模式以做為 AI 訓練？據悉臺北市新工處似有相關資料，資訊供參。

(三) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 建議明確定義判釋標的，例如：落石坡、緩坡、人工邊坡，因其破壞機制皆有所不同。另外欲判釋的邊坡特徵，例如：坡面植生、坡頂坡面裂縫、浮石、岩石解理、人工邊坡構造設施等，亦需考量。
2. UAV 影像取得並非一定是由機關自行拍攝，有可能是委外辦理，不同 UAV 影像取得則需要標準化，建議可評估設定航線自行飛行取得影像。
3. 建議提出 UAV 影像取樣率、航高、路線、拍攝角度、是否有參考比例(地面控制點)、取樣範圍(公路維管單位的關注範圍)和影像製作方式等建議。

(四) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

據悉港務公司有委託臺灣大學利用 UAV 結合 AI 進行港區設施自動化調查，建議可以蒐集資料參考。

(五) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 液化潛勢評估方式有好幾種，據悉新版的基礎設計規範有數種液化潛勢分析方法，現行港灣設計規範似乎只有 Seed 法，或許不同的研究成果可以提供給港務公司，提供設計規範修改的參考依據。

2. 本計畫是否有包含液化後地盤沉陷的分析？是 Ishihara & Yoshimine 法或是 Tokimatsu and Seed 法？

柒、結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

捌、散會：下午 4 時 30 分。

會議簽到表

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 113 年度自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：113 年 4 月 23 日(星期二)下午 2 時

參、地點：本所運輸技術研究中心2樓簡報室

肆、主持人：蔡主任立宏 蔡立宏

伍、出席單位及人員：

所外委員	簽名
王委員錦榮	王錦榮
何委員鴻文	何鴻文
吳委員松旺	吳松旺
林委員鎮華	林鎮華
張委員欽森	張欽森
游委員中榮	游中榮
本所運輸技術研究中心 柯副主任正龍	柯正龍
第一科	賴瑞豐 許鈞海 胡哲文 曾文偉 郭登輝 張道光 黃宇謙
第二科	李俊翔
第三科	林雅雯

(註：簽到表請掃描成 pdf 檔，若欲與會議紀錄整併成 1 個 pdf 檔，可至「https://www.ilovepdf.com/zh-tw/merge_pdf」，將會議紀錄與簽到表上傳後進行合併，再上傳至公文系統附件區供陳核)

附錄三

第 1 次工作會議紀要

113 年 6 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

時間：113 年 6 月 26 日(星期三)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 數值水理分析及文獻蒐集。
2. 數值模型分析流程及檢定與驗證事件選取。
3. 階段性成果應用。

(二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 相關智慧財產權及專利法規、專利申請程序，及專利地圖分析之相關研究文獻彙整。
2. 各構件之研發設計內容盤點，評估專利申請之可行性。
3. 本橋檢工具推廣應用工作執行進度。
4. 推廣活動回饋意見彙整。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 國內常用透地雷達廠牌、型號及其資料處理軟體彙整。

2. 支援相容各廠牌透地雷達分析應用軟體(第三方軟體)之基本資訊彙整。

3. 專家學者訪談，訪談對象包括國內透地雷達代理商、業界專家及學界專家。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. UAV 結合 AI 於邊坡之相關研究文獻蒐集。

2. 公路局訪談摘要。

3. 邊坡維護管理機制及防災流程探討。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 完成第 1、2 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗取樣維護作業，完成 112 年第 4 季、全年與 113 年第 1 季，大氣腐蝕劣化因子化學分析及金屬試樣酸洗工作。

2. 完成 112 年度試驗資料綜整分析工作，並將資料擴增於資料庫，公開於本中心網站供外界查詢。

3. 完成撰寫及出版「2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」工作，提供相關單位選用金屬材料與防蝕工法應用。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 各港區防波堤之巡檢項目與維護管理制度彙整與研析。

2. 防波堤常見之劣化項目探討。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 液化評估法相關文獻彙整。

2. 高雄港近 10 年新建工程之地質鑽探資料蒐集。

3. 完成高雄港地質鑽探資料盤點。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 討論文獻相關數據之引用應確認其適用性。
2. 討論數值模擬分析流程與檢定與驗證事件選取。

(二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 討論國內橋梁檢測相關設備專利發明現況。
2. 討論推廣活動各橋檢廠商之回饋意見。
3. 討論本橋檢工具後續精進方向及實務需求。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 討論蒐集透地雷達檢測數據資料之方式，及蒐集過程中會遇到的困難。
2. 討論透地雷達檢測數據資料儲存格式，及如何讀取並顯示人員可以判釋之訊號圖像。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 討論現行公路邊坡維護管理機制及防災流程。
2. 討論已蒐集之公路邊坡基本資料、分級、災害類型及監測手段。
3. 討論公路局實務單位針對 UAV 結合 AI 進行加值應用之想法。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 討論去年新增之十八王公橋試驗點的腐蝕情況與取樣事宜。
2. 討論腐蝕試驗點之氯鹽試架安裝工作。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 討論防波堤維護管理機制、巡查檢測項目與劣化判定標準。

2. 討論各港之防波堤構件劣化項目。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 討論土壤液化評估相關方法。

2. 討論地質鑽探資料建置後，如何盤點及篩選。

3. 討論後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

(一)梅雨季甫過，請視現場水位條件，安排於合適時間進行今年度現場試驗區第 1 次 UAV 觀測航拍，以觀測並記錄現場地形變化情形。

(二)大甲溪石岡壩下游河段水理分析屬大範圍分析，請以二維模擬為宜；試驗橋址局部沖刷屬小範圍分析，請以三維模擬為宜，以有效率及合理分析評估本計畫工法之成效。

二、公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

(一)橋檢人員回訓課程進行推廣時，設計調查問卷提供回訓學員填寫，持續蒐集第一線橋檢實務人員對本橋檢工具之專業意見及後續精進建議，並調查橋檢工作之實務需求。

(二)依所蒐整推廣活動回饋意見，評估橋檢工具後續精進方向，並依實務需求，研擬後續研究計畫研發新式橋檢工具之可行性。

三、人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

(一)對可能蒐集到之透地雷達檢測數據資料進行分類，如：訊號圖像(圖片檔案)、原始資料(Raw Data，二進位檔案格式)等，並分析不同類別數據資料對於訓練 AI 之助益。

(二)後續報告中對於透地雷達儲存格式(二進位檔案格式)進行相關說明。

四、UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

- (一)依所蒐整之公路局優先關注邊坡曾經或正在應用 UAV 之狀況資料，釐清其邊坡災害類型及空拍影像數量，並以國內外文獻為借鏡，持續研析合適公路局之 UAV 結合 AI 切入課題及方法。
- (二)UAV 可實現酬載更換，以達更廣泛之情境使用。除蒐集 UAV 搭載光學鏡頭產製高解析度影像後進行之加值應用研究外，可擴大蒐集 UAV 搭載熱顯像、紅外線及 LiDAR 等結合 AI 之文獻。
- (三)依公路局提供轄下各分局管理之中高風險邊坡資訊，針對邊坡維護數量較多之山地工務段，安排後續訪談，並藉以瞭解實務需求和研究著力點，達以終為始之目的。

五、113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

- (一)研究成果後續可整理成論文，投稿防蝕研討會或港灣季刊。
- (二)新增之十八王公橋試驗點腐蝕數據可提供維管單位參採。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

- (一)統計並分類各防波堤構件之劣化項目，以瞭解防波堤常見損壞構件，提供後續防波堤維護之參考數據。
- (二)水下之防波堤構件之檢測診斷項目可以探討用多音束與 ROV 來進行相關劣化度的判釋。

七、港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

- (一)報告中呈現高雄今年新增港區之地質鑽探資料，應包含其新、舊資料之分佈區域，以利瞭解其分佈是否能滿足高雄港區液化評估之需求。
- (二)今年度進行高雄港模式精進，除增加地質鑽探資料外，建議運用國內、外之液化分析方法，推估高雄港液化範圍及震陷量，提供地震速報簡訊之應用。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

貳、時間：113 年 6 月 26 日(星期三) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研究員 張道光 副研究員 謝妙周 副研究員 周哲 副研究員 曾文平 副研究員 鄭登鍵 副研究員 黃子騫 助理研究員 賴俊呈 王培源	
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李伶穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄四

第 2 次工作會議紀要

113 年 8 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

時間：113 年 8 月 26 日(星期一)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 現場觀測成果說明。
2. 數值模型分析流程及二維模型檢定成果說明。
3. 階段性成果應用說明。
4. 後續研究項目說明。

(二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 鐵道橋梁及箱涵橋梁檢測國內外文獻蒐集彙整。
2. 橋檢工具專利申請評估結果說明。
3. 橋檢工具推廣應用工作執行進度說明。
4. 推廣活動回饋意見彙整。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 探討數據資料前處理方法(程序)及前處理過程中會遭遇之問

題及困難，並初步研擬解決對策。

2. 辦理專家訪談針對國內外應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像，及數據資料之前處理方法，詢問相關專業看法及意見。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 公路局邊坡資訊調查及蒐集情形說明。
2. 公路局邊坡維護管理機制及防災流程探討。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 完成第 1、2 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗的取樣維護、化學分析及金屬試樣酸洗工作，第 3 季工作辦理中。
2. 構建鋅金屬腐蝕速率與主要大氣腐蝕因子間的迴歸模式。
3. 後續工作項目說明。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 各港區防波堤經常及特別巡查設施之劣化項目之探討。
2. 多音束水深測量與行動應用程式應用於防波堤巡檢作業。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 建置高雄港地質鑽探資料，並盤點、篩選可用資料共 891 筆地質鑽探資料。
2. 完成不同地震情境下液化潛勢比較。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 今年度凱米颱風帶來可觀之降雨量，對於本計畫試驗區成效驗證有相當的幫助，對於整體量化成效之數據亦可藉此事件更新。

2. 對於本次凱米颱風事件下，石岡壩放流量及試驗區河床水位高之物理量，可建立通用性詞語或對等概念，便於對外說明使用。

(二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 討論博大公司協助本橋檢工具專利申請評估結果。
2. 討論本橋檢工具於橋檢人員回訓課程推廣之問卷回饋意見。
3. 討論本橋檢工具於鐵道橋梁應用之可行性。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 討論蒐集透地雷達數據資料時，透地雷達的原始資料(Raw Data)要如何取得。
2. 討論若蒐集的透地雷達數據資料不足給AI進行訓練學習時，利用「生成對抗網路(GAN)」生成AI訓練學習資料的可能性。

(四)UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 討論現行公路局邊坡維護管理機制及防災流程。
2. 討論公路局邊坡應用 UAV、LiDAR 等科技巡檢實際案例。

(五)113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 討論迴歸模式之模式構建、解釋變數選定。
2. 討論後續迴歸模式之模式精進、解釋與預測工作。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 討論防波堤巡查檢測劣化項目與水下定期檢測劣化度探討。
2. 討論新興科技應用於防波堤巡檢作業。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 討論高雄港不同地震情境下液化潛勢分析。

2. 討論後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

- (一)凱米颱風事件後可驗證設置織布之保護效果，其中 P23 橋墩恰為左右各半採用傳統及織布保護工法之區域，相當適合做為本計畫工法效果之說明。
- (二)請依所規劃之後續工作項目執行。

二、公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

- (一)鐵道橋梁之交通可及性與公路橋梁不同，應考量執行橋檢工作相關設備運送及人員之交通方式，以完整評估本橋檢工具於鐵道橋梁應用之可行性，建議接洽鐵道橋梁維管單位，並安排現場橋檢工作觀摩，以瞭解鐵道橋梁檢測實務之進行概況。
- (二)本橋檢工具之後續精進方向，應以滿足橋檢公司及橋檢人員之實務需求，並請瞭解相關客製化所需成本，以利後續推廣工作之說明。

三、人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

- (一)蒐集透地雷達數據資料時，透地雷達的原始資料(Raw Data)雖然大多由乙方掌握，請探討函請甲方要求其廠商(乙方)提供檢測的透地雷達原始資料(Raw Data)之可行性。
- (二)後續請探討利用「生成對抗網路 (GAN)」生成 AI 訓練學習資料的可行性。

四、UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

- (一)依現況調查資料，公路局各工務段邊坡曾經或正在應用 UAV 進行空拍之數量約有 77 處，本計畫過往已訪談公路局北分局、中分局等轄下工務段，建議再安排其他分局進行訪談，以廣泛瞭

解不同區域之實務需求。

- (二)本計畫已整理公路局科技應用邊坡案例，並提出目前使用 UAV 搭載光學鏡頭或 LiDAR 主要進行之應用場景、優點和適用條件，後續於進行研析 UAV 結合 AI 深度學習影像判識方法之工作項目時，請以相關應用場景如何搭配 AI 輔助為切入點進行探討。

五、113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

- (一)後續可運用構建的迴歸模式進行金屬腐蝕速率預測。
- (二)在選擇解釋變數時，可檢視腐蝕速率與腐蝕因子之散佈圖。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

- (一)多音束水深測量在防波堤水下定期檢測劣化度判定(護面塊與護基塊)問題，建議可再探討其適用性。
- (二)防波堤水下與水上沉箱壁體與消波塊構件之檢測診斷項目，可以探討用 UAV 與 ROV 新興科技來進行相關劣化度的判釋。

七、港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

- (一)請補充液化風險評估之機率分析與定值分析之差異處。
- (二)高雄港洲際二期(倉儲物流區及散雜貨碼頭)由於地質鑽探資料太少，建議高雄港不同地震情境下液化潛勢比較圖中，洲際二期暫時不要分析液化潛勢。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

貳、時間：113 年 8 月 26 日(星期一) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 助理研究員 副研究員	胡哲 謝外屏 蔡登鍵 王浩源 賴俊呈 張道光 黃宇瑞 曾文傑 顏麗香
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李信賴
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林瑞雲

附錄五

第 3 次工作會議紀要

113 年 10 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

時間：113 年 11 月 4 日(星期一)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：黃烟宏

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 113 年度前 3 季現場試驗觀測結果。
2. 二維數值模型建置情形。
3. 階段性成果應用。
4. 後續研究項目。

(二)公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 本案橋檢工具專利申請作業進度。
2. 本案橋檢工具推廣工作執行狀況及進度。
3. 推廣活動回饋意見彙整。
4. 研發新型橋檢工具需求及規劃。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 透地雷達數據資料前處理過程遭遇之問題及初步解決對策。

2. 草擬合作研究計畫「應用深度學習輔助辨識透地雷達道路潛在下孔洞訊號圖像之研究」研究主題與重點。

(四) UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. AI 深度學習技術探討。
2. UAV 結合 AI 深度學習影像判識方法。

(五) 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~3 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗的取樣維護、化學分析及金屬試樣酸洗工作，第 4 季工作辦理中。
2. 構建鋅金屬腐蝕速率與主要大氣腐蝕因子間的迴歸模式，並應用模式進行鋅金屬腐蝕速率預測及腐蝕環境分類等級預測。

(六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 依維護管理制度執行防波堤巡檢作業時所遭遇之問題。
2. 新興科技 UAV、多音束水深測量與水下無人載具應用於防波堤巡檢作業。

(七) 港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 高雄港不同地震情境下液化潛勢分析結果。
2. 高雄港不同地震情境下地震沉陷潛勢分布結果。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

1. 二維模型參數率定選用。
2. 河床大斷面資料導入。
3. 三維模式參數率定及驗證。

(二) 公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

1. 本案橋檢工具授權及推廣模式。
2. 推廣活動回饋意見及本案橋檢工具功能精進方向。
3. 新型橋檢工具研發需求及後續規劃。

(三)人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

1. 保存數據資料、資料庫以及資料庫的不同及其必要性。
2. 對於透地雷達的訊號圖像而言，採用標註異常訊號特徵與標註正常訊號特徵做為 AI 訓練學習方式之優缺點。

(四)UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

1. 分辨式 AI 及生成式 AI 之基本原理、代表模型及資源需求等。
2. 生成式 AI 應用於影像辨識之適用性及切入點。

(五)113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

1. 迴歸模式的 R^2 值、以模式進行預測時的預測區間信賴水準。
2. 港區腐蝕因子調查數據的分析與應用，以及後續模式的精進方向。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

1. 防波堤水下與陸上巡檢作業時所遭遇問題。
2. 應用新興科技強化防波堤之巡查與檢測作業。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

1. 高雄港不同地震情境下地震沉陷潛勢。
2. 後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(3/4)-試驗場址數值模型建置及評估

(一) UAV 航拍勞務案，於完成康芮颱風事件之地形紀錄後，於 11 月下旬著手辦理相關結案驗收事宜，以利年度會計結算作業執行。

(二) 請依所規劃之後續研究事項積極辦理，並如期於 11 月底前提交期末報告初稿。

二、公路橋梁梁底狹小空間檢測工具專利申請與推廣

(一) 如未來本案橋檢工具有精進或客製化之規劃，應將本案彙整之實務需求建議提供予本工具精進改良之執行單位或廠商，提升本橋檢工具應用價值，且符合應用單位之實際需要。

(二) 如未來規劃針對箱型橋梁內部檢測研發新式橋檢工具，應先完整調查箱型橋梁內部構造樣態及橋梁環境狀況，並充分瞭解檢測作業需求。

三、人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之前處理初探

本計畫所探討蒐集透地雷達數據資料的 2 種方式，其中蒐集他人已完成之探(檢)測或試驗數據資料這個方式，不論是在蒐集的過程還是在進行資料前處理的過程，都會產生困難和問題，雖然這些問題本計畫有初步研擬相關解決的對策或建議，但是並沒有實際的執行經驗，建議將蒐集他人已完成之探(檢)測或試驗數據資料這個方式納入後續的合作研究計畫實際執行，以確認是否能透過這個方式蒐集到質量都適合訓練 AI 的數據資料。

四、UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討

(一) 依照本研究應用 AI 深度學習結合 UAV 空拍影像輔助影像判識之目的，可依蒐集之資料量及品質，決定運用單一或多個 AI 模型，針對不同階段來予以協處。

(二) 建議針對 UAV 如何取得較為精良之資料成果、影像處理方式以及可結合 AI 深度學習影像判識之課題進行梳理，呈現一套架構流程圖，俾供應用單位及本所後續參採。

五、113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與鋅金屬關聯性研究

(一)後續可因應不同區域特性，構建相對應的關聯模式，並將風速、風向、雨量等氣象因子的影響納入模式。

(二)後續可就特定地區的二氧化硫、氯鹽調查結果做進一步的深入分析。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(3/4)-新興科技應用於防波堤設施巡查檢測作業

(一)建議加強新興科技應用於防波堤設施構件劣化項目對應於檢測項目的表單。

(二)建議補充新興科技 UAV 與多音束水深測量應用於巡檢案例的說明。

七、港區地震液化風險評估模式精進(3/5)-高雄港模式精進

請依據觸發門檻加速度及高潛勢區面積分析成果，推估高雄港區之分區地震沉陷量，俾更新高雄港地震簡訊災況初評內容，並說明與原來地震簡訊災況初評內容之差異。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 113 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

貳、時間：113 年 10 月 31 日(星期四) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 助理研究員 副研究員 助理研究員 副研究員	曾文傑 謝幼屏 張道光 鄭聖健 賴俊呈 胡啟文 黃炳宏 黃育瑞
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李信穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄六

期末審查意見及辦理情形說明表

期末審查意見及辦理情形說明表

審查意見	處理情形
張欽聰委員	
1. P.3-19，表 3-6 中的數值與現有 CNS 13401 的數值不同。	1. 感謝指正，已修正。
2. P.3-21，表 3-8 中 CX 等級的碳鋼、鋅、銅的腐蝕速率值缺上限值。	2. 感謝指正，已修正。
3. P.4-2，由調查結果顯示秋、冬氯鹽沉積速率較高的主因為何？係與濕度較高有相對應關係？	3. 臺灣秋、冬季吹強烈的東北季風，推測為氯鹽沉積速率較高的主要影響因素。
4. P.4-7，產業園區之二氧化硫沉積速率較高主因為大氣中存在相對量的硫化物？	4. 一般在石化廠、煉鋼廠、火力電廠等產業園區，若在生產過程所排放廢氣中含有 SO ₂ 或 H ₂ S，將使大氣中存在相當程度的硫化物。
5. 報告內容錯誤請更正： (1) P.1-2，第 2 段第 2 行，鋼版樁應為鋼板樁。 (2) P.1-11，表中 Alsl1015 碳鋼、Alsl304 碳鋼，是否應為 AISI 1015 碳鋼、AISI 304 不銹鋼？ (3) P.2-7，第 3 段「...，陽極溶解溶解電流」，文字溶解重複，請修正。 (4) P.5-7，公式(5-3)中解釋變數 TOW 為誤植，請刪除。	5. 感謝指正，已修正。
李家順委員	
1. 此計畫之執行具重大意義，所產出之成果對從事防蝕設計、維護之單位幫助甚大，很值得肯定。	1. 感謝肯定。

審查意見	處理情形
2. 現地暴露試驗之成果中，部分地點例如氯鹽沉積量，在基隆試驗線、核三試驗線、台塑六輕試驗線，離岸 300m 的沉積量比 0m 來得多，此現象與一般認知不同(離岸愈近沉積量應愈多)，報告中可加以說明。	2. 遵照辦理，補充說明詳 P.4-2。
3. 建議持續執行本相關計畫，讓國內有本土化長期監測資料供有關單位參採。	3. 感謝建議。
羅建明委員	
1. 自 2007 年起，本研究持續進行臺灣全島金屬材料腐蝕環境的調查，包括金屬現地暴露試驗、酸洗試驗及數據統計彙整，並將成果整合至「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」。此外，每年定期發行「臺灣大氣腐蝕劣化因子調查年報」，提供完整的腐蝕環境數據，此計畫在運輸技術研究中心的支持及謝博士研究團隊的專業貢獻下，對本土防蝕技術的提升與資料庫建置具有重大意義，值得高度肯定。	1. 感謝肯定。
2. P.1-15，1.4 節的計畫工作項目 3，針對持續擴增精進「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」資料庫，彙整各試驗站現地調查結果…。建議簡述擴增此試驗站緣由:例如 112 年石門十八王公橋的設置原因，並說明該地區特殊的環境條件(如濱海高鹽分環境)對腐蝕速率的影響，結合環境因子量測結果，	2. 遵照辦理，補充說明詳 P.1-14。

審查意見	處理情形
闡述此站點對於強化腐蝕環境分類與研究應用的重要性。	
3. P.1-15，計畫工作項目 5，辦理大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會，建議將防蝕學會研習會中專家及業界代表的建議進行整理，並納入未來研究應用，提升實用性。	3. 感謝建議。
4. 金屬腐蝕劣化因子氯鹽沉積速率隨時間變化幅度較大，可能受到其他環境因子如溫度、濕度、降雨量及季節性氣流等多重因素影響。建議進一步統計分析因子的交互作用及其對沉積速率波動的貢獻，以提高數據解釋的應用價值，並為防蝕設計提供更精確的參考依據。	4. 感謝建議，納入後續研究。
5. 建議於 P.2-22 文獻回顧，增列過去國內外有關鋅金屬與主要污染物(氯鹽、二氧化硫、濕潤時間)等腐蝕劣化因子文獻，提供鋅金屬在不同腐蝕環境下的行為與應對策略，可作為制定防蝕設計及材料選擇的重要參考依據。	5. 感謝建議。
本所運輸技術研究中心第一科賴瑞應科長	
1. 本計畫完成 113 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查，並將相關成果發行年報及上傳至「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」供各界應用，也藉由辦理相關研習會、拜會顧問公司及投稿來推廣落實研究成果，值得肯定。	1. 感謝肯定。

審查意見	處理情形
2. 本計畫透過嚴謹的統計分析，得到臺灣本土化鋅金屬與大氣腐蝕因子的關聯性公式，提供各界未來鋅金屬防蝕的應用，值得肯定。	2. 感謝肯定。
3. 第三章有關各港區海水下金屬暴露試驗部分，報告僅呈現各港區金屬材料水下腐蝕試驗的佈設情形及腐蝕速率分析方法，並未呈現研究成果，建議能補充相關說明。	3. 遵照辦理，補充說明詳 P.3-22。
4. 第四章有關相關金屬 113 年四季的腐蝕速率成果，建議能針對相關數據加強品管，若有奇異值的部分，建議可以予以進一步探討並予以刪除，以免影響後續的統計分析及等位圖的呈現。	4. 遵照辦理。
5. 鋅金屬的關聯性模式僅有氯鹽沉積速率及二氧化硫沉積速率，而無濕潤時間百分比，建議可以補充說明可能原因。	5. 遵照辦理。補充說明詳 P.5-16。
本所運輸技術研究中心第二科李俊穎科長	
1. 建議適當補述表 4-4 至表 4-7 內蘇澳港試驗線 0m 缺資料緣由。	1. 遵照辦理。
2. 建議適當補述附錄一內之腐蝕速率等位線分布圖、腐蝕環境分類圖中間空白處處理方式。	2. 遵照辦理。
3. 表 5-2~表 5-5 參數估計表內標準誤差文字少了「差」字，請修改。	3. 遵照辦理。

審查意見	處理情形
4. TOW 在本研究中影響不顯著，建議後續可再討論在臺灣各地差異情形。	4. 感謝建議。
本所運輸技術研究中心第三科劉清松副研究員	
1. 本研究所蒐集的大氣腐蝕環境資訊研究成果，已展示於港灣環境資訊網的資訊圖臺。該展示平臺呈現研究成果，強化資訊透明度與應用價值，顯示本研究在服務功能方面的努力與貢獻，應予充分肯定。該成果為推動港灣環境數據化與資訊應用，未來值得進一步深耕與推廣。	1. 感謝肯定，後續持續辦理資訊公開與推廣工作。
2. 建議在現有研究成果基礎上，加入關鍵使用者應用「大氣腐蝕環境資訊」的實際場景說明，提供清晰的使用案例與應用情境，能為後續功能優化和應用開發提供具體方向。	2. 感謝建議，後續持續配合港灣環境資訊網的展示需求辦理。
3. 本研究放置於數位發展部政府資料開放平臺的碳鋼、銅、鋁與鋅 4 項金標章資料集，於 113 年 12 月 12 日正式升級為白金標章，充分展示了資料集的品質與價值。根據所內經驗，大概會建議參與政府資料開放平臺「活化應用專區」活動，針對上述白金標章資料集開發具有實際應用價值的功能網頁。	3. 後續持續配合港灣環境資訊網的執行需求辦理。

附錄七

期末報告簡報資料



113年度一科自辦研究計畫

113年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查 與鋅金屬關聯性研究

研究人員：謝幼屏、鄭登鍵

研究助理：陳亭廷、陶德勇、陳育齊、
王培源

運輸技術研究中心
113.12.24



1

大綱

01

前言

02

金屬材料腐蝕環境調查研究

03

鋅金屬腐蝕關聯性統計分析

04

結論與建議

2

01 前言

3

1.1

研究緣起與目的

研究緣起 與目的 (WHY)

- 本所為國內目前可提供臺灣地區長期金屬材料**腐蝕環境調查資訊**之唯一單位。本於支援交通基礎設施維護管理權責，宜持續進行**本土化腐蝕環境調查研究**。
- 本計畫係**延續型計畫**，主要持續辦理**現地調查及試驗工作**，另針對腐蝕環境調查資料進行**統計與大數據分析**，
 - 採分期探討4種**標準金屬試片**(CNS規定之碳鋼、鋅、銅、鋁)與**腐蝕因子**間的**關聯性**，
 - 前期(112)完成碳鋼金屬材料關聯性分析，今年(113)研析**鋅金屬材料**之關聯性分析。
- 提供公共工程金屬結構物**防蝕設計**，**延長使用壽齡及降低維護成本**之應用。

研究範圍 與應用單位 (WHO)

- 本所自**96年起**，著手進行大氣腐蝕因子調查與金屬暴露試驗研究，目前於臺灣各地共佈放**210處大氣腐蝕試驗站**，另自**104年起**，增設**14處水下腐蝕試驗站**，進行水下腐蝕調查試驗。
- 提供**公路局、高速公路局、臺鐵公司、港務公司及相關產學等單位**應用，並做為本所相關研究重要參考資料。

4

本計畫係延續型計畫，本年度(113)辦理之工作項目如下：

➤ 延續性工作

• 1. 辦理金屬材料暴露試驗與腐蝕劣化因子調查

依據中華民國國家標準(CNS)，在全臺各地進行大氣腐蝕金屬材料暴露試驗與腐蝕劣化因子調查；並在各港區進行水下腐蝕調查試驗。

• 2. 擴增臺灣腐蝕環境調查資訊系統資料庫

彙整調查與試驗結果，精進及擴充腐蝕環境調查資料庫。

• 3. 發行2023年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查年報

提供相關單位選用金屬材料與防蝕工法應用。

• 4. 推廣宣傳臺灣腐蝕資訊系統

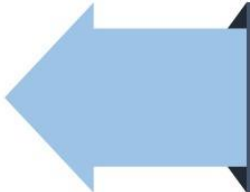
辦理大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會，並推廣宣導臺灣腐蝕環境分類資訊系統於相關人員參酌採用。

➤ 腐蝕資料分析工作

• 5. 進行鋅金屬與腐蝕因子關聯性統計分析

以腐蝕調查數據建立迴歸模式，評估臺灣腐蝕劣化因子對於鋅金屬腐蝕的影響。

5



02 金屬材料腐蝕環境調查研究

6

2.1 研究方法

研究方法^(1/2)

辦理大氣腐蝕環境調查與試驗之依據



- 依據國際標準組織規範(ISO)及中華民國國家標準規範(CNS)
- 進行腐蝕因子調查及碳鋼、鋅、銅、鋁等標準試片現地暴露試驗，提供大氣腐蝕環境分類查詢。

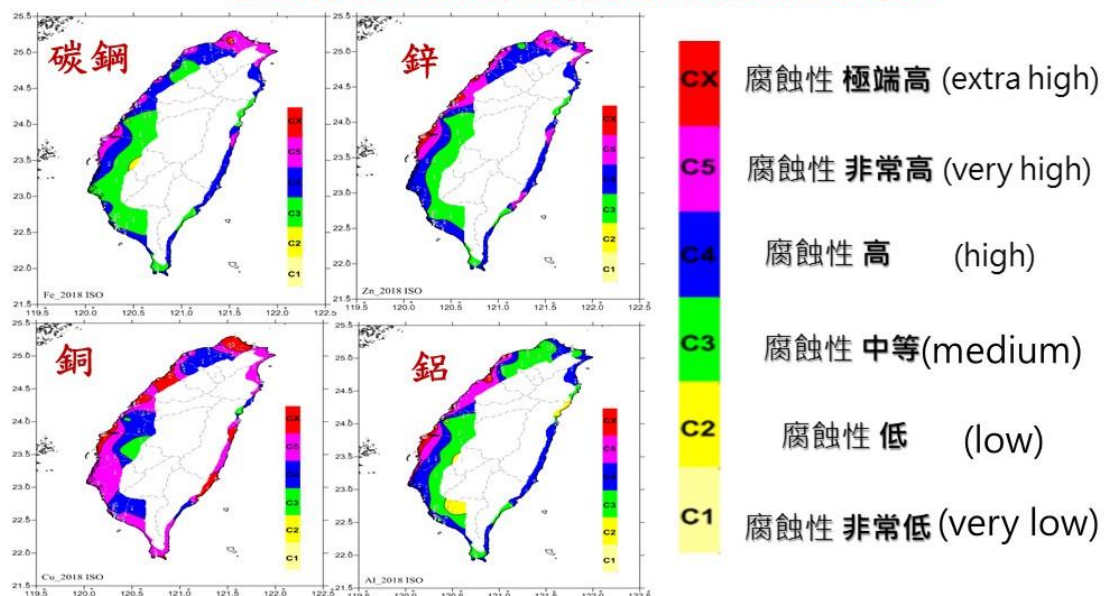
7

2.1 研究方法

研究方法^(2/2)

辦理大氣腐蝕環境調查與試驗之成果

金屬材料大氣腐蝕環境分類-依金屬腐蝕速率



- 大氣腐蝕環境分類-以各種標準金屬最初第一年之腐蝕速率區分
- 金屬腐蝕性環境分類數值依序類推區分為C1、C2、C3、C4、C5、CX 6個等級。資料來源：ISO 9223-2012

2.2執行內容

執行內容^(1/5) 建立與維護長期試驗站

大氣腐蝕 (96年開始執行)

腐蝕因子調查及金屬暴露試驗站 (210處)



試驗位址：臺灣各海洋區、工業區、都市區、鄉村區、鐵公路沿線等
試驗頻率：每3個月及1年期程取樣

水下腐蝕 (104年開始執行)

水下腐蝕調查試驗站 (14處)

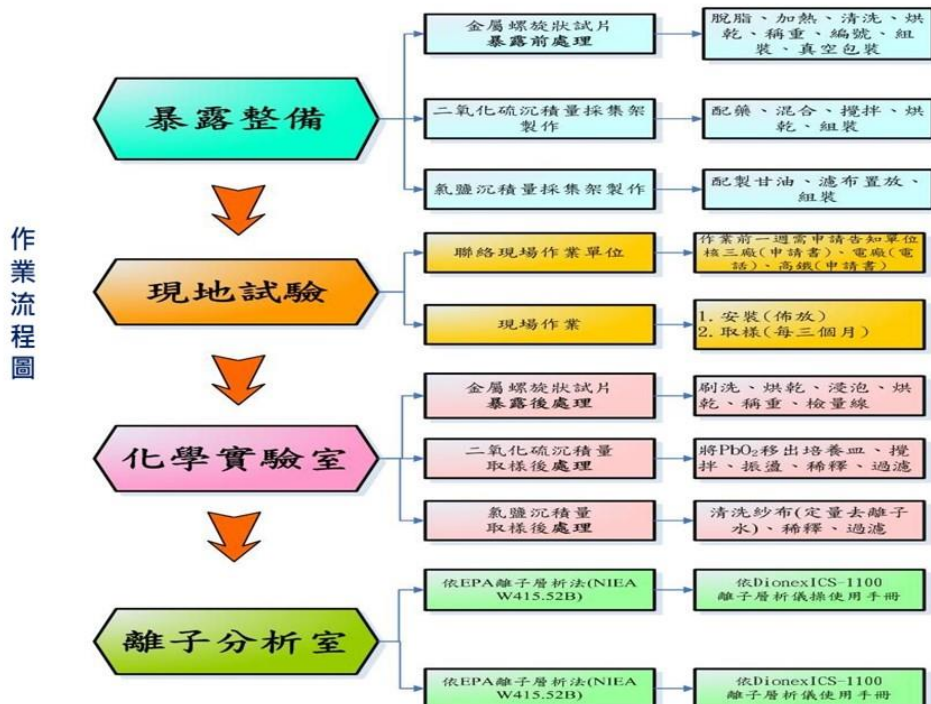


試驗位址：臺灣各大商港碼頭
試驗頻率：第1、2、5、8、10年期程取樣

9

2.2執行內容

執行內容^(2/5) 進行大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗



10

2.2執行內容

執行內容^(3/5)

進行**大氣腐蝕**試驗材料整備作業(每年2,5,8,11月初辦理)



螺旋金屬試樣秤重包裝



氯鹽沉積量採集架製作



二氧化硫沉積量採集架製作

大氣腐蝕試驗材料整備作業

11

2.2執行內容

執行內容^(4/5)

進行**大氣腐蝕**取樣維護作業(每年2~3,5~6,8~9,11~12月辦理)



螺旋金屬暴露試驗



氯鹽沉積量試驗



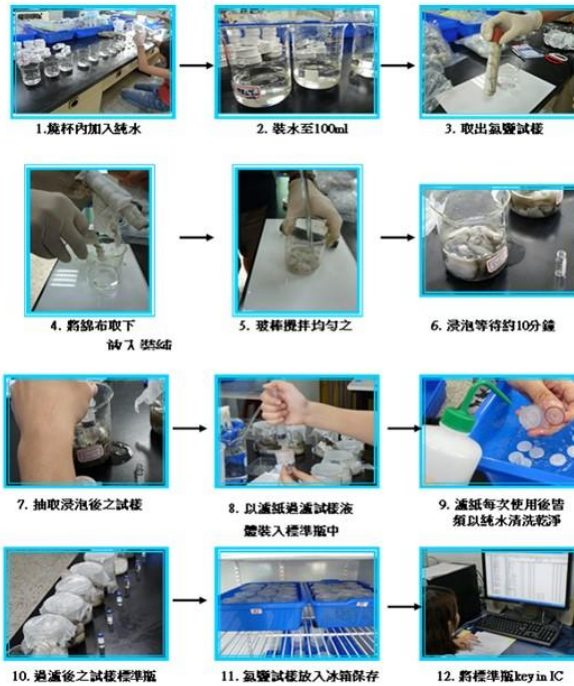
二氧化硫沉積量試驗

大氣腐蝕取樣維護作業

12

2.2執行內容

執行內容^(5/5) 進行化學分析/金屬酸洗/離子層析工作(每年1,4,7,10月辦理)

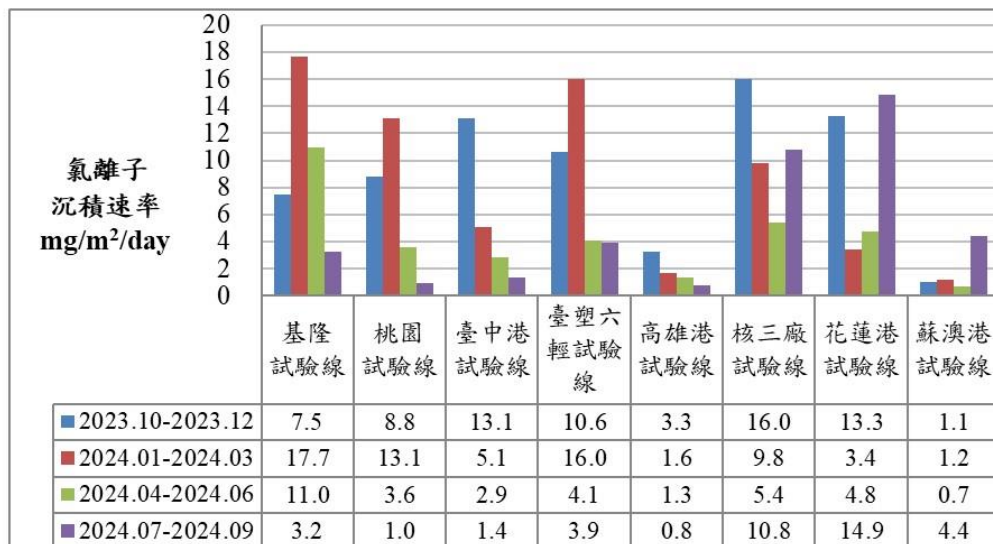


進行化學分析/金屬酸洗/離子層析工作(例：氯鹽沉積量分析)

13

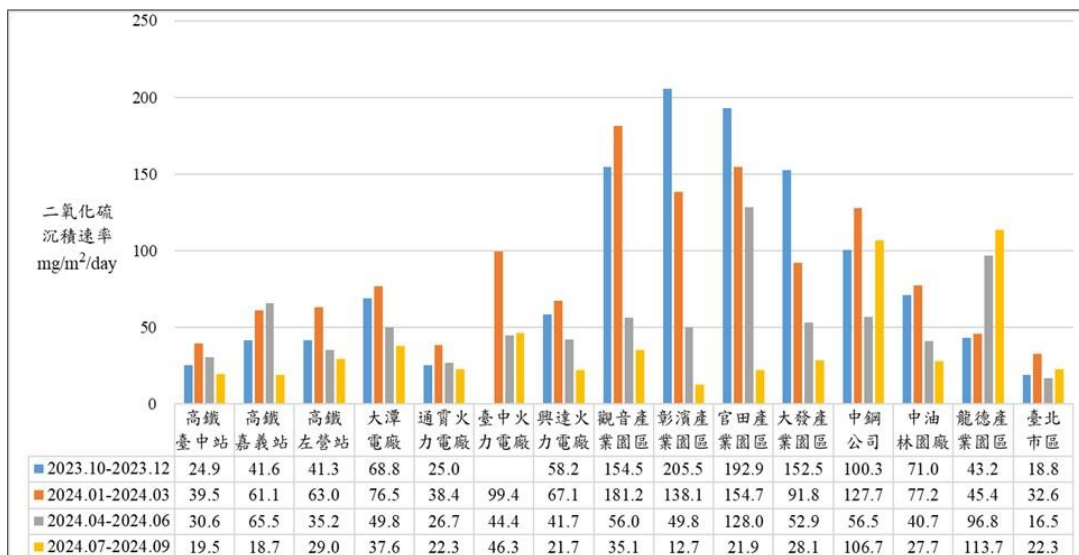
02

調查與試驗結果^(1/4) 大氣腐蝕試驗



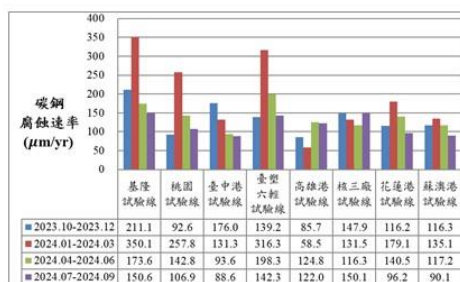
垂直海岸試驗線之氯鹽平均沉積速率

14

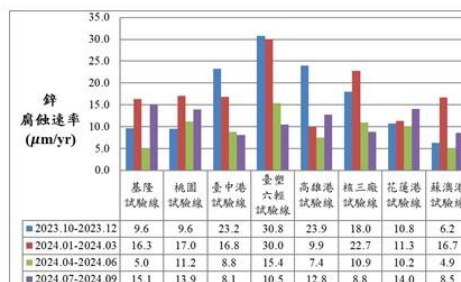


特定試驗點之二氧化硫沉積速率

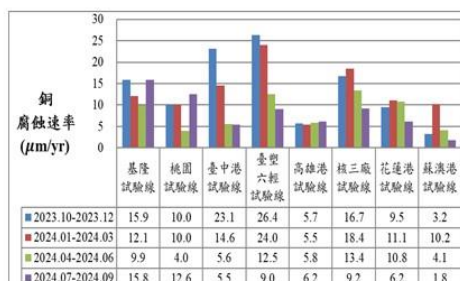
15



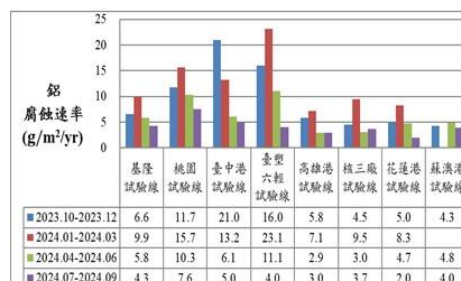
碳鋼金屬腐蝕速率



鋅金屬腐蝕速率



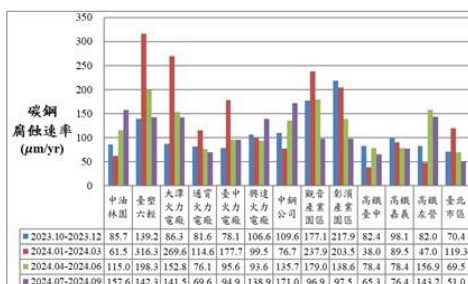
銅金屬腐蝕速率



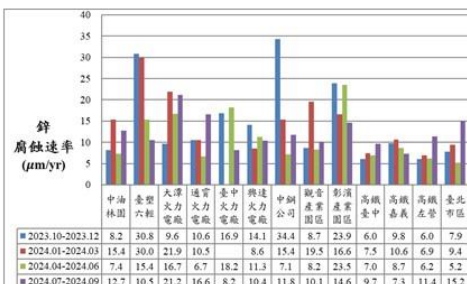
鋁金屬腐蝕速率

垂直海岸試驗線之金屬腐蝕速率比較圖

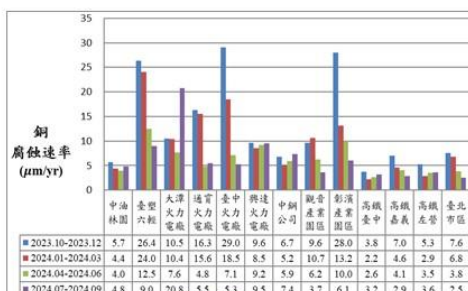
16



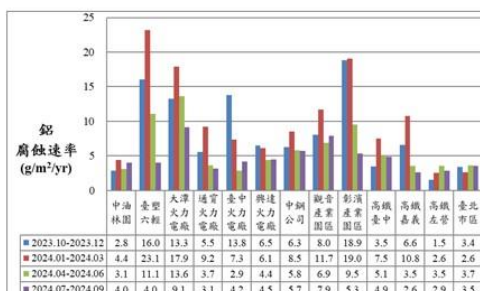
碳鋼金屬腐蝕速率



鋅金屬腐蝕速率



銅金屬腐蝕速率

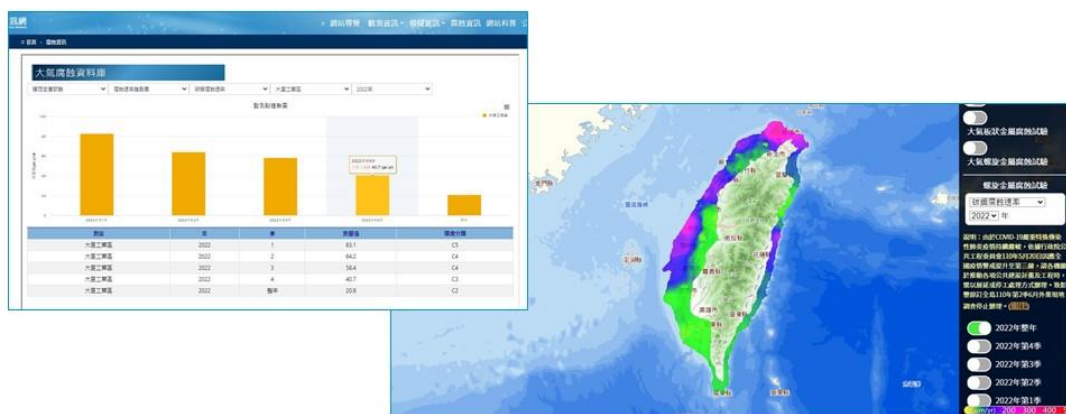


鋁金屬腐蝕速率

特定測站之金屬腐蝕速率比較圖

17

- 研究成果擴增於「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」資料庫，並公開於本中心網站供外界查詢。

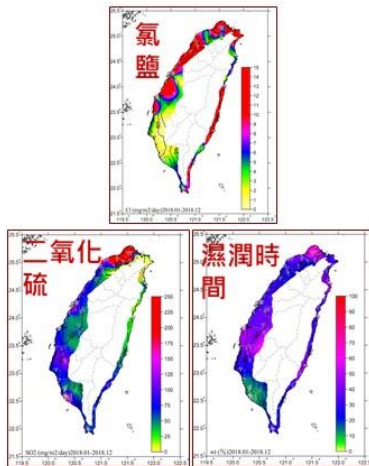


研究成果公開於本中心港灣環境資訊網

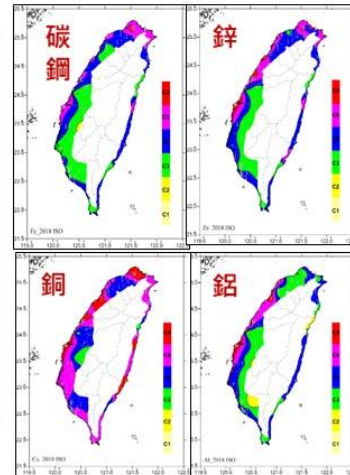
18

- 出版「2023年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」，提供完整數據做為相關單位選用**金屬材料**與**防蝕工法**應用。

依-環境因子分類



依-金屬腐蝕速率分類



19

➤ 1.舉辦推廣活動



4月10日至華光工程顧問有限公司推廣



4月26日至中華顧問工程司推廣

20

➤ 2.舉辦研習會

- ✓ 7月9日在集思臺中新烏日會議中心與防蝕工程學會合辦「大氣腐蝕及防蝕技術應用研習會」，推廣宣傳臺灣腐蝕資訊系統。



與會人數達86人



會中介紹「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」 21

➤ 3.發表論文

- ✓ 題目：臺灣地區碳鋼金屬腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析
- ✓ 發表處：港灣季刊，第128期，45-59頁，民國113年6月出版
- ✓ 作者：謝幼屏、蔡立宏、賴瑞應、羅建明、賴俊呈

臺灣地區碳鋼金屬腐蝕速率與腐蝕因子之
關聯性分析謝幼屏¹ 蔡立宏² 賴瑞應³ 羅建明⁴ 賴俊呈⁵¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員²交通部運輸研究所運輸技術研究中心主任³交通部運輸研究所運輸技術研究中心科長⁴交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員⁵交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理研究員

摘要

臺灣屬於高腐蝕環境，為評估臺灣地區大氣腐蝕劣化因子對於碳鋼腐蝕速率的影響，本文採用臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之數據，以迴歸分析法建立碳鋼腐蝕速率與大氣腐蝕劣化因子間的迴歸模式，並依據統計推論應證之程序，完成迴歸模式顯著性、配適度檢定及基本假設符合，確立分析結果為具意義之模式。

研究結果顯示：在臺灣地區目前的氣候條件與污染環境下，濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率、風速、風向等5項大氣腐蝕劣化因子是影響碳鋼腐蝕速率的顯著影響因子，兩者間之關係為對數線性關係，關係模式為： $\ln(\text{Fe}_{\text{loss}}) = 2.798 - 0.012\text{TOW} + 0.233 \ln(\text{Cl}) + 0.240 \ln(\text{SO}_2) + 0.254 \ln(\text{W}_d) - 0.116\text{W}_d$ ；模式顯示此5項大氣腐蝕劣化因子的變動可說明碳鋼腐蝕速率變動的57.6%，其對碳鋼腐蝕速率影響之相對重要性以氯鹽沉積速率最高，二氧化硫沉積速率次之，第三是濕潤時間百分比，風速與風向則較低。

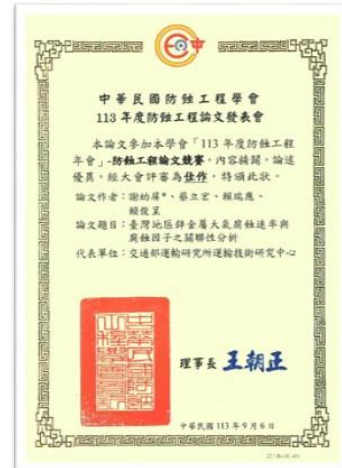


➤ 4.發表論文

- ✓ 題目：臺灣地區鋅金屬大氣腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析
- ✓ 發表處：113年防蝕工程年會暨論文發表會，民國113年9月6-7日，新竹
- ✓ 作者：謝幼屏、蔡立宏、賴瑞應、賴俊呈



論文獲防蝕工程論文競賽佳作



23

03 鋅金屬腐蝕關聯性統計分析

24

高腐蝕環境

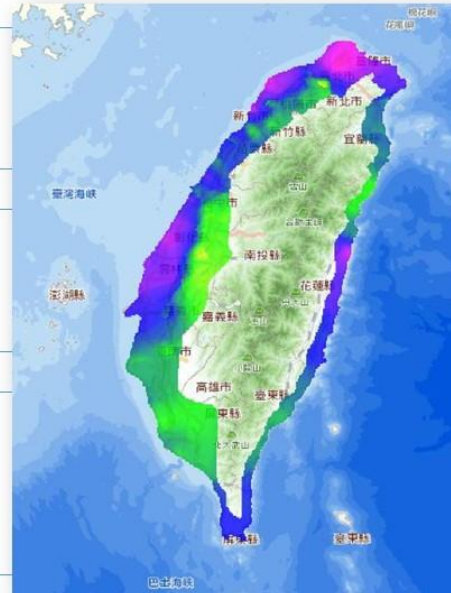
- 臺灣四面環海—**高溫、高濕與高鹽份**
- 金屬材料在大氣中容易腐蝕劣化

大氣腐蝕機制

- 受**水分、氧氣、和腐蝕性物質**聯合作用而產生破壞
- 大氣腐蝕具有**強烈地域性**

關聯性分析

- 以**臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查數據**，建立迴歸模式
- 評估臺灣**大氣腐蝕劣化因子**對於**鋅金屬腐蝕**的影響

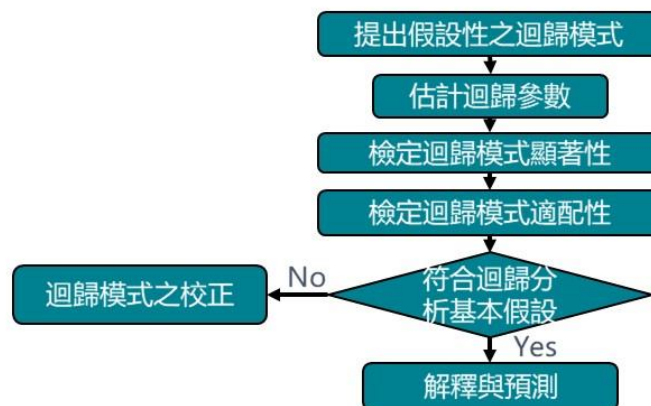


25

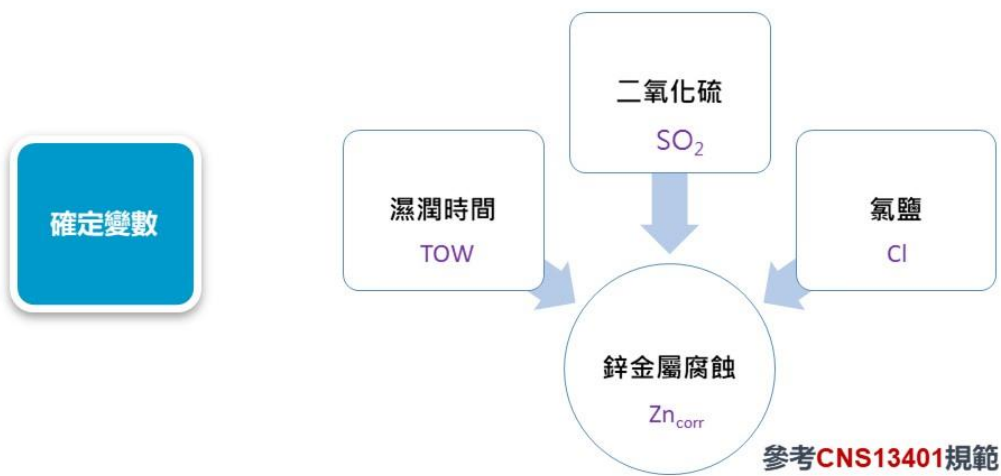
迴歸分析法(Regression Analysis)

- 應用**統計分析技術**以及**假說驗證**之方法
- 依**統計數據**配適一條合適的**直線/曲線**，找出變數間的**函數關係**

迴歸分析步驟



26



迴歸模式變數

變數名稱	變數代號	單位	說明
鋅金屬腐蝕速率	Zn_{corr}	$\mu\text{m/yr}$	反應變數
濕潤時間百分比	TOW	%	解釋變數
氯鹽沉積速率	Cl	$\text{mg/m}^2/\text{day}$	解釋變數
二氧化硫沉積速率	SO_2	$\text{mg/m}^2/\text{day}$	解釋變數

27

資料說明

分析數據：170筆

- 採用本所進行臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之111-112年全臺89個大氣腐蝕試驗站的年資料
- 扣除施工無數據、離群值後，分析數據計170筆

相關資料引用

- TOW：以鄰近氣象站的溫度、濕度數據計算
- 試驗站無調查Cl/ SO_2 值：引用鄰近試驗站的調查數據



28

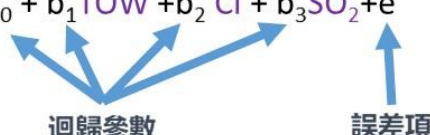
提出假設性
之迴歸模式

➤ 模式假設

1. 真實情況：**鋅金屬腐蝕受濕潤度、氯鹽、二氧化硫 3 腐蝕因子影響**
2. 兩者關係：**線性關係**
3. 此一關係可用試驗站數據來推估

➤ 提出假設性之迴歸模式：**線性模式**

$$Zn_{corr} = b_0 + b_1 TOW + b_2 Cl + b_3 SO_2 + e$$



29

➤ 模式 1：線性模式

- 應用統計軟體SPSS 進行迴歸分析、估計迴歸參數。
- 配適得到**線性模式**如下：

$$Zn_{corr} = 2.613 - 0.003 TOW + 0.074 Cl + 0.034 SO_2$$

模式檢定與診斷

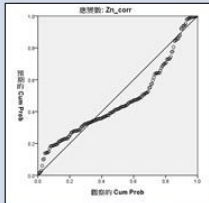
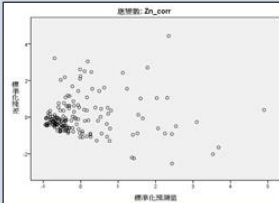
項目	檢定結果		診斷
顯著性	F檢定	F=29.425(P=0.000) → 模式顯著。	• 檢定未通過 • 調整模式： • 解釋變數刪除 TOW，減為 Cl、SO₂ 2項
	t 檢定	• 參數 b₀、b₂、b₃ 的 t 檢定值達 95% 顯著水準 → 常數項不為 0，解釋變數 Cl、SO₂ 影響顯著 • 參數 b₁ 的 t 檢定值未達 95% 顯著水準 → TOW 影響不顯著。	

30

➤ 模式 2：線性模式 (2 解釋變數)

$$Zn_{corr} = 2.482 + 0.074 Cl + 0.034 SO_2$$

模式檢定與診斷

項目	檢定	診斷						
顯著性	- F檢定：F=44.385(P=0.000) → 模式顯著。 - t 檢定：各參數 t 值均達95%顯著水準 → 常數項不為0，各解釋變數影響顯著。	檢定通過						
適配性	$R^2_{adj} = 0.339$	解釋力不佳						
基本假設	常態性：X 均質性：OK 獨立性：OK 線性重合：OK   <table border="1"><thead><tr><th>解釋變數</th><th>VIF</th></tr></thead><tbody><tr><td>Cl</td><td>1.022</td></tr><tr><td>SO₂</td><td>1.022</td></tr></tbody></table> 常態機率圖 殘差圖 VIF值	解釋變數	VIF	Cl	1.022	SO ₂	1.022	- 模式可能違反常態性基本假設 - 進行模式校正，重新配適
解釋變數	VIF							
Cl	1.022							
SO ₂	1.022							

31

調整
模式假設

➤ 大氣腐蝕原理

- 大氣腐蝕：水膜下的電化學反應
- 濕潤時間：發生腐蝕的基本條件
- 氯鹽、二氧化硫：水膜產生後加速大氣腐蝕的因子

➤ CNS13401劑量反應函數：顯示 Zn_{corr} 與 $Cl/SO_2/TOW$ 之關係

- Zn_{corr} 與 Cl/SO_2 ：線性關係 (溫度/濕度=定值)
- Zn_{corr} 與溫度/濕度：指數關係 (Cl/SO_2 =定值)

➤ 變數轉換

- 反應變數：鋅腐蝕速率取對數值 $\ln(Zn_{corr})$
- 解釋變數1：濕潤時間百分比 TOW
- 解釋變數2：氯鹽取對數值 $\ln(Cl)$
- 解釋變數3：二氧化硫取對數值 $\ln(SO_2)$

➤ 轉換後的模式：對數線性模式

$$\ln(Zn_{corr}) = b_0 + b_1 TOW + b_2 \ln(Cl) + b_3 \ln(SO_2) + e$$

32

➤ 模式3：對數線性模式

• 配適得到：

$$\ln(\text{Zn}_{\text{corr}}) = -0.104 - 0.001 \text{ TOW} + 0.303 \ln(\text{Cl}) + 0.287 \ln(\text{SO}_2)$$

模式檢定與診斷

項目	檢定	診斷
顯著性	- F檢定：F=35.913(P=0.000)→模式顯著。 - t 檢定： - 解釋變數ln(Cl)、ln(SO₂)參數b₂、b₃的t檢定值達95%顯著水準→ln(Cl)、ln(SO₂)的影響顯著 - 常數項b₀、解釋變數TOW參數b₁的t檢定值未達95%顯著水準→TOW的影響不顯著，常數項b₀可能為0。	- 檢定未通過 - 調整模式： - 將解釋變數減為ln(Cl)、ln(SO₂) 2項 - 改配適無常數項對數線性模式

33

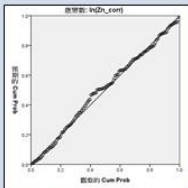
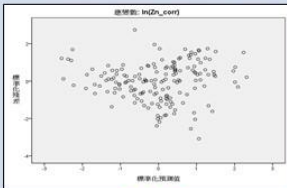
➤ 模式4：無常數項對數線性模式

• 將解釋變數減為ln(Cl)、ln(SO₂) 2項，並改配適為無常數項對數線性模式

• 配適得到：

$$\ln(\text{Zn}_{\text{corr}}) = 0.285 \ln(\text{Cl}) + 0.251 \ln(\text{SO}_2)$$

模式檢定與診斷

項目	檢定	診斷						
顯著性	- F檢定：F值=496.809(P=0.000)→模式顯著。 - t 檢定：各參數 t 值均達95%顯著水準→各解釋變數影響顯著	檢定通過						
適配性	$R^2_{adj}=0.854$	佳						
基本假設	常態性：OK 均質性：OK 獨立性：OK 線性重合：OK  常態機率圖  殘差圖 <table border="1"><thead><tr><th>模式</th><th>VIF</th></tr></thead><tbody><tr><td>ln(Cl)</td><td>2.186</td></tr><tr><td>ln(SO₂)</td><td>2.186</td></tr></tbody></table> VIF值	模式	VIF	ln(Cl)	2.186	ln(SO ₂)	2.186	模式無嚴重違反基本假設
模式	VIF							
ln(Cl)	2.186							
ln(SO ₂)	2.186							

34

34

解釋與說明

➤ 迴歸分析結果

- 依循統計推論程序，確認鋅金屬腐蝕與主要腐蝕因子之關係為**無常數項對數線性模式**：

$$\ln(\text{Zn}_{\text{corr}}) = 0.285 \ln(\text{Cl}) + 0.251 \ln(\text{SO}_2)$$

➤ 解釋與說明

- 鋅金屬腐蝕的顯著影響因子：**氯鹽(Cl)**、**二氧化硫(SO₂)**
- 2 腐蝕因子的變動可說明鋅金屬腐蝕速率變動的**85.4%**。

35

預測

➤ 腐蝕環境分類等級預測

- 依據構建好的迴歸模式，可由大氣腐蝕劣化因子**氯鹽(Cl)**與**二氧化硫(SO₂)**的沉積速率，推估**鋅金屬腐蝕速率(Zn_{corr})**。
- 進而按腐蝕環境分類標準，預測鋅金屬的**腐蝕環境分類等級**。

➤ 預測方式

- 點預測

$$\ln(\text{Zn}_{\text{corr-h}}) = 0.285 \ln(\text{Cl}_h) + 0.251 \ln(\text{SO}_{2h})$$

- 區間預測

$\ln(\text{Zn}_{\text{corr-h}})$ 在信賴水準為**(1-α)%**時的預測區間上下限：

$$0.285 \ln(\text{Cl}_h) + 0.251 \ln(\text{SO}_{2h}) \pm t_{(\alpha/2, 168)} * 0.59190660 \sqrt{\text{X}_0' (\text{X}'\text{X})^{-1} \text{X}_0}$$

式中

$$\text{X}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ \ln(\text{Cl}_h) \\ \ln(\text{SO}_{2h}) \end{bmatrix}, (\text{X}'\text{X})^{-1} = \begin{bmatrix} 0.10075117 & -0.00886802 & -0.02544317 \\ -0.00886802 & 0.00261289 & 0.00109055 \\ -0.02544317 & 0.00109055 & 0.00775332 \end{bmatrix}$$

36

預測

➤ 例如：Cl_h = 7.3mg/m²/day，SO_{2h} = 16.1mg/m²/day

	鋅金屬腐蝕速率 (μm/yr)	腐蝕環境分類等級
點預測值	3.54	C4
90%預測區間值	1.33 < Zn _{corr-h} < 9.45	C3、C4、C5、CX

➤ 預測理論基礎：常態性基本假設

- 在真實情況下，相對應於特定解釋變數(氯鹽、二氧化硫)之反應變數值(鋅金屬腐蝕速率)不是一個**特定值**，而是呈現**常態機率分配**情形；
- 點預測值**：相對應於**常態機率分配平均數**，
- 預測區間值**：按照**常態機率分配**計算出不同**信賴水準**下的預測區間。

37

預測

➤ 提出實務預測方案

- 腐蝕環境分類等級是辦理**工程防蝕設計**或**工程養護管理**之重要參考依據，
- 一個腐蝕環境分類等級**預測方案**，最好是能符合**一定水準的正確率**，且**預測區間不要過大**，而不利應用單位做決策。
- 在此，以**110年試驗站年資料**(共計86筆)進行**正確率測試**，以找出適當的腐蝕環境分類等級**預測方案**。

38

預測

➤ 正確率測試

- 將110年86筆大氣腐蝕劣化因子氯鹽(Cl_h)與二氧化硫(SO_{2h})的沉積速率值，代入迴歸模式，進行鋅金屬腐蝕速率($\text{Zn}_{\text{corr-h}}$)預測，並預測鋅金屬的腐蝕環境分類等級。
- 與110年試驗站的鋅金屬腐蝕速率實際值(86筆)所對應的腐蝕環境分類等級相比較，計算出預測正確率。
- 分別計算出點預測，以及5種預測區間(30%、40%、50%、60%、90%)的預測正確率。

➤ 提出預測方案

- 依正確率測試結果，建議採用60%預測區間進行預測，則預期正確率可達90%以上。

點預測與5種預測區間的預測正確率

預測方式	預測正確率
點預測	52.33%
30%預測區間	68.60%
40%預測區間	73.26%
50%預測區間	81.40%
60%預測區間	91.86%
90%預測區間	100.00%

39



04 結論與建議

40

大氣腐蝕
因子
調查結果

➤ 氯鹽沉積速率

- 4季中以**秋、冬**2季的氯鹽沉積速率較高
- 較高的氯鹽沉積速率大多發生在**秋、冬**2季**北部至西部沿海地區**，在**距離海岸線較遠山區**的氯鹽沉積速率最低
- **沿海地區以高雄沿海**的氯鹽沉積速率較低

➤ 氯鹽沉積速率--垂直海岸試驗線

- 以**高雄港、蘇澳港**2試驗線較低；**北部、西部**試驗線**秋、冬**2季較**春、夏**2季高。

➤ 二氧化硫沉積速率

- 除靠近硫磺區的**陽明山國家公園**外，較高值發生在**西部的產業園區**，以及**北部沿海的十八王公橋**，且以**秋、冬**2季較高

➤ 二氧化硫沉積速率--特定試驗點

- 以**彰濱、觀音及官田**3產業園區在**秋冬**2季的數值較高

41

大氣金屬
腐蝕速率
試驗結果

➤ 垂直海岸試驗線

- 碳鋼金屬：以**基隆、台塑六輕**2試驗線較高，且以**冬季**較高
- 鋅金屬：以**台塑六輕**試驗線的腐蝕速率最高，其次是**臺中港、高雄港、及核三廠**3試驗線，
- 銅金屬：以**臺塑六輕**試驗線在**秋、冬**2季最高，其次是**臺中港**試驗線秋季值
- 鋁金屬：以**西部的台塑六輕、臺中港、桃園**3試驗線較高，且以**秋、冬**2季較高。

➤ 特定試驗點

- 碳鋼金屬：以**台塑六輕及大潭電廠**在冬季時最高
- 鋅金屬：產業園區以**中鋼公司(臨海產業園區)**冬季值最高，**台塑六輕**秋、冬季值次高
- 銅金屬：產業園區以**彰濱、台塑六輕**較高，電廠以**臺中、通霄**電廠秋、冬值較高
- 鋁金屬：產業園區以**台塑六輕、彰濱**較高；電廠以**大潭**電廠較高。

42

鋅金屬
關聯性分析

➤ 鋅金屬與腐蝕因子關聯性分析

- 本計畫運用迴歸分析法建立腐蝕因子與鋅腐蝕速率間的迴歸模式，結果顯示鋅腐蝕速率主要受到氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等2項腐蝕因子的影響，兩者間是對數線性關係。

43

建議

1. 未來持續建立臺灣地區構造物腐蝕環境潛勢分析之完整數據資料庫，並針對前期累積量測與試驗分析資料，進行統計與大數據分析，研析大氣腐蝕因子與金屬材料之關聯性。
2. 持續藉由辦理教育訓練、研討會及出版年報，推廣「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」於交通部、公路局、高速公路局、港務公司及顧問公司等選用金屬材料及防蝕工法參考應用，確保公共工程如橋梁、碼頭等構造物，能達到或超過設計使用年限。

44



THANK YOU

簡報完畢
敬請指教



45