



腐蝕鋼板機械性質衰減模型研究-以實船及加速腐蝕鋼板分析

徐一仁¹、李綺芳²、林宗岳²、李雅榮²、李岳聯^{1*}

¹國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

²財團法人中國驗船中心研究處研發組

Declining Model of Mechanical Properties for Corroded Steel Plate –An Empirical Study of Real Ships and Accelerated Corrosion Test

*通訊作者：yuehlien@ntu.edu.tw

摘要

驗船中心現有的腐蝕程度檢測方式，大多是使用超音波測厚儀測量鋼板厚度，並在腐蝕厚度達到原先的 25%後將其汰換。此種方法雖較簡便，但盲點不少。故期望能針對海洋環境下腐蝕後鋼材的材料強度衰減度進行實驗分析，供設計及檢驗人員參考。在使用定電流極化下進行的加速腐蝕結果顯示，在平均厚度下降 5%到 35%間的均勻腐蝕對於鋼板的各項機械性質都影響不大，但面臨局部腐蝕時，鋼板的伸長量會隨著蝕孔腐蝕深度上升而大幅下降，當深度達到厚度的 20%時，伸長量最多會下降至原先的 60%。能得出腐蝕並不影響材料性質，但局部腐蝕造成的表面形貌不平整使得該處應力及應變集中，進而造成伸長量減少。最後，求出伸長量衰減率與孔蝕深度的經驗公式，並與舊板相互比較。

關鍵詞：腐蝕、船舶結構、剩餘強度、局部腐蝕、機械性質。

Abstract

Intermediate and special surveys may be required in association with ultrasonic thickness every five years. The reduced material strength was determined by measuring the thickness. However, this way has many blind spots. The study aims to analyze the material properties of the corroded steel in the marine environment. The results of acceleration corrosion test show that, when general corrosion which thickness decreased between 5% and 35% of original thickness occurs, the Young's modulus, yielding strength, and ultimate tensile strength still remains constant, and the extension rate slightly decreased, but when faced to local corrosion, the reducing extension rate of steel plate increases as the pitting depth increased. The extension rate would decrease to 60% when the pitting depth up to 20% of original thickness. The results show that the corrosion cannot affect the material property, but the uneven surface induce by local corrosion will cause stress concentration, and further decrease the extension rate. Finally, the empirical formula between extension rate and pitting depth was established and compare to the result from the steel plate of real ships.

Keywords: Corrosion; Ship Structure; Residual Strength; Local Corrosion; Mechanical Properties.

1. 前言

腐蝕船舶本身由金屬材料製造而成，而金屬材料由於受到海水溫度、大氣以及海水鹽鹼度的影響，再加上海洋微生物附著以及乾溼交替循環。常常會導致嚴重腐蝕發生，即使有油漆的防護，但在航行數年後仍會逐漸失去保護的功用。除了海水，貨艙裡的貨物或是油艙裡的油也都會對船殼造成腐蝕，如圖 1 即是一個在油槽內的嚴重腐蝕。而伴隨腐蝕而來的疲勞裂紋、脆性破壞等現象，對於船體結構的破壞更是不容忽視。且在現今，對於結構系統的安全性判斷都以拉伸強度預測，而在 Paik 一系列的有限元素分析下，可知在穿孔腐蝕覆蓋面積達到 30% 後，鋼板的極限強度會下降 50% 以上，由此可知腐蝕對於船體結構安全的影響是十分巨大的[1]。而根據統計，更是有將近 90% 的船舶意外都是與腐蝕有關[2]。

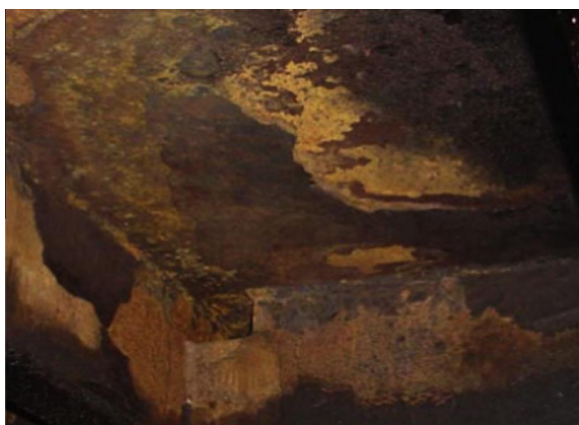


圖 1 位於油槽的嚴重腐蝕[2]

不只是安全性的問題，海洋腐蝕的嚴重性造成船舶產業需大幅增加成本以應對這些可能發生的意外。根據美國船舶產業統計，一年內腐蝕相關的成本約為 27 億美元，其中分為三大部分：新建船舶 (11.2 億元)、維護修繕 (8 億) 以及腐蝕造成的停機時間成本 [3] [4] (7.8 億)。

有關腐蝕對於機械性能的影響在船舶及土木領域都是需要密切關注的問題，船舶領域目前較多研究關注在腐蝕在複雜結構上對於強度的影響 [5, 6]，也由於結構複雜，故多半結合有限元素分析

(FEM) [6,7]，而土木多關注在鋼筋在混凝土中的腐蝕 [8,9,10] 或是地下管線的剩餘強度的問題 [11]，雖然環境與材料本身都與船舶領域有所差異，但論文數多，研究較全面，可參考其實驗手法或步驟。雖然實驗費時費力，但實際的測試對於幫助了解斷裂情況非常重要，數值模擬與建立破裂模型都仰賴著藉由實際測試來修正數據或得到新概念。但現行實驗為了控制實驗變因，較為多以物理加工 (如鑽孔) 來代替真實的腐蝕情況 [12]。少數則是以人工加速腐蝕來代替 [13]。而真正天然腐蝕的樣本則較稀少 [14]。調查均指出局部腐蝕會導致彈性形變量大幅減少，由延性的破壞行為轉變成接近脆性的破壞行為，且在嚴重腐蝕時降伏平台會減縮甚至消失 (如圖 2 所示)。但有關拉伸強度及降伏強度則眾說紛紜，Jie Sheng 的研究指出拉伸強度只與試片受腐蝕後的最小截面積有關，但降伏強度會受蝕坑的密度、深度及形狀所影響 [15]。但在 Appuhamy 等人的研究卻得到輕微及中度腐蝕的試片拉伸強度會大於沒有腐蝕的試片 [16]。實際的實驗雖然重要，但腐蝕的不可控性導致實驗難以統一規格且耗時，又物理加工腐蝕與電流加速腐蝕與天然腐蝕三者間的差異也仍有待釐清。

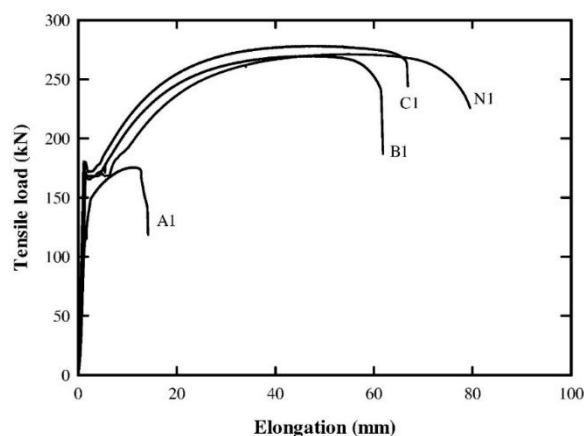


圖 2 在不同腐蝕程度下鋼板的力與位移圖 (N1: 未腐蝕, C: 輕微腐蝕, B: 中度腐蝕, A: 嚴重腐蝕) [14]

在驗船中心現有的檢驗規範 [15] 規定每五年需回港接受厚度檢驗。在厚度檢驗方面大多是以目

視或超音波檢測鋼板厚度，當板厚變薄到原厚的 75% 以下即須更換該鋼板。超聲波測厚在實際使用時會因為鐵鏽而受到干擾，即使在現場的驗船師會以物理手段清除鐵鏽，仍有所影響。而使用剩餘厚度來代表鋼板的剩餘強度也是一大盲點，如當鋼板受到局部腐蝕或是孔蝕時，表面狀況會十分不平整，這時厚度的測量又會受到考驗。更重要的是，腐蝕或老化後的鋼板厚度能否完整代表該鋼板在此厚度下的剩餘強度，以及剩餘強度是否會改變，其腐蝕後強度與設計時的新材料強度是否有落差等疑慮。

本研究結合實驗室加速腐蝕製造出的腐蝕試片，實船在回港檢驗後更換下來的鋼板，期望能針對海洋環境下腐蝕後鋼材的材料強度衰減度進行實驗分析，供設計及檢驗人員參考。

2. 實驗方法

2.1 實驗材料

實驗使用材料為驗船中心所提供的船用鋼材，鋼材種類為 A 級鋼(A grade)，是船舶結構中最普遍使用的鋼材，其機械性能以及元素成分如表 1、2 所示。其中分為由實船回港檢驗後更換下來的舊板(如圖 3 示)以及用以加速腐蝕的全新鋼板，後皆以舊板及新板代稱兩者。舊板皆為從隔艙壁或是壓載水艙更換下之鋼板，腐蝕環境為海水。舊板厚度範圍為 7mm 至 13mm，新板厚度統一為 11mm。在加速腐蝕時為了限制腐蝕範圍所用到的油漆塗層為青葉調和漆。

本次舊板由七個部位取下，每個部位的鋼板再切割下 3 支試片，共 21 支試片。



圖 3 實船回港檢驗後更換下來的舊板

表 1 A 級鋼之化學成分

元素	Fe	C	Si
成分 (wt. %)	Remainder	<0.21	<0.5
元素	Mn	P	S
成分 (wt. %)	>2.5×C	<0.035	<0.035

表 2 A 級鋼之機械性質

降伏應力 (MPa)	抗拉強度 (MPa)	伸長量 (%)	楊氏係數 (GPa)
322	458	23.6	201

2.2 試片製備

新舊板皆依 ASTM A370 規範[16]將鋼板切割成 sheet-type 的拉伸試片，而新板在切割成拉伸試片後會在試片背面黏上導電用的銅膠，並將周圍漆上塗層，再根據要進行的腐蝕種類在試片表面進行塗漆的加工。均勻腐蝕的試片會將試片表面完全裸露(如圖 4 示)。而局部腐蝕的試片則是參考 ASTM D610 規範[17]中 spot rusting 的樣貌，將其中四種樣貌隨腐蝕嚴重程度由低到高分別命名為 pattern 1、2、3、4(如圖 5 所示)。在試片表面利用油漆將圖形以外的部分覆蓋(如圖 6 所示)，使腐蝕區域控制在 pattern 中。

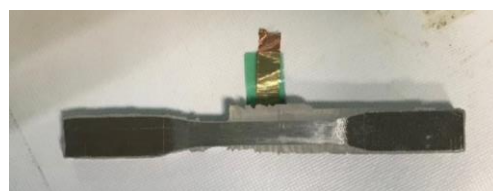


圖 4 均勻腐蝕試片表面圖，背後黏銅膠，且周圍以塗漆包覆

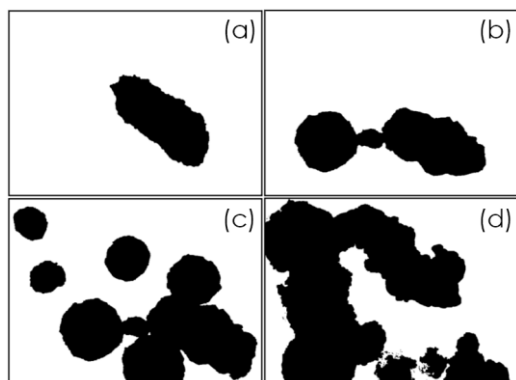


圖 5 ASTM D610 的腐蝕圖形，隨腐蝕程度上分別命名為 (a)Pattern 1(b)Pattern 2(c)pattern 3(d)pattern 4[17]



圖 6 局部腐蝕試片表面圖，將 pattern 外都以塗漆包覆

舊板的試片共 21 支，因其表面起伏落差大，其厚度量測分為兩種，一種為在試片平行部處分五點進行量測，在取平均，為 T_{ave} 。另一種為量測試片平行部厚度最小值處，為 T_{min} 。

2.3 加速腐蝕

利用定電流極化對試片進行加速腐蝕，實驗配置如圖示，將拉伸試片連結在電源供應器的陽極且將銅板連結在陰極處，並將兩者浸泡在 80L 的 3.5wt% 的 NaCl 水溶液中(如圖 7 所示)，電流設置為 2A。

通電時間可藉由法拉第公式計算，公式如下：

$$V = \frac{i_{corr} \times a}{d \times n \times F} \times t \quad (1)$$

V 代表腐蝕的體積(mm³)， i_{corr} 代表腐蝕電流(A)，a 是反應物的原子量(g/mole)，d 代表反應物的密度(g/mm³)，n 是該反應交換的電子數量，F 為法拉第常數(96500 coulomb/mole)，而 t 則是代表反應時間(s)。

從以上公式能得知電流值、腐蝕體積及反應時間三者的關係。固定電流值，再藉由計算不同腐蝕樣貌腐蝕至不同厚度時所減少的體積，即可得出不同試片加速腐蝕所需的時間。

本次研究因專注於驗船中心的換板根據，也就是 25% 原板厚，故均勻腐蝕試片目標厚度為原板厚的 5%-35%，局部腐蝕深度則為 0.5mm-2mm。



圖 7 定電流極化實驗架設置圖

2.4 拉伸試驗

拉伸試驗為一簡單快速了解材料機械性能的方法，拉伸試驗使用萬能試驗機對試片施加張力，進而使試片斷裂，在試驗期間紀錄施加的力與夾頭的相對位移。須注意的是，若單純紀錄夾頭相對位移，伸長量會在試驗初期因夾頭與試片滑移而高估，進而導致材料的應力應變曲線前段的彈性區失準，故改使用位移計紀錄位移。

在拉伸試驗完後，將施加的力和材料的位移作圖，即是力與位移圖，而將受力(F)除以試片平行部截面積(A_0)、伸長量(δ)除以試片變形處長度(L_0)後，即可得到工程應力(σ_e)及工程應變(ϵ_e):

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

$$\epsilon_e = \frac{\delta}{L_0} \quad (3)$$

但在局部腐蝕後，試片的截面積估算不準，若以應力表示會有所誤差，故在局部腐蝕時使用荷重與應變的圖進行比較。

3. 結果與討論

3.1 舊板拉伸數據

舊板共 21 支試片的機械性質總表如表 3 所示，可觀察出隨著不同腐蝕程度變動最大的性質為伸長量，隨腐蝕程度上升會大幅的下降。拉伸強度及降伏強度只有在嚴重腐蝕時才有所衰減，且降伏平台也隨腐蝕程度上升消失，而楊氏係數則不受腐蝕程度影響(如圖 8 所示)。

進一步觀察 T_{ave} 及 T_{min} 可將試片分成均勻腐蝕及局部腐蝕兩類。其中 N3-1、N3-3、N6 及 N7 共八支試片為均勻腐蝕的舊板， T_{ave} 與 T_{min} 幾乎一致。即使厚度下降最多達 25%，整體機械性質皆無改變，只有因厚度減少造成荷重下降，而在局部腐蝕的試片則能看到伸長量大幅下降，且降伏平台消失等特性。故能推斷單純腐蝕對於材料機械性能並不會有影響，而是因腐蝕所引起的表面起伏造成應力或應變集中，進而影響表現。

值得一提的是，在計算強度時，須將受力除以該試片的截面積以求得應力值，在均勻腐蝕時，截面積量測容易，但在試片表面起伏大，也就是局部腐蝕時，以不同量測厚度來計算就會造成強度的大幅變動，故本次實驗選擇兩種厚度 T_{ave} 及 T_{min} 來進行計算。一般來說，因為最小厚度處截面積較小，能承受的力較小，故斷裂多會發生在此處，故選擇最小厚度來計算應力似乎比較合理，但比較兩種厚度算出的應力值會發現 T_{min} 算出的應力值多大於未腐蝕鋼板的值。而 T_{ave} 算出的應力值在腐蝕嚴重時，則會開始低於未腐蝕鋼板的值。研判是因為在

厚度量測時所量到的最小值並不能代表該截面積，因為該截面積上的厚度是不一致的，但平均厚度又會受其他未腐蝕的區塊影響而使厚度過大。考慮到應力值提升較不合理，故本實驗最後選擇以平均厚度計算出的強度為主。

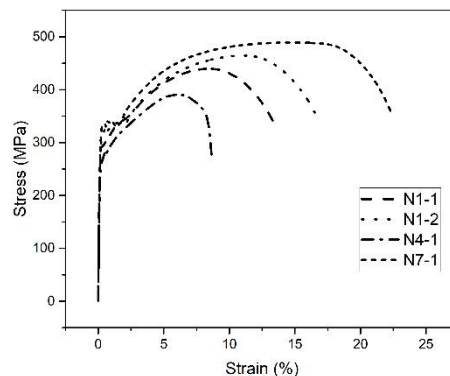


圖 8 舊板的應力應變曲線(由 T_{ave} 算出)

3.2 加速腐蝕-均勻腐蝕

根據舊板所得到的資訊，腐蝕種類對於機械性質的影響至關重要，故在人工加速腐蝕時將均勻腐蝕及局部腐蝕分開。利用定電流極化於拉伸試片表面進行加速均勻腐蝕後，得到厚度下降 5%至 35% 的拉伸試片(如圖 9)，進行拉伸試驗後可得均勻腐蝕下的工程應力-工程應變關係圖(圖 10)。從圖可以觀察到隨著板厚下降，試片的機械性質不變，只有伸長量下降，與前一節舊板的結果相似。但相比舊板，人工腐蝕的伸長量下降較多，是因為在加速腐蝕後表面較難維持平整，故還是有些許的起伏，造成伸長量下降。

表 3 舊板機械性質總表

試片名稱	降伏強度 (T_{ave})(MPa)	降伏強度 (T_{min})(MPa)	拉伸強度 (T_{ave})(MPa)	拉伸強度 (T_{min})(MPa)	伸長量 (%)	T_{ave} (mm)	T_{min} (mm)	原厚 (mm)
N1-1	299	359	439	528	13.6	10.38	8.64	15
N1-2	317	328	464	480	16.7	10.97	10.61	15
N1-3	307	346	446	503	12.9	10.55	9.35	15
N2-1	336	349	469	487	19.1	12.95	12.49	15
N2-2	305	316	466	483	18.7	13.38	12.92	15
N2-3	314	340	469	508	18.6	13.11	12.1	15

N3-1	331	332	474	475	22.7	10.09	10.06	11
N3-2	337	338	482	485	17.3	10.02	9.98	11
N3-3	334	335	483	484	21.8	10.06	10.04	11
N4-1	269	331	390	481	9.0	10.42	8.45	11
N4-2	249	344	362	499	10.0	10.21	7.41	11
N4-3	312	351	457	515	13.6	10.62	9.43	11
N5-1	360	397	499	551	12.4	10.16	9.2	11
N5-2	335	406	461	559	10.8	9.7	8	11
N5-3	299	364	442	539	12.1	9.74	8	11
N6-1	331	331	483	483	22.9	9.1	8.9	12
N6-2	329	329	491	491	22.9	8.9	8.9	12
N6-3	334	334	495	495	22.5	9	9	12
N7-1	338	338	489	489	22.3	8.9	8.8	12
N7-2	342	342	499	499	20.9	8.9	8.7	12
N7-3	322	322	480	480	20.5	9	8.9	12



圖 9 均勻腐蝕後試片側視圖，由上至下為腐蝕程度逐漸加深，可看出在嚴重腐蝕(下方)，仍不能避免會使試片表面有些許起伏。

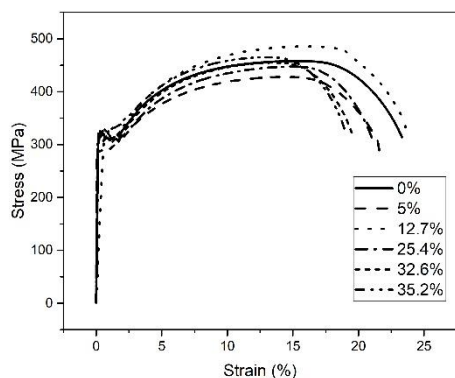


圖 10 均勻腐蝕後試片的應力應變圖

3.3 加速腐蝕-局部腐蝕

圖 11 為進行加速局部腐蝕後的試片表面形

貌，可看出在進行局部腐蝕時隨著蝕坑深度上升，pattern 的面積會逐漸上升，令蝕坑的形狀維持一相似的 aspect ratio，而 pattern 3 及 pattern 4 的蝕孔深度在到達 2mm 後，pattern 更是擴大到超出試片平行部。

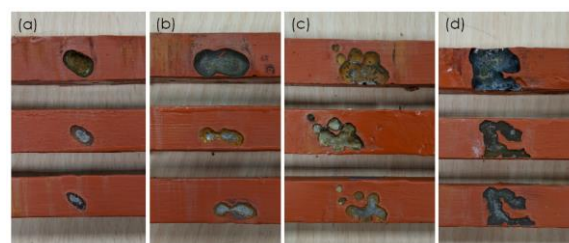


圖 11 不同 pattern 且不同深度在加速局部腐蝕後的表面形貌，每張圖由下至上為 0.5mm、1mm、2mm，而四張圖依序為 (a)pattern 1(b)pattern 2(c) pattern 3(d) pattern 4。

將試片進行拉伸試驗後，圖 12 為在不同的腐蝕樣貌(Pattern 1~ Pattern 4)下，局部腐蝕深度對機械性質荷重-應變圖的影響。整體而言，經過定電流加速腐蝕後，鋼板的伸長量都有下降的趨勢，降伏強度和拉伸強度只有在嚴重腐蝕時下降，且降伏平台消失，也與舊板的趨勢相似。在 pattern 1 時，即使蝕孔深度達到 2mm，拉伸強度及降伏強

度都與未腐蝕的鋼板相近，甚至伸長量只下降約 10%。但在 pattern 4，在蝕孔深度達到 0.5mm 時，伸長量就下降 20%，在蝕孔深度達到 2mm 時，伸長量只剩下約一半。可看出 pattern 跟蝕孔深度兩者對於伸長量皆有影響。

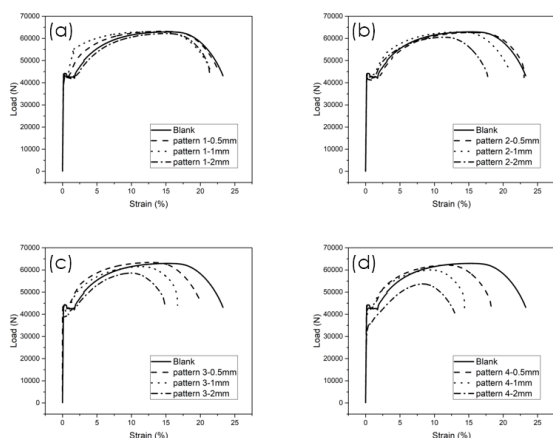


圖 12 不同 pattern 且不同深度在加速局部腐蝕後的荷重-應變圖，四張圖依序為(a) pattern 1(b)pattern 2(c) pattern 3(d) pattern 4。

但比較均勻腐蝕及局部腐蝕能發現，在量測到一樣的厚度時，局部腐蝕的荷重高於均勻腐蝕許多，即使是如 pattern 4 這種嚴重腐蝕，最大荷重仍大於均勻腐蝕(如圖 13 所示)。故可知當船舶在進行測厚時，應須考慮該部位鋼材對於韌性的要求。若該部位對於韌性要求不高，那對於局部腐蝕的容忍度可以較均勻腐蝕更高，也就是換板的板厚標準可以更低。但若是有機會受衝擊的部位如外板，那對於韌性的要求就會較高，那對於局部腐蝕造成的伸長量下降則不容輕視。

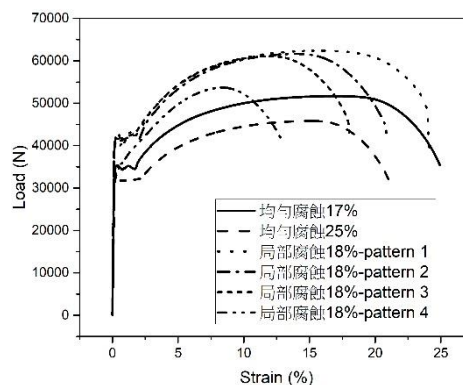


圖 13 均勻腐蝕及局部腐蝕在相似深度下的荷重-應變圖

3.4 衰減模型

由上述研究可知腐蝕後鋼板的機械性質變動以伸長量下降最為明顯，故將其當作材料劣化的根據，並以此建立在不同腐蝕樣貌下伸長量衰減率與蝕坑深度的模型。

圖 14 為不同腐蝕樣貌隨腐蝕深度造成的伸長量衰減圖，並藉由二階方程式擬合求得蝕坑深度(D)與伸長量衰減率(ER)的關係。可得腐蝕樣貌為 pattern 1 下的關係式:

$$ER(D) = 100.31 - 10.15D + 2.89D^2 \quad (4)$$

pattern 2 下的關係式:

$$ER(D) = 100.73 - 5.6D - 3.36D^2 \quad (5)$$

pattern 3 下的關係式:

$$ER(D) = 100.55 - 36.88D + 9.18D^2 \quad (6)$$

pattern 4 下的關係式:

$$ER(D) = 100.3 - 53.25D + 15.42D^2 \quad (7)$$

可看出隨著 pattern 嚴重程度上升，二次項系數也越大，代表曲線更接近凹口向上的二次曲線，也代表 pattern 越嚴重，伸長量衰退的更快。藉由該衰減模型可知蝕孔深度在 2mm 以內時，伸長量

衰減的趨勢。

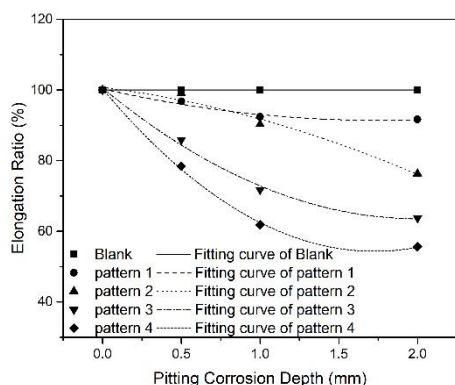


圖 14 不同腐蝕樣貌隨腐蝕深度改變造成的伸長量衰減圖及其二階擬合公式

同樣將舊板隨腐蝕深度改變造成的伸長量衰減率作圖(圖 15)，並以二階方程式擬合其關係式如下:

$$ER(D) = 95.53 - 31.76D + 5.11D^2 \quad (8)$$

將加速腐蝕及舊板兩者的經驗公式相互比較(如圖 16 所示)，可看出實船的經驗公式與加速腐蝕的經驗公式趨勢接近，且介於 pattern 3 及 pattern 4 之間，也就是較嚴重之腐蝕樣貌。這是因為實船換下的鋼板多為 20 年以上之鋼板，自然腐蝕程度嚴重，且實船的腐蝕尺度遠大於試片，即使在實船上為小蝕孔，在切割下的試片上也是嚴重腐蝕樣貌。

也可看出實船的曲線較平緩，研判應為加速腐蝕坑深度只到 2mm，若繼續加深，其曲線應會逐漸趨近直線。

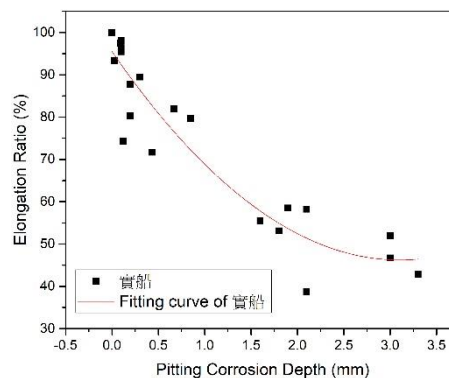


圖 15 實船試片隨腐蝕深度改變造成的伸長量衰減圖及其二階擬合公式

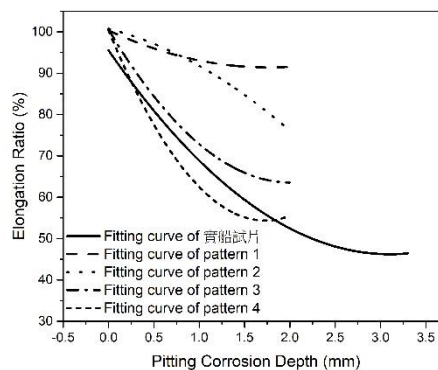


圖 16 比較加速腐蝕及實船試片的二階擬合公式。

4. 結論

上述研究介紹了腐蝕對於機械性質的影響，分別以實船切割下之鋼板以及以定電流極化製成的加速腐蝕鋼板來進行比較。可得以下幾點結論:

- (1) 對於非均勻腐蝕之試片，選用不同測量厚度方式會對計算出來的強度造成很大影響。
- (2) 均勻腐蝕對於機械性能的影響只在於隨著厚度下降造成荷重下降。進而推得腐蝕對於材料本身並無影響。
- (3) 藉由局部腐蝕的試片可知在遭受局部腐蝕後，試片會因為表面不平整造成應力集中，進而影響伸長量。而在嚴重腐蝕



時更會使拉伸強度及降伏強度下降，但若以腐蝕深度來看，同一腐蝕深度下局部腐蝕的荷重會大於均勻腐蝕的荷重。

- (4) 腐蝕後鋼板的機械性質變動以伸長量下降最為明顯，可當作材料劣化的根據
- (5) 藉由二階方程式擬合不同 pattern 的局部腐蝕下蝕坑深度及伸長量衰減率的關係，可得出伸長量衰減的模型。
- (6) 藉由比較人工加速腐蝕及實船切割下的鋼材，能看出 pattern 3、pattern 4 的情況較符合實際狀況。

從以上結論推得，驗船協會在檢測厚度時，在較不需要考量鋼材韌性的部位，對於局部腐蝕的容忍程度能提高，也就是換板的標準可以降低。但若是需要考慮鋼材韌性的部位，如可能承受衝擊的部位，對於局部腐蝕則更需多加留意。

參考文獻

- [1] Y. William, B. Scottz, S. Sandra, and W. D. Earle, "Computer aided Interactive Medical Management Information and Control System and Method," U.S. Patent 006026035 Feb. 2, 2006.
- [1] J. Paik, J. Lee, and M. Ko, "Ultimate compressive strength of plate elements with pit corrosion wastage," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 217, no. 4, pp. 185-200, 2003.
- [2] R. E. Melchers, "Corrosion uncertainty modelling for steel structures," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 52, no. 1, pp. 3-19, 1999.
- [3] G. H. Koch, M. P. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani, and J. H. Payer, "Corrosion cost and preventive strategies in the United States," United States. Federal Highway Administration, 2002.
- [4] E. F. Herzberg *et al.*, "The Annual Cost of Corrosion for Army Ground Vehicles and Navy Ships," *LMI Government Consulting Report SKT50T1*, 2006.
- [5] H. Karagah, C. Shi, M. Dawood, and A. Belarbi, "Experimental investigation of short steel columns with localized corrosion," *Thin-Walled Structures*, vol. 87, pp. 191-199, 2015.
- [6] K. Woloszyk, M. Kahsin, and Y. Garbatov, "Numerical assessment of ultimate strength of severe corroded stiffened plates," *Engineering Structures*, vol. 168, pp. 346-354, 2018.
- [7] R. Wang and R. A. Shenoi, "Experimental and numerical study on ultimate strength of steel tubular members with pitting corrosion damage," *Marine Structures*, vol. 64, pp. 124-137, 2019.
- [8] A. K. Azad, S. Ahmad, and S. A. Azher, "Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams," *ACI Mater. J.*, vol. 104, no. 1, p. 40, 2007.
- [9] Y.-C. Ou, Y. T. T. Susanto, and H. Roh, "Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars," *Construction and Building Materials*, vol. 103, pp. 93-104, 2016.
- [10] S. Imperatore, Z. Rinaldi, and C. Drago, "Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel rebars," *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 219-230, 2017.
- [11] S. C. Grigory and M. Q. Smith, "Residual



- strength of 48-inch diameter corroded pipe determined by full scale combined loading experiments," in *International Pipeline Conference*, 1996, vol. 40207: American Society of Mechanical Engineers, pp. 377-386.
- [12] H.-S. Kim, Y.-S. Jeong, D. K. Dao, and I.-T. Kim, "An approach for evaluating tensile strength of painted steel plates from the surface rusting grade," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 7, pp. 510-516, 2018.
- [13] Y. Garbatov, C. G. Soares, J. Parunov, and J. Kodvanj, "Tensile strength assessment of corroded small scale specimens," *Corros. Sci.*, vol. 85, pp. 296-303, 2014.
- [14] I.-T. Kim, D. K. Dao, Y.-S. Jeong, J. Huh, and J.-H. Ahn, "Effect of corrosion on the tension behavior of painted structural steel members," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 133, pp. 256-268, 2017.
- [15] J. Sheng and J. Xia, "Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel," *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 90-100, 2017.
- [16] J. R. S. Appuhamy, M. Ohga, T. Kaita, and R. Dissanayake, "Reduction of ultimate strength due to corrosion-A finite element computational method," *International Journal of Engineering (IJE)*, vol. 5, no. 2, p. 194, 2011.
- [17] C. C. SOCIETY, *Rules for the Construction and Classification of Steel Ships*. 2018.
- [18] ASTM, I. "Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products." *ASTM A370* (2012).
- [19] A. S. f. T. Materials, "ASTM D 610: Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces," 2008: ASTM West Conshohocken.