

## 繫纜抗拉強度與疲勞壽命檢測

梁吉弘<sup>1\*</sup> 羅光閔<sup>1</sup> 盧建仲<sup>2</sup> 陳冠良<sup>2</sup> 王郁嬪<sup>2</sup> 周頤屏<sup>2</sup> 林則佑<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立高雄科技大學 造船及海洋工程系

<sup>2</sup>海軍造船發展中心

關鍵詞：拉伸強度、疲勞強度、數值模擬、S-N 曲線

### 摘要

纜繩為船舶之重要配件，提供繫泊船隻、吊掛貨品與裝備牽引等功能，為確保使用過程中之安全性，繫纜必須提供足夠的拉伸強度與疲勞強度，避免纜繩在使用過程中發生突然的斷裂。船舶纜繩主要的負荷可分為固定船舶位置之繫泊力，以及股繩與繩芯纜繩在拉張時因為接觸而產生之壓應力與切向摩擦力。纜繩壽命受到材料、鋼索直徑與捻合方法等因素影響，為確認目前船艦纜繩於正常使用下之極限拉伸強度與疲勞壽命，本研究根據海軍造船發展中心所提供之纜繩資料進行強度分析，希望藉由數值模擬的方式評估纜繩的機械強度。

本研究參考實物的圖像，獲得股繩數目、纏繞角度與捻距等幾何資料，接著以等比例的方式繪製 6 種繫纜樣式進行分析。本研究使用 ABAQUS 分析各式纜繩在極限負荷下之應力分佈，分析時考慮各繩股間的摩擦與擠壓，希望藉此瞭解纜繩在受力時之應力分佈狀態；疲勞分析部分則是使用 ABAQUS 的疲勞分析模組 FE-safe 進行模擬，模擬時所需之 S-N 曲線則是參考相關文獻所載之數據。分析結果顯示，本研究所探討之繫纜在承受極限負荷時均能提供有效的拉伸強度，在 20%負荷的使用條件下，繫纜更不會有疲勞的問題發生。

## 前言

船舶纜繩長期受到軸向拉伸，其破壞型態多以疲勞破壞為主，是纜繩受到張力下其繩芯與股繩間因繃緊導致其之間產生反覆磨損所引發的破壞，伴隨著纏繞之股繩的逐漸斷裂，而導致整體繩徑減少最終纜繩無法承受作用負荷而斷裂，這種破壞是頃刻間的，在船舶工作上極其危險，對此為預測纜繩強度與疲勞性質，本研究針對目前海軍所用之纜繩進行有限元分析，取得應力分布結果確認於使用負荷下是否超過極限強度，後續也將透過纜繩所用材料之 S-N 曲線擬合出其疲勞次數，確認現役纜繩在正常作用下可達到預期使用次數。

## 分析方法

### 1. 纜繩模型建置

由於纜繩的繩徑、捻距與股數等各項規格會對應力分析結果產生影響，因此需要將纜繩重要之特徵形狀完全建置於分析中，本研究需由海發中心所提供附比例尺之纜繩照片，以等比例方式搭配纜繩的技術規格資料經由 3D 繪圖軟體 Rhino 進行建模，附比例尺之纜繩照片如圖 1 所示。藉由此類圖可以從中獲得鋼索線徑參數以及捻索的角度，確保纜繩幾何模型建置的準確性。



圖 1. 海軍提供附比例尺之纜繩照片

本研究探討之纜繩可分為 6 股 x19 絲、6 股 x36 絲與 6 股 x37 絲，顯示單股內還含多個鋼絲纏繞所組成，建模時如將所有單絲建構出來再進行分

析，各絲間複雜的接觸關係將會導致分析的收斂困難。根據 Wang[1]的研究指出，分析纜繩各股間的單絲接觸問題時為結構內部之微觀現象，在建模時通常僅取 1/6 捻距之繩長進行模擬即可；此外，單一繩股可以視為同心等效線繩，如圖 2 所示，如此一來可以簡化問題，假設纜繩受拉伸負荷後具有平均的應力分佈，並據此做為預估鋼纜強度之依據。

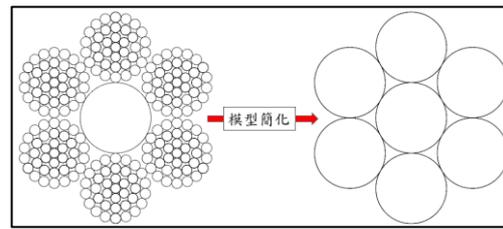


圖 2. 纜繩簡化後之截面型態

### 2. 邊界條件設置

關於分析的邊界條件部分，本研究將纜繩一端視為固定邊界並限制其六個方向之自由度（3 個移動方向與 3 個轉動方向），另一端的邊界條件考慮到纜繩主要受力形式為沿軸向之拉力，因此利用 ABAQUS 中定義結構相互關係(interaction)之耦合(coupling)功能，將承受拉伸負荷之區域耦合至一參考點上，藉此確保此區域受力狀態一致，接著對該參考點施加軸向負荷，並限制此區域除軸向位移外之三個轉動自由度與徑向滑移之自由度，確保纜繩可以完整地承受拉伸負荷，本研究模擬時所用之邊界條件如圖 3 所示。



圖 3. 纜繩分析之邊界條件設置  
鋼纜承受拉伸負荷時，股繩以及繩芯間會產

生相對的摩擦負荷，本研究在分析時透過 ABAQUS 中的一般接觸(general contact)定義繩股間切向與正向之接觸行為，並假設鋼繩摩擦係數為 0.1，藉此模擬繩股拉伸後因徑向變形所產生的摩擦，設定介面如圖 4 所示。

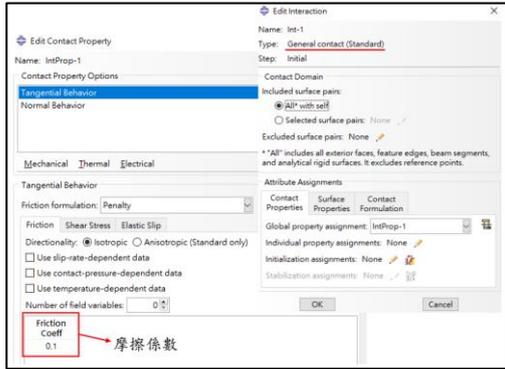


圖 4. ABAQUS 接觸條件設定

由於繩股實際長度非常長，數值模擬時若使用完整繩股長度進行模擬，是相當耗費計算資源的，因此本研究假設繩股在承受拉伸負荷的情況下，整體的應力應該呈現均勻分佈，此時僅需建構局部繩股段即可。為確認建構之局部繩股段不會受到繩長改變的影響，分別使用繩股線纏繞 1 圈、1.5 圈以及 2 圈之模型進行模擬，分析結果如圖 5 所示。根據分析結果顯示，繩股線纏繞 1 圈、1.5 圈以及 2 圈的應力誤差小於 1%，在遠離邊界之繩股應力則是幾乎一致，此現象可以確認繩股模型的長度對強度分析結果之影響不大，本研究後續為確保可有效觀測不同股數之股繩於纏繞下的應力分析結果，建議採用纏繞 2 圈之模型進行分析。

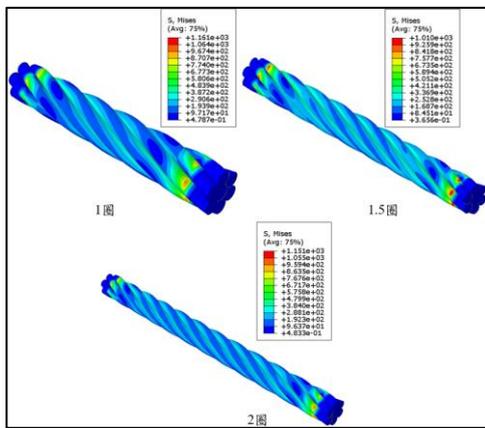


圖 5. 不同纏繞圈數下之應力結果差異比較

### 3. 分析結果擷取方法

本研究發現繩股應力結果之最大應力會發生於邊界條件上，如圖 6 所示，這是受限於分析邊界的影響所產生之應力集中現象，考量繩股實際邊界與數值模型不同，且本研究旨在探究繩股受拉後在應力均勻段之強度與耐疲勞性，故忽略兩側邊界引起之應力集中，僅採認繩股模型中央段之均勻應力，如圖 7 所示。

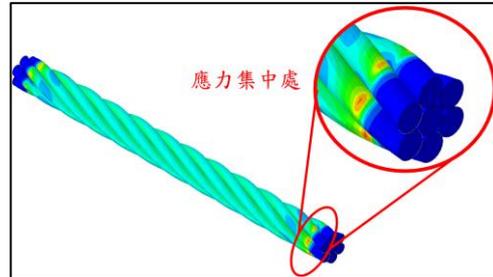


圖 6. 邊界引起之應力集中

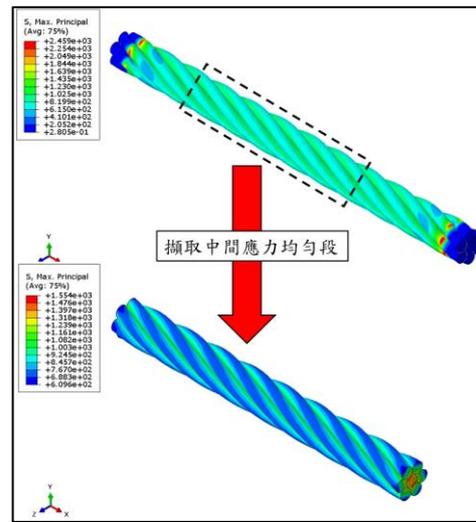


圖 7. 中間應力均勻段擷取示意圖

金屬材料的應力分析常使用 Von mises 等效應力來表示結構的應力響應，本研究所探討的繩股結構有相當高的軸向特性，而繩股所承受的主要的負荷亦是屬純拉伸狀態，與 Von mises 等效應力是三方應力結果之平均應力不同，因此本研究建議模擬後應參考主軸應力作為主要評估強度之依據。圖 8 為，Von mises 與最大主軸應力之比較，在受力均勻段之最大主軸應力的應力值會較 Von mises 應力大。

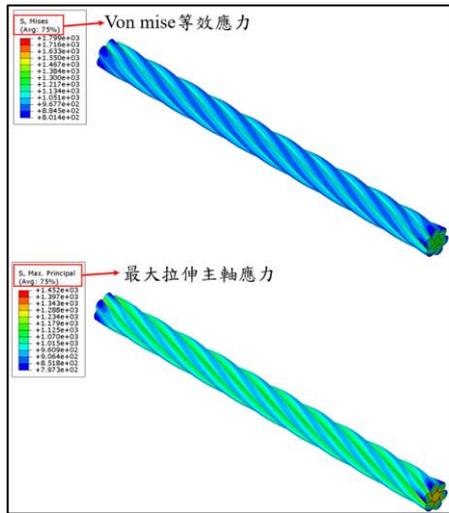


圖 8. Von mises 與最大主軸應力之比較

確認完模型、邊界條件，以及應力的擷取方式後，本研究使用 ABAQUS 之疲勞分析模組 Fe-safe，並搭配纜繩對應材料之 S-N curve 進行纜繩的疲勞壽命分析。Fe-safe 需使用者自行將 ABAQUS 結構分析後之應力結果以 ODB 檔形式匯入，並選擇內建或自行建立之疲勞性能數據，最終根據應力分析結果與材料之 S-N curve 評估材料在此應力條件下發生疲勞之次數。

### 纜繩規格與材料參數

#### 1. 纜繩規格

本研究針對目前 6 種現役纜繩進行探討，透過海軍造船發展中心所提供之纜繩規格表如表 1 所示，進行建置數值模型，並定義分析時所需之材料參數與負荷條件，本研究為分別 6 種纜繩，以 SWR(Steel Wire Rope)作為各個規格之纜繩型號代稱。

表 1. 纜繩規格表

型號	SWR-1	SWR-2	SWR-3
材質	鋼、鍍鋅	鋼、鍍鋅	不鏽鋼302或304
鋼索徑(mm)	10	8.5	10
機械設計規範 斷裂負荷(KN)	63	33	53
型號	SWR-4	SWR-5	SWR-6
材質	鋼、鍍鋅	鋼、鍍鋅	鋼、鍍鋅
鋼索徑(mm)	16	51	16.5
機械設計規範 斷裂負荷(KN)	165	1235	150

建構纜繩模型需要確定的主要參數為纜繩股數、繩索線徑與捻距，其中捻距為股繩纏繞繩芯一周後相應兩點間之直線距離，如圖 9 所示。確定捻距後

可以決定股繩纏繞之角度，由於表 1 中所提供之資料無纜繩捻距等相關數據，因此本研究另請海發中心提供含比例尺之實物照片，依據比例尺所載明之資訊，直接由圖片中決定股繩與纜繩中心軸之夾角，如圖 10 所示，並透過下列公式(1)計算出纜繩捻距，其中 T 為捻距、D 為鋼索徑、 $\alpha$  為捻角。本研究依據表 1 及海發中心提供之纜繩照片獲得分析模型之尺寸，6 型纜繩模型尺寸與實物比較整理如表 2 所示。

$$T = \frac{\pi D}{\tan(\alpha)} \quad (1)$$

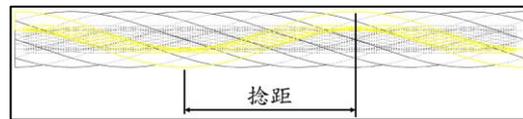


圖 9. 纜繩捻距長度示意圖

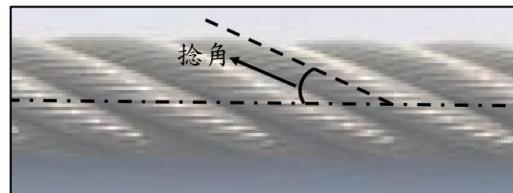
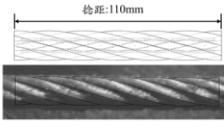
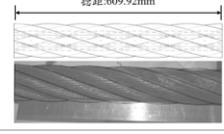
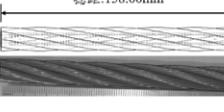


圖 10. 股繩與繩芯之夾角

表 2. 各纜繩之模型尺寸

纜繩型號	鋼索徑(mm)	捻角	數值模型與實物參照
SWR-1	10	27.35°	 捻距:57.71mm
SWR-2	8.5	28.20°	 捻距:46.87mm
SWR-3	10	28.03°	 捻距:56.06mm

表 2 各纜繩之模型尺寸 (續)

纜繩型號	鋼索徑(mm)	捻角	數值模型與實物參照 捻距:110mm
SWR-4	16	24.29°	
SWR-5	51	14.66°	
SWR-6	16.5	17.65°	

獲得纜繩模型尺寸後，接下來需要確認負荷條件。經與海發中心所提供資料可知目前 6 型纜繩皆採用「機械設計遍覽」所規定之負荷做為纜繩極限負荷標準，因此本研究將採用此負荷對各型纜繩進行強度分析，確認纜繩尺寸與材質是否能承受極限負荷，藉此評估纜繩在靜態負荷下之安全性。

此外，根據提供之資訊，確認纜繩使用時需額外考慮 5 倍安全係數，因此纜繩使用過程中可承受的最大負荷僅為極限負荷的 1/5，本研究將針對極限負荷與 5 倍安全係數下之負荷條件進行應力響應分析，除此之外由於纜繩在實際使用過程中，因表面磨損以及邊界支撐的不同而有「過負荷」的情況，因此本研究另外以極限負荷的 2 倍安全係數做為「過負荷」下之極限受力標準，並評估纜繩在此受力條件下可承受之疲勞次數。

## 2. 材料參數

### 2.1 Improved plow steel(IPS)改良犁鋼

本研究所探討之纜繩鋼種以 Improved plow steel (IPS) 改良犁鋼為主，此鋼種有著高強度與高耐疲勞之特性，為船舶常用之纜繩材料。結構分析中須輸入材料之楊氏係數與泊松比，由於海發中心提供之纜繩資料中並無 IPS 材料之楊氏係數，經查詢相關文獻資料後發現 ASTM-A1023 通用碳鋼鋼纜標準規範[2]中也僅針對 IPS 纜繩之極限負荷進行說明，如圖 11 所示，並無載明 IPS 之楊氏係數。

根據 Abdullah [3]與 Kmet 等人[4]對於高強度鋼纜之研究中可知材料設定通常皆採用普通鋼材之楊氏係數，約為 190 至 210Gpa 之間；而 Miller [5]針對鋼纜之開發應用進行解釋，其中提到 IPS 改良犁鋼在美國金屬協會(American Society for Metals 1948)的規範中規定含碳量為 0.7~0.85%，其含碳量與 SAE1078 高碳鋼相似，經查詢 SAE1078 之楊氏係數約為 200GPa，因此本研究數值模擬時將以楊氏係數 200 GPa 進行分析，IPS 改良犁鋼的泊松比則假設為 0.3。

A1023/A1023M - 09											
TABLE 12 Classification 6:19 Steel Core											
Cross Section Examples	Construction of Rope				Construction of Strand						
	Item	Quantity	Item	Quantity	Item	Quantity	Item	Quantity	Item		
	Strands	6	Wires	15 to 26							
	Outer Strands	6	Outer Wires	7 to 12							
	Layer of Strands	1	Layer of Wires	2 to 3							
Wires in Rope	90 to 156										
6:19 Seale (WRC)		Typical Examples		Number of Outer Wires							
		Rope	Strand	Total	Per Strand						
		6:19S	1-9-9	54	9						
		6:19IF	1-9-9F-10	60	10						
		6:19WS	1-6-6-6-10	60	10						
		6:19W	1-6-6-6	72	12						
		6:19F	1-6-6F-12	72	12						
6:25 Star with WRC											
Diameter	Approx. Mass		Minimum Breaking Force <sup>a</sup>				Diameter Range				
In.	[mm]	lb/lb	[kg/m]	IPS	1770	EP	1960	EEP	2160	Min.	Max.
				[ksi]	[kN]	None	[kN]	None	[kN]	in.	in.
1/4	6	0.10	0.153	170	22.7	3.40	25.1	37.7	3.28	0.250	0.250
		0.12	0.172	2.84					0.276	0.260	0.265
7/16	7	0.14	0.209	30.9	5.27	34.2	48.3	49.2	3.15	0.311	0.311
		0.18	0.265	4.58					3.24	0.272	0.272
1/2	8	0.18	0.270	46.3	7.55	69.8	8.30	79.9	3.94	0.394	0.394
		0.23	0.345	51.0					4.13	0.413	0.413
5/8	10	0.26	0.386	6.56	63.0	10.2	84.4	93.0	4.43	0.443	0.443
		0.35	0.515	8.89					4.48	0.448	0.448
3/4	11	0.35	0.526	8.89	90.7	13.3	100	11.2	4.48	0.448	0.448
		0.41	0.613	11.5					4.48	0.448	0.448
7/8	12	0.41	0.617	11.5	106	16.8	137	18.5	4.51	0.451	0.451
		0.48	0.720	12.4					4.51	0.451	0.451
1 1/8	14	0.56	0.816	14.5	124	20.8	179	22.7	4.51	0.451	0.451
		0.58	0.870	17.7					4.51	0.451	0.451
1 1/2	16	0.73	1.091	17.7	161	28.6	226	25.7	4.51	0.451	0.451
		0.80	1.180	20.8					4.51	0.451	0.451

圖 11. ASTM 針對 IPS 纜繩之規定

後續評估纜繩之疲勞壽命時需在 ABAQUS Fe-safe 中輸入 IPS 之 S-N curve。文獻[6]使用旋轉樑疲勞試驗(rotating beam wire fatigue test)方式對 IPS 進行疲勞試驗，並獲得 IPS 之 S-N curve 數據，測試所使用之機台如圖 12 所示，疲勞試驗之 S-N 曲線如圖 13 所示，圖 13 中可發現 IPS 的 S-N 曲線縱座標為實際應力與降伏應力的比值，當該比值為 38% 時即達到 IPS 的疲勞限。

此外，文獻[6]中指出 IPS 改良犁鋼的最大拉伸強度約為 2013.27 MPa，38%的疲勞限所對應之應力為 765.04 MPa，本研究對纜繩進行結構分析時，將以 2013.27MPa 作為 IPS 纜繩拉伸時之極限強度。



圖 12. 旋轉梁疲勞試驗機台

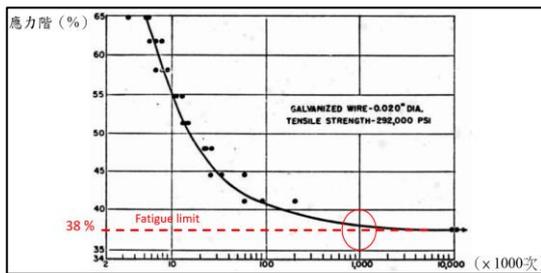


圖 13. IPS 纜繩之 S-N curve

## 2.2 SAE304 不鏽鋼

除了 IPS 改良犁鋼外，本計畫中所探討 SWR-3 纜繩，其材質為 304 不鏽鋼。圖 14 為海發中心所提供之 SWR-3 纜繩規格，其纜繩最大可承受負荷負荷達 52.06kN，而 304 不鏽鋼之抗拉強度可達 1960MPa，如圖 15 所示，本計畫將以此數據作為 304 不鏽鋼之極限負荷。

3/8 Commercial 6x37 Class Wire Rope Flexible Stainless 302/304		
Product Type	Wire Rope	
Commercial/Military	Commercial	
Flexibility	Flexible	
Construction	6x37 Class	
Core Type	WIRC	
Material	Material	Stainless
	Type	302/304
Diameter*	Inches, fraction	3/8
	Inches, decimal	.375
	Millimeters	9.525
Minimum Break Strength	Lbs.	11,700
	Kgs.	5307
Approx. Weight per 100 ft (lbs)	240	
Origin	Manufactured in USA	
Qualifying Specifications	RR-W-410, Latest Amendment	

圖 14 SWR-3 纜繩之各項規格

關於疲勞分析所需的 S-N curve，ABAQUS Fe-safe 中有內建多種材料之疲勞參數，其中也包含 304 不鏽鋼之 S-N curve，如圖 16 所示，使用者可直接於軟體中指定所需的材料，便可將數據導入疲勞分

析中。本研究使用 Excel 將 ABAQUS Fe-safe 中所內建之疲勞材料參數繪製成 S-N curve 如圖 17 所示，從圖 17 中可發現 ABAQUS 內建之 304 不鏽鋼的 S-N curve 於 273.30MPa 開始趨於平緩，表示 273.30MPa 為其疲勞限。

Nominal Tensile Strength 公稱抗拉強度					
Minimum Breaking Strength (kN) 最小破斷強度					
1570N/mm <sup>2</sup>		1770N/mm <sup>2</sup>		1960N/mm <sup>2</sup>	
FC(麻芯)	IWR/IWS(鋼芯)	FC(麻芯)	IWR/IWS(鋼芯)	FC(麻芯)	IWR/IWS(鋼芯)
11.60	12.50	13.10	14.10	14.40	15.60
16.70	18.00	18.80	20.30	20.80	22.50
22.70	24.50	25.60	27.70	28.30	30.60
29.60	32.10	33.40	36.10	37.00	40.00
37.50	40.60	42.30	45.70	46.80	50.60

圖 15. 304 不鏽鋼纜繩可承受之抗拉強度

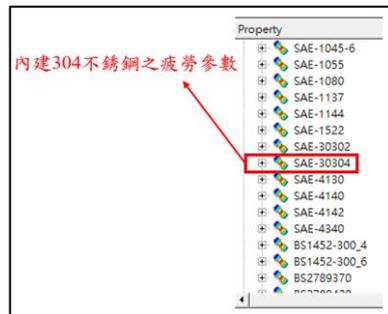


圖 16. Fe safe 內建之材料數據庫

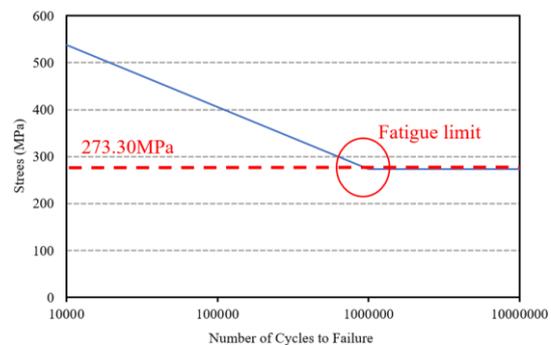


圖 17. 內建 304 不鏽鋼之 S-N curve

但後續經查閱後發現，ABAQUS 內建 304 不鏽鋼之極限斷裂強度約在 505MPa，而海發中心所提供之纜繩資料顯示 304 不鏽鋼纜繩之抗拉強度應可達 1960MPa，明顯超過內建材料之極限。本研究推測 ABAQUS 內建不鏽鋼之材料參數為 304 板材，而纜繩用的 304 不鏽鋼為硬化處理後之高強度不鏽鋼，因此不應該直接使用內建之疲勞參數進行模擬。

對於此纜繩用之 304 不鏽鋼的疲勞參數，本研究經查閱相關文獻[7]後僅找到一種斷裂強度落在

1346MPa 之 304 不鏽鋼，如圖 18 所示，其疲勞限可高達 650MPa，如圖 19 所示。本研究假設擁有 1960MPa 強度之 304 不鏽鋼應能提供更高之疲勞限，目前因為無法獲得該強度不鏽鋼之疲勞曲線，因此後續預估疲勞壽命時暫時先使用 ABAQUS 內建 304 不鏽鋼與文獻[7]之 S-N curve 進行疲勞分析。

Drawing strain ( $\epsilon$ )	Strain-induced martensite ( $\alpha'$ ) [%]	Yield strength [MPa]	Ultimate tensile strength [MPa]	Total elongation to failure [%]	Hardness $25_H$ HV
Annealed	0	267	642	79	180
0.09	8	480	752	54	192
0.238	16	810	941	28	310
0.37	20	995	1060	14	360
0.52	32	1100	1247	5	410
0.585	36	1137	1346	5	440

圖 18. 文獻[7] 304 不鏽鋼之抗拉強度

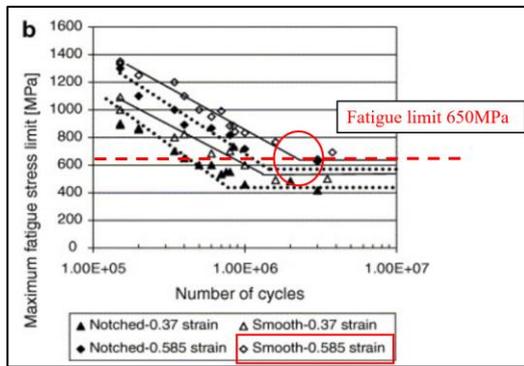


圖 19. 文獻[7] 304 不鏽鋼之 S-N curve 與疲勞限

## 分析結果討論

### 1. SWR-1 纜繩

本研究依照「機械設計遍覽」定義之極限負荷施加在纜繩上，SWR-1 纜繩材質為 IPS 改良型犁鋼，文獻中定義該材料的極限強度為 2013.27MPa，在施加極限負荷後之應力分析結果如圖 20 所示，其中，Von mises 等效應力結果為 2,168MPa，最大拉伸主軸應力結果為 1,843MPa，與文獻中所列之 IPS 改良型犁鋼強度接近。根據截面之應力分佈結果可觀察到最大應力值會發生於繩芯上，這是因為纜繩處於拉張狀態時，外圍之股繩會向內收縮擠壓並摩擦中間之鋼芯，進而使其承受較大之應力。

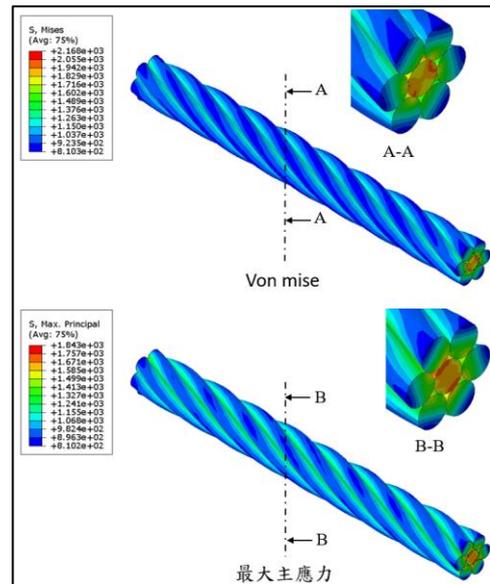


圖 20. 纜繩極限負荷之應力分佈結果

確認 SWR-1 纜繩規格、受力後的應力響應與極限強度後，本研究進一步使用數值模擬的方式驗證纜繩實際使用條件下之強度表現與疲勞壽命。

根據海發中心提供之資訊，纜繩結構實際使用條件為極限負荷搭配 5 倍安全係數，即 20%極限負荷。以 20%極限負荷重新計算纜繩的拉伸強度後獲得纜繩在該負荷作用下之最大主軸應力為 543.3MPa，如圖 21 所示。根據文獻[6]本所載，IPS 改良型犁鋼之疲勞限為 765.04MPa，該應力分析結果顯示 SWR-1 纜繩於實際使用條件下之最大應力低於疲勞限，因此本研究判斷 SWR-1 纜繩不會發生疲勞破壞，ABAQUS Fe-safe 分析結果也顯示纜繩可承受大於  $10^7$  次的反覆作用，如圖 22 所示。

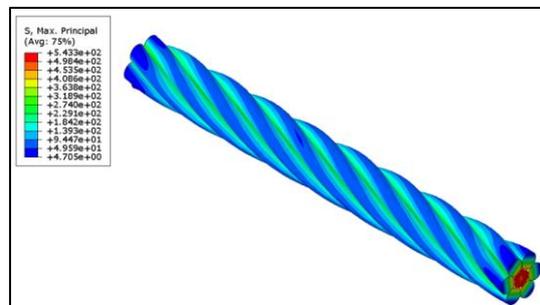


圖 21. SWR-1 纜繩 5 倍安全係數之應力分佈結果

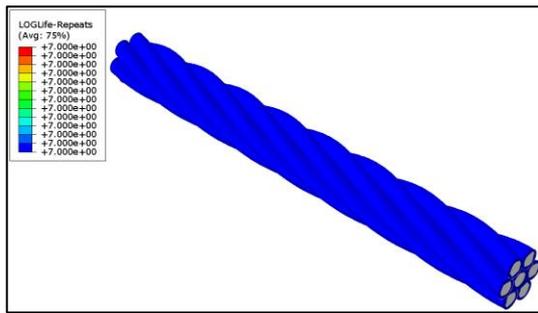


圖 22. SWR-1 纜繩 5 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

接下來本研究以 2 倍安全係數，即 50%極限負荷進行纜繩的拉伸強度分析，應力分佈結果如圖 23 所示。分析結果顯示 SWR-1 纜繩最大主軸應力值達 1,033MPa 已超過 IPS 改良型犁鋼的疲勞限，因此判定在此負荷條件下有發生疲勞的可能。疲勞分析結果如圖 24 所示，分析結果顯示纜繩可能發生疲勞之區域出現在中間的繩芯上，且僅能承受 17,139 次的反覆作用，該結果與 20%極限負荷下之差異極為顯著。

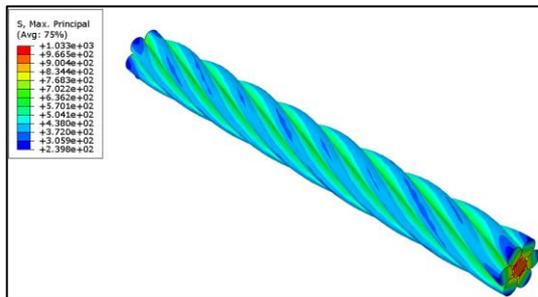


圖 23. SWR-1 纜繩 2 倍安全係數之應力分佈結果

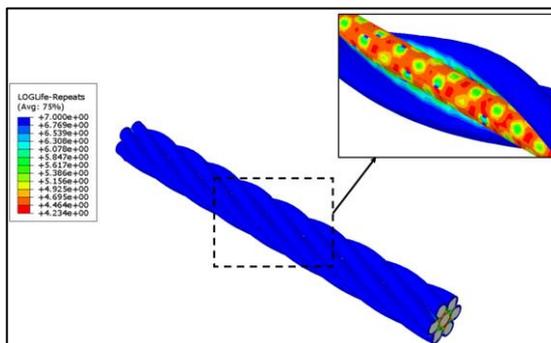


圖 24. SWR-1 纜繩 2 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

## 2. SWR-2

SWR-2 纜繩在極限負荷下之應力分析結果如圖 25 所示，其中 Von mises 等效應力為 1,825MPa MPa，最大拉伸主軸應力為 1,532MPa，低於文獻[6]所記錄之 2013.27MPa，因此判定 SWR-2 纜繩可承受極限負荷。

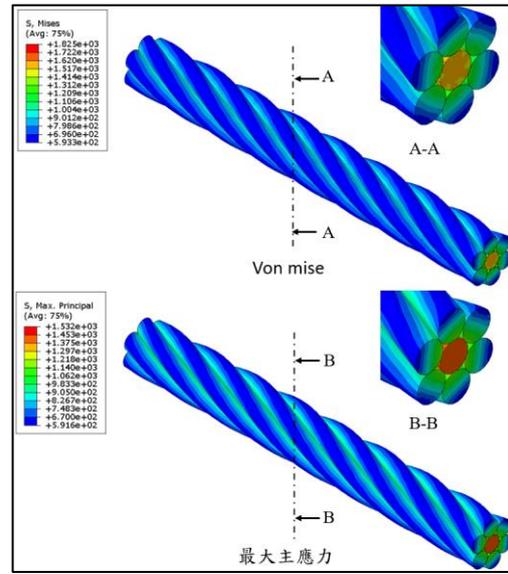


圖 25. SWR-2 纜繩極限負荷之應力分佈結果

接著以 20%極限負荷重新計算，獲得纜繩之最大主軸應力為 550.10MPa，如圖 26 所示。該應力條件低於 IPS 改良型犁鋼之疲勞限 765.04MPa，因此本研究判斷 SWR-2 纜繩不會發生疲勞破壞，ABAQUS Fe-safe 分析結果亦顯示纜繩可承受大於  $10^7$  次的反覆作用，如圖 27 所示。

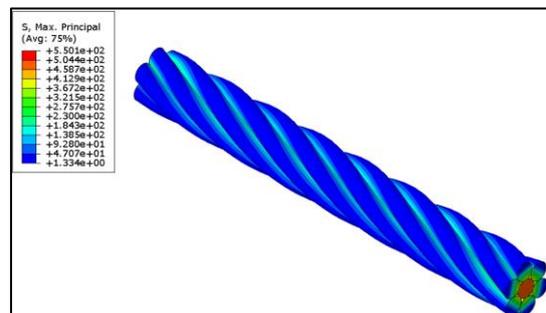


圖 26. SWR-2 纜繩 5 倍安全係數之應力分佈結果

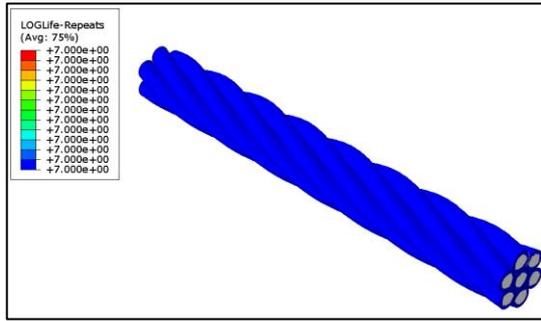


圖 27. SWR-2 纜繩 5 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

接下來本研究以 2 倍安全係數，即 50%極限負荷進行纜繩的拉伸強度分析，應力分佈結果如圖 28 所示。分析結果顯示 SWR-2 纜繩最大主軸應力值達 944.0MPa 已超過 IPS 改良型犁鋼的疲勞限，因此判定在此負荷條件下有發生疲勞的可能。疲勞分析結果如圖 29 所示，分析結果顯示纜繩可能發生疲勞之區域出現在中間的繩芯上，且僅能承受 42,953 次的反覆作用，該結果與 20%極限負荷下之差異極為顯著。

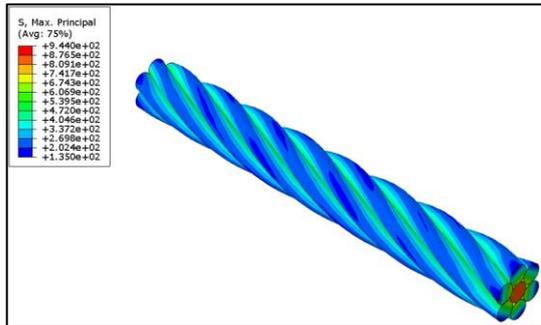


圖 28. SWR-2 纜繩 2 倍安全係數之應力分佈結果

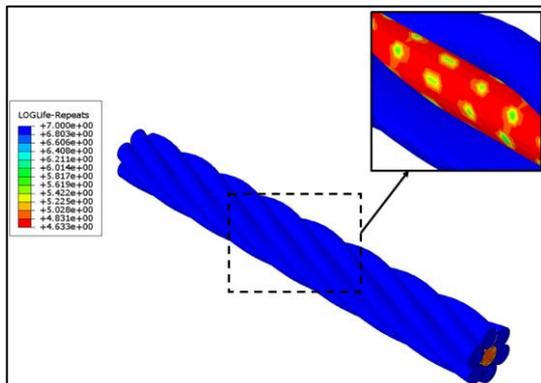


圖 29. SWR-2 纜繩 2 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

### 3. SWR-3

SWR-3 纜繩為本研究中唯一使用不鏽鋼做為材料之纜繩，極限負荷下之應力分析結果如圖 30 所示，其中 Von mises 等效應力為 1,885MPa，最大拉伸主軸應力為 1,584MPa，均低於文獻[7]所記載之最大應力。

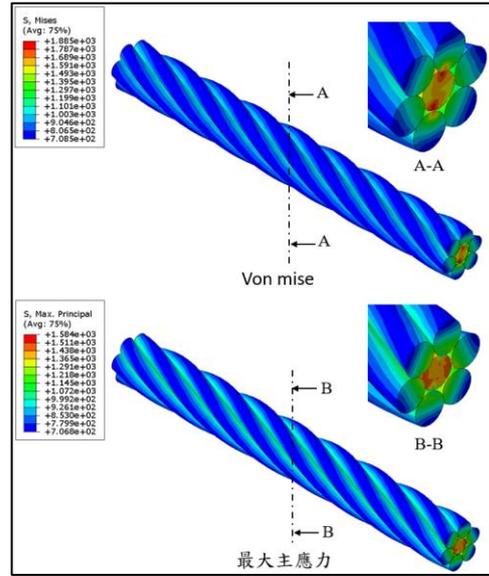


圖 30. SWR-3 纜繩極限負荷之應力分佈結果

接著以 20%極限負荷重新計算，獲得纜繩之最大主軸應力為 486.40MPa，如圖 31 所示。由於 ABAQUS Fe-safe 中有內建 304 不鏽鋼之 S-N curve 資料，因此本研究在評估 SWR-3 纜繩的使用疲勞次數時，同時參考了 ABAQUS Fe-safe 內建資料與文獻資料，並比較兩者的差異。

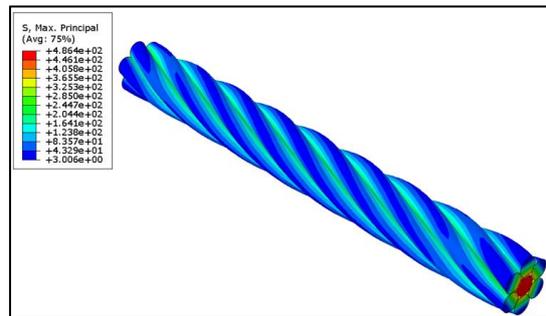


圖 31. SWR-3 纜繩 5 倍安全係數之應力分佈結果

ABAQUS Fe-safe 疲勞分析結果如圖 32 與 33 所示。圖 32 為使用內建資料庫之分析結果，內建資料定義 304 不鏽鋼之疲勞限為 273.30 MPa，但 SWR-

3 纜繩在 20%極限負荷下之最大主軸應力為 486.40MPa，因此若以此數據進行評估，一定會發生疲勞。經 ABAQUS Fe-safe 計算後顯示，SWR-3 纜繩在此受力條件下可承受 19,952 次的反覆作用。

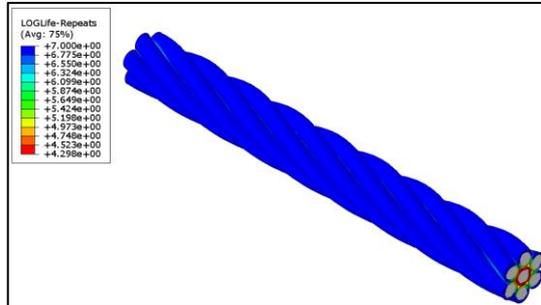


圖 32. SWR-3 纜繩 5 倍安全係數下之疲勞次數分析結果(內建)

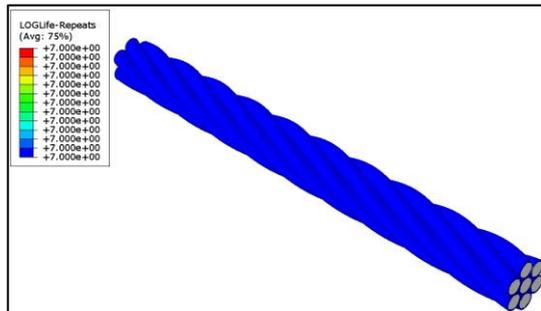


圖 33. SWR-3 纜繩 5 倍安全係數下之疲勞次數分析結果(文獻)

圖 33 為採用文獻之高強度不鏽鋼之疲勞分析結果。文獻[7]所載之高強度不鏽鋼之疲勞限可高達 650MPa，SWR-3 纜繩在 20%極限負荷下之最大主軸應力僅 486.40MPa，應力響應低於疲勞限，因此若以文獻[7]之參數為判斷依據，SWR-3 纜繩可承受大於 $10^7$ 次的反覆作用，ABAQUS Fe-safe 分析結果亦證實此一結果。

接下來本研究以 2 倍安全係數，即 50%極限負荷進行纜繩的拉伸強度分析，應力分佈結果如圖 34 所示。分析結果顯示 SWR-3 纜繩最大主軸應力值達 934.50MPa 已超過不鏽鋼的疲勞限，因此判定在此負荷條件下有發生疲勞的可能。疲勞分析結果如圖 35 所示，分析結果顯示 SWR-3 纜繩發生疲勞之區域出現在中間的繩芯上，且能承受 895,364 次的反覆作用。

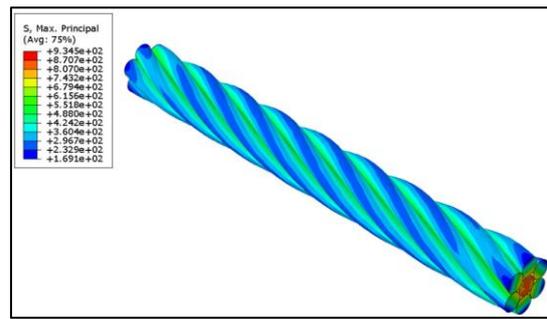


圖 34. SWR-3 纜繩 2 倍安全係數之應力分佈結果

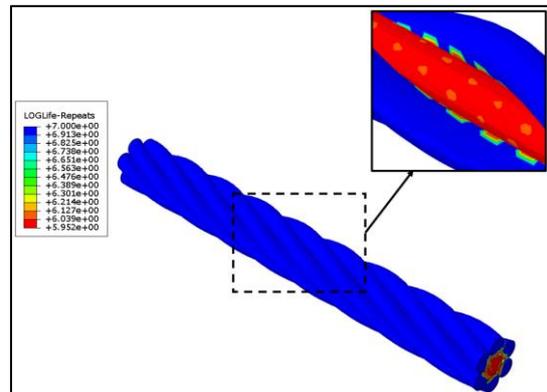


圖 35. SWR-3 纜繩 2 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

#### 4. SWR-4

SWR-4 纜繩的樣態與纏繞方向完全相同，為同規格之纜繩。在極限負荷下之應力分析結果如圖 36 所示，其中 Von mises 等效應力為 1,815MPa MPa，最大拉伸主軸應力為 1,472MPa，低於文獻[6]所記錄之 2013.27MPa，因此判定 SWR-4 纜繩可承受極限負荷。

接著以 20%極限負荷重新計算，獲得纜繩之最大主軸應力為 351.30MPa，如圖 37 所示。該應力條件低於 IPS 改良型犁鋼之疲勞限 765.04MPa，因此判斷 SWR-4 纜繩不會發生疲勞破壞，ABAQUS Fe-safe 分析結果亦顯示纜繩可承受大於 $10^7$ 次的反覆作用，如圖 38 所示。

接下來本計畫以 2 倍安全係數，即 50%極限負荷進行纜繩的拉伸強度分析，應力分佈結果如圖 39 所示。分析結果顯示 SWR-4 纜繩最大主軸應力值達 780.0MPa 已超過文獻[6]所列之 IPS 犁鋼的疲勞

限 765.04MPa，因此理論上判定在此負荷條件下有發生疲勞的可能。疲勞分析結果如圖 40 所示，分析結果顯示 SWR-4 纜繩發生疲勞之區域出現在中間的繩芯與繩股的接觸位置，且能承受 756,832 次的反覆作用。

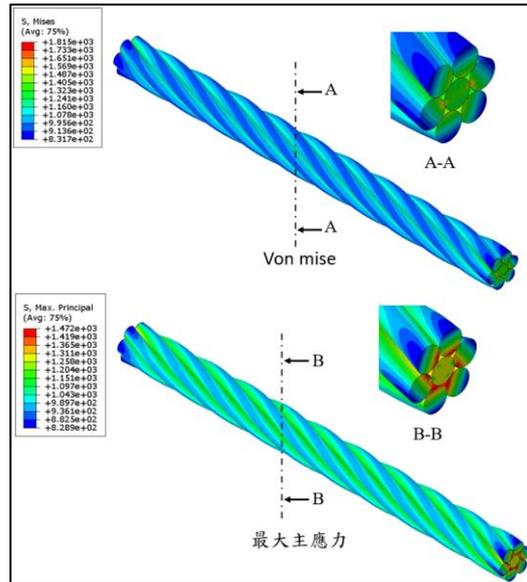


圖 36. SWR-4 纜繩極限負荷之應力分佈結果

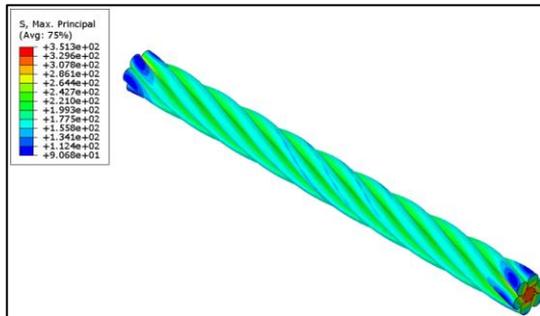


圖 37. SWR-4 纜繩 5 倍安全係數之應力分佈結果

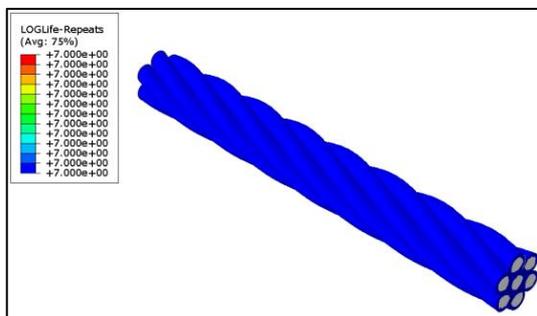


圖 38. SWR-4 纜繩 5 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

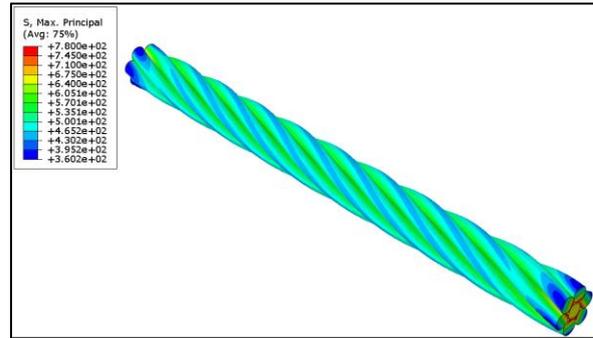


圖 39. SWR-4 纜繩 2 倍安全係數之應力分佈結果

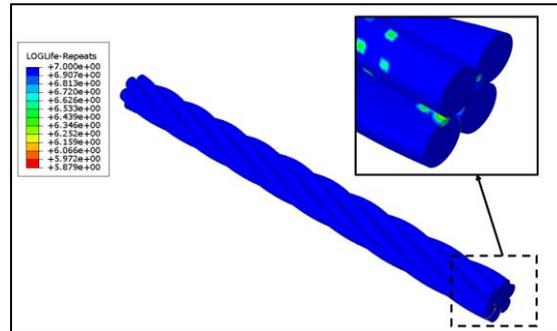


圖 40. SWR-4 纜繩 2 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

## 5. SWR-5

由於 SWR-5 纜繩中間之繩芯材質為麻繩，周圍六條股繩為 IPS 鋼纜，經文獻查詢，麻繩常用的楊氏係數為 32GPa，本研究先將繩芯材料參數調整為麻繩材質，並假設麻繩主要做為潤滑之材質，因此施加負荷時以 IPS 之極限負荷做為標準進行應力分析。

SWR-5 纜繩在極限負荷下之應力分析結果如圖 41 所示，其中 Von mises 等效應力為 1,815MPa，最大拉伸主軸應力為 1,472MPa，最大應力均出現在 IPS 鋼纜上，而麻繩上之最大應力遠低於周圍的 IPS 鋼纜應力，顯示麻繩並非主要的受力材料。

接著以 20%極限負荷重新計算，獲得 SWR-5 纜繩之最大主軸應力為 376.10MPa，且出現在周圍的 IPS 鋼纜上，如圖 42 所示。該應力條件遠低於 IPS 改良型犁鋼之疲勞限 765.04MPa，因此判斷 SWR-5 纜繩在使用過程中不會發生疲勞破壞，ABAQUS Fe-safe 分析結果亦顯示 SWR-5 纜繩可承受大於 $10^7$ 次的反覆作用，如圖 43 所示。

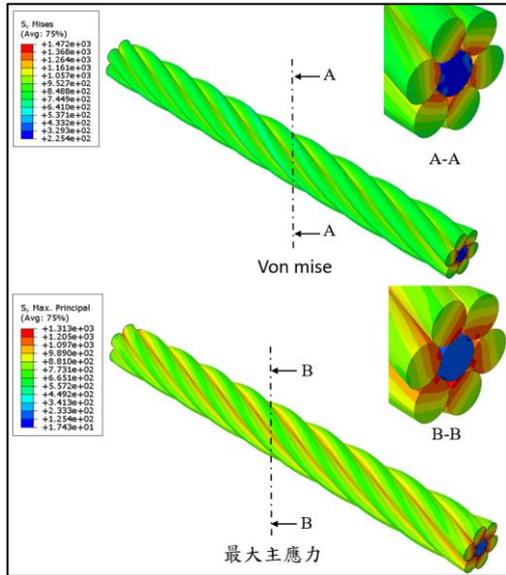


圖 41. SWR-5 纜繩極限負荷之應力分佈結果

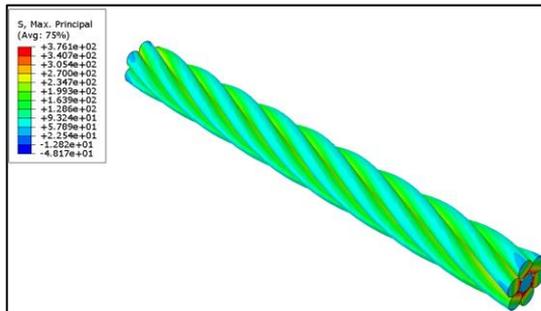


圖 42. SWR-5 纜繩 5 倍安全係數之應力分佈結果

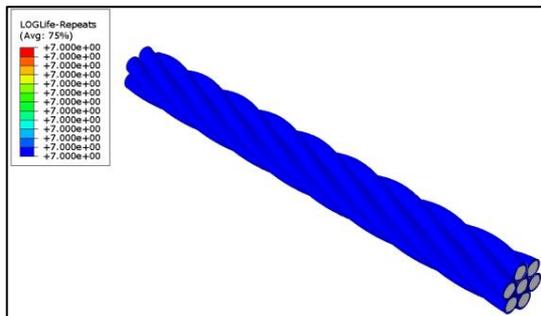


圖 43. SWR-5 纜繩 5 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

接著在考慮 2 倍安全係數下，以 50%極限負荷進行拉伸強度分析，如圖 44 所示。分析結果顯示 SWR-5 纜繩在 50%極限負荷下之最大主軸應力僅 732.50MPa，仍低於文獻[6]所列之 IPS 犁鋼的疲勞限 765.04MPa，因此理論上應該不會發生疲勞破壞。本研究將纜繩承受 50%極限負荷後之應力響應套入 ABAQUS Fe-safe 中進行分析發現，SWR-5 纜繩在

50%極限負荷下仍可承受大於 $10^7$ 次的反覆作用，模擬結果如圖所示。

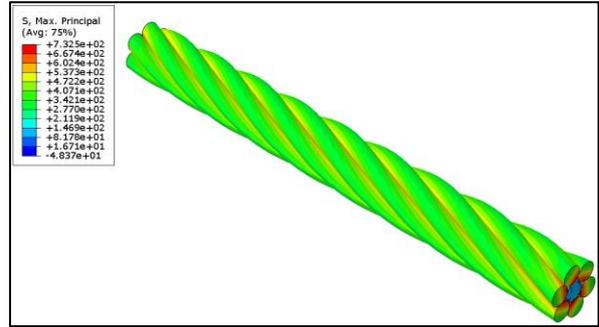


圖 44. SWR-5 纜繩 2 倍安全係數之應力分佈結果

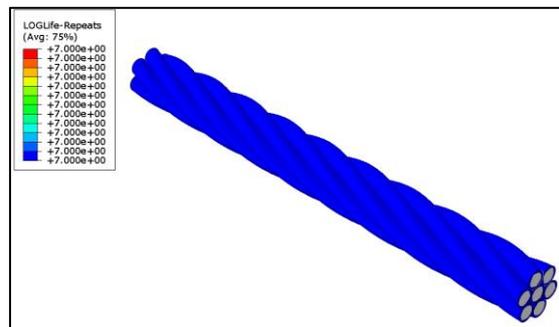


圖 45. SWR-5 纜繩 2 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

## 6. SWR-6

最後為 SWR-6 之纜繩的強度與疲勞分析。SWR-6 纜繩在極限負荷下之應力分析結果如圖 46 所示，其中 Von mises 等效應力為 1,308MPa，最大拉伸主軸應力為 1,223MPa，低於文獻[6]所記錄之 2013.27MPa，因此判定 SWR-6 纜繩可承受極限負荷。

接著以 20%極限負荷重新計算，獲得纜繩之最大主軸應力為 335.30MPa，如圖 47 所示。該應力條件低於 IPS 改良型犁鋼之疲勞限 765.04MPa，因此本計畫判斷磐石艦纜繩不會發生疲勞破壞，ABAQUS Fe-safe 分析結果亦顯示纜繩可承受大於  $10^7$  次的反覆作用，如圖 48 所示。

接著我們在考慮 2 倍安全係數下，以 50%極限負荷進行拉伸強度分析，如圖 49 所示。分析結果顯示磐石艦纜繩在 50%極限負荷下之最大主軸應力僅 668.0MPa，仍低於文獻[6]所列之 IPS 犁鋼的疲勞限

765.04MPa，因此理論上應該不會發生疲勞破壞。本計畫將纜繩承受 50%極限負荷後之應力響應套入 ABAQUS Fe-safe 中進行分析發現，磐石艦纜繩在 50%極限負荷下仍可承受大於 $10^7$ 次的反覆作用，模擬結果如圖 3.41 所示。

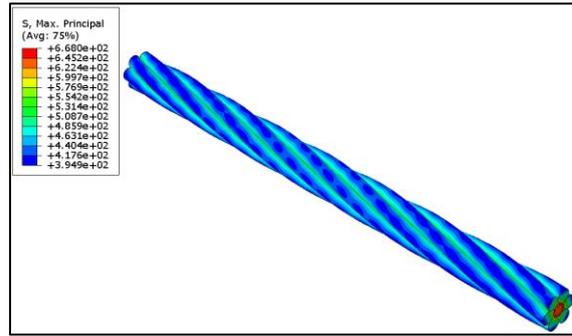


圖 49. SWR-6 纜繩 2 倍安全係數之應力分佈結果

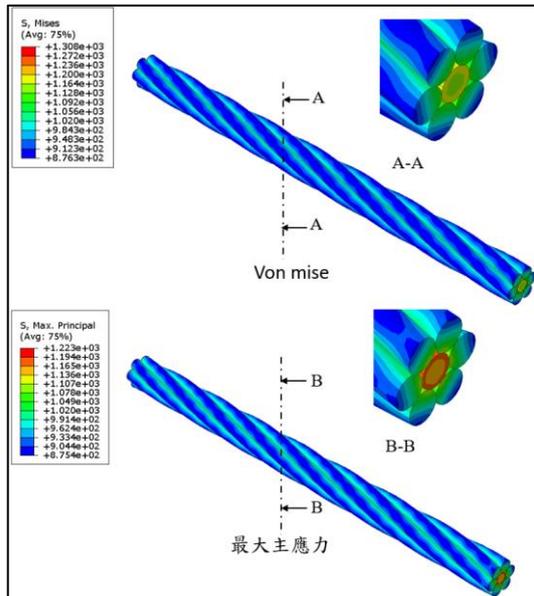


圖 46. SWR-6 纜繩極限負荷之應力分佈結果

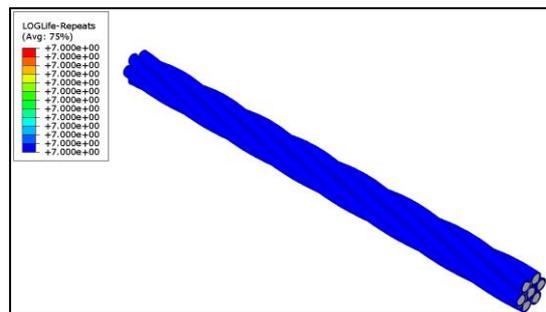


圖 50. SWR-6 纜繩 2 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

## 7. 各纜繩數據比較

表 3 綜整各纜繩之應力與疲勞分析結果，根據表 3 中可得知，IPS 改良型犁鋼之極限應力 2013.27MPa，各纜繩在極限負荷下之應力結果皆小於其值，而採用不鏽鋼材質之 SWR-3 纜繩其最大主軸應力也低於可承受之最大應力 1960MPa。

在考慮 5 倍全係數的情況下時，IPS 改良型犁鋼與不鏽鋼纜繩分別以 765.04MPa 及 650MPa 作為疲勞限之基準，本研究經應力分析後確認在最大使用負荷下的 6 型纜繩應力值均低於所屬材料之疲勞限，因此纜繩在使用過程中並不會有發生疲勞破壞之疑慮。

考量纜繩在使用過程中可能出現表面磨損，亦或是邊界支撐的不同而有「過負荷」的情況，本研究另外考慮 2 倍安全係數之負荷值進行分析，即 50%的極限負荷，分析結果中可發現除 SWR-5 與 SWR-6 纜繩外，其餘纜繩在 50%極限負荷下之最大主軸應力值皆高於疲勞限。

本研究分析係依據海發中心提供之模型尺寸

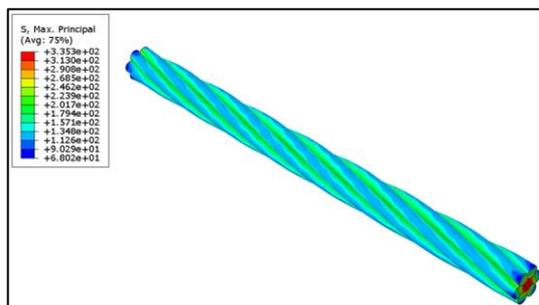


圖 47. SWR-6 纜繩 5 倍安全係數之應力分佈結果

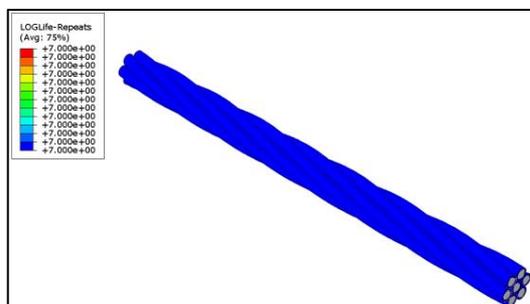


圖 48. SWR-6 纜繩 5 倍安全係數下之疲勞次數分析結果

與機械設計遍覽，搭配文獻[6]、[7]之材料機械強度進行分析。分析過程發現，除 SWR-1、SWR-2 纜繩與 SWR-3 不鏽鋼纜繩在極限負荷下的機械強度與文獻所載之數據相仿外，其他系列之纜繩在極限負荷下的應力響應均與文獻所載之數據有所差距，進而造成疲勞強度的高估。

但就 SWR-1 纜繩與 SWR-2 纜繩而言，兩者的機械強度與文獻所列數據相仿，因此其疲勞分析結果具有參考價值。本研究經疲勞分析後驗證，在現有 5 倍安全係數的使用條件下，各式纜繩並無疲勞之疑慮；若極端地考慮纜繩磨損與過負荷情況，改以 2 倍安全係數進行分析，如 SWR-1 纜繩亦能承受至少 17,139 次以上之反覆作用。

表 3. 各纜繩分析結果總表

纜繩型號	極限負荷下之最大主軸應力 (MPa)	20%負荷之最大主軸應力 (MPa)	50%負荷之最大主軸應力 (MPa)	50%負荷之疲勞次數
SWR-1	1,843	543.30	1,033.00	17,139
SWR-2	1,532	550.10	944.00	42,953
SWR-3	1,584	486.40	934.50	895,364
SWR-4	1,472	351.30	780.00	756,832
SWR-5	1,313	376.10	732.50	> 10 <sup>7</sup>
SWR-6	1,223	335.30	668.00	> 10 <sup>7</sup>

## 結論

本研究成功完成 6 型纜繩之模型建置與拉伸應力分析，確認 6 型纜繩的材料、構型尺寸均可承受極限拉伸負荷。

依據纜繩實際的使用條件與不同材質對應之 S-N 曲線進行疲勞壽命分析，分析結果顯示在極限負荷之 5 倍安全係數的安全使用範圍下，6 型纜繩均不會有發生疲勞破壞的可能性，而考量纜繩的磨損與支撐條件不同造成的「過負荷」情況下改以極限負荷之 2 倍安全係數作為負荷條件重新分析後可知，除 SWR-5 與 SWR-6 兩種纜繩設計外其餘纜繩於極端考量下皆會造成疲勞破壞。

## 參考文獻

1. Wang, D. G., Zhang, D. K., Wang, S. Q., Ge, S. R., "Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life estimation of steel wires," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 27, pp. 173-193 (2013).
2. ASTM, "Standard Specification for Stranded Carbon Steel Wire Ropes for General Purposes," A1023-02, West Conshohocken, PA, USA (2002).
3. Abdullah, A. B. M., Rice, J. A., Hamilton, H. R., Consolazio, G. R., "An investigation on stressing and breakage response of a prestressing strand using an efficient finite element model," *Engineering Structures*, Vol. 123, pp. 213-224 (2016).
4. Kmet, S., Stanova, E., Fedorko, G., Fabian, M., Brodniansky, J., "Experimental investigation and finite element analysis of a four-layered spiral strand bent over a curved support," *Engineering Structures*, Vol. 57, pp. 475-483 (2013).
5. Miller, B. A., "Wire Ropes," *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Vol. 2, pp. 1-10 (2004).
6. Naval applied science lab brooklyn ny., *Fatigue properties of uncoated and galvanized improved plow steel wires*, Brooklyn, New York, USA (1967).
7. Topic, M., Tait, R.B., Allen, C., "The fatigue behavior of metastable (AISI-304) austenitic stainless steel wires," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 656-665 (2007).