

浮動式風電平台之繫纜姿態感測系統研製

蔡秉穎^{1*} 沈聖智¹ 王宇軒¹ 許煜亮² 楊瑞源³ 陳信宏⁴ 許泰文⁵

¹國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

²國立中山大學 機械與機電工程學系

³國立成功大學 水利及海洋工程學系

⁴國立成功大學 水工試驗所

⁵國立臺灣海洋大學 河海工程學系

關鍵詞: 慣性感測器、繫纜、浮動式平台、張力估測、姿態估測

國科會計畫編號: NSTC 112-2218-E-019-001-

摘要

本研究研製浮動式風電平台之繫纜姿態感測系統，係整合高敏度慣性感測元件、張力估測演算法和姿態估測演算法以量測繫纜於導纜孔至錨碇點的張力與姿態變化，並利用Orcina OrcaFlex進行數值模擬計算，以驗證張力數值合理性；再設計可即時觀察繫纜受波浪作用之姿態變化的人機介面，以提供即時張力與姿態變化等決策參數。其中，繫纜姿態感測系統由高敏度慣性感測器、控制器區域網路(CAN Bus)和微控制器組成，並等距佈置在繫纜上，可將繫纜上的張力與姿態訊號傳輸至水上人機介面以分析繫纜的張力變化與彎曲情況。在這項研究中透過設計繫纜姿態感測系統來掌握繫纜受力與彎曲狀況，使得深海繫纜的監控技術由傳統數值參數提升為可視化之圖像，讓操作人員能更直覺地掌握繫纜受波浪作用的運動行為，並將參數做為相關決策之參考。

^{1*} 聯絡作者 蔡秉穎 (p16114268@gs.ncku.edu.tw)

前言

由於臺灣位於颱風和地震頻繁發生的地區，浮動式平台繫纜常因長期受風浪作用而遭受損壞。這種不斷的自然災害威脅著平台的穩定性，需採取有效措施來強化其結構，以應對這些極端天氣條件，在考慮到颱風和地震可能造成的破壞下，必須不斷地改進和加強繫纜系統，以確保浮動式平台的安全性和可靠性。透過開發感測監控系統、數值模擬方法並應用設計之人機介面以即時觀察深海繫纜受波浪作用之姿態變化與彎曲情況並同時分析繫纜之張力大小。

錨碇系統包括水面上之浮體(Buoy)、繫纜(Chain)及錨碇塊(Anchor block)三部份，其中浮體的受力包括：水面上之風力、水面之波浪力、及水面下之流體力等合力和繫纜點之張力，而繫纜的受力則只考慮其水中重量的影響，因此最大的張力將發生在浮體繫纜之連接點。本研究之海域繫纜系統分析，主要關鍵在浮體本身水面上下之受力和繫纜間張力之互制作用(Interaction Forces)，在技術開發上使用半經驗公式[1-2]，分別求各受力分量再求合力或以模型試驗量測在波流作用下，浮體結構繫纜之受力[3-4]。另外WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) 的Grosenbaugh針對深海繫纜SPM，特別提出Inversecatenary Mooring 理論[5]，但所考慮的受力主要以浮體起伏運動為主。再參考研究者Maria I. et al. 中提及繫纜系統主要從幾何外型與材料上大致可分為兩種形式[6]，分別為懸鏈式(Catenary)繫纜系統與張緊式(Taut Leg)繫纜系統，因由於臺灣潛力場址之水深大約落於50~100米之間，屬淺水海域，如針對懸鏈式繫纜進行分析，其繫纜回復力較深水條件敏感，變化幅度較大，當繫纜觸地點之瞬間水平速度大於迎波的波速時，繫纜易發生瞬荷載(Snap Load)，此應力對於結構物的運動產生一定程度上的影響，因此於淺水條件中設計懸鏈式繫纜須考慮各種環境條件的負荷，以達到最佳的設計結果。

懸鏈式繫纜系統主要由鐵鏈構成，透過一長串的鐵鏈連接錨碇與浮動式平台，在重力作用下會呈現自由懸掛線的形狀，除了在水中的懸鏈段，懸鏈式繫纜系統會有一部分鐵鏈平躺於海床上，稱為觸地段，因此此類型的繫纜方式會使錨碇點受到水平方向之拉力。懸鏈式繫纜系統主要是依靠懸浮在水中鐵鏈本身的重量來提供平台回復力，通常使用懸垂理論來進行設計。根據不同的條件需求，懸鏈式繫纜系統可以搭配重塊或浮筒，重塊可以增加繫纜重量，提高系統回復力，浮筒則可以減小繫纜頂部的張力。本研究將水下感測技術、繫纜姿態估測演算法及繫纜張力估測演算法結合以量測懸鏈式繫纜的姿態與張力變化，並將其即時顯示於人機介面上，使得操作人員可在岸上即時監控並觀察繫纜於水下之運動變化及其受力情況。

繫纜姿態感測系統建置

為能夠準確量測繫纜在海下三維空間中受波浪作用的姿態與張力變化，藉由繫纜姿態感測裝置量測加速度、角速度及磁力等運動變化訊號，透過繫纜姿態估測演算法及繫纜張力估測演算法加以估測繫纜之姿

態與張力狀況，並設計可即時遠端監視人機介面來加以建置一套繫纜姿態感測系統。

1. 繫纜姿態感測裝置

本研究整合微控制器(Arduino Pro Mini)、控制器區域網路(Controller Area Network-Bus, CAN-Bus)模組及慣性感測模組(BNO055)來實現繫纜姿態感測裝置，並將整個繫纜姿態感測電路封於塑鋼材料之防水盒中(84.3 × 79.2 × 55.3 mm³)，亦使用防水接頭作為防水盒間之連接，使整體達到防水效果，如圖1所示。此外，因試驗設計水深為2.04 m，利用四組繫纜姿態感測裝置以0.5 m間距置放於繫纜上的四個節點，使各感測裝置於極端作用下皆可浮於水中。

1.1 微控制器

微控制器採用Arduino公司研發製造之開放原始碼單晶片微控制器Arduino Pro Mini，內含低功耗、高性能之ATmega328p微處理器，其為8-bit AVR架構之CPU，支援多種通訊介面類型，其中包含了通用非同步收發傳輸(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)、通用串列匯流排(Universal Serial Bus, USB)、序列周邊介面(Serial Peripheral Interface, SPI)及內部積體電路(Inter-integrated Circuit, I²C)。

1.2 控制區域網路模組

本研究為考量需長距離訊號傳輸，選用型號為MCP2515的控制區域網路模組，其具有高度的彈性調整能力，無須在軟、硬體上修正或調整，即可在既有網路中新增工作站，並可調整訊號傳遞的優先順序，重要性較高的訊號在傳遞過程中，擁有優先傳遞的權力。根據傳輸速度與距離的關係設定，當傳輸速度為1 Mbps時，傳輸距離為40公尺；而當傳輸速度為5 kbps時，則能達到最遠10公里的傳輸距離。

1.3 慣性感測模組

本研究採用Bosch Sensortec公司所開發的BNO055慣性感測模組，其具有三軸加速度計、三軸陀螺儀和三軸磁力計等核心功能，使其能夠精確地測量繫纜在水下三維空間中的運動變化，包括加速度、角速度和磁場變化量等關鍵參數。此感測器於精度方面，加速度計為±0.3% FSR (Full-Scale Range)、陀螺儀為±0.5% FS (Full Scale)、磁力計為±0.3 mT (millitesla)。此外，此模組還具有高度可靠性和穩定性。

由微控制器透過I²C通訊方式讀取慣性感測模組感測之各節點加速度、角速度及磁場變化量，並透過控制器區域網路模組之CAN_H和CAN_L達成各節點間的訊號傳輸，然而將各節點運動訊號傳送至最接近水面之繫纜姿態感測裝置，並由其傳送至繫纜遠端監視人機介面，以達到實時監測繫纜姿態角度與張力之變化，繫纜姿態感測裝置之訊號傳輸架構圖如圖2所示。

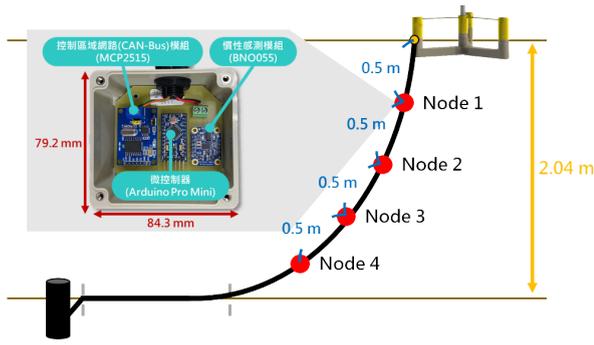


圖1 繫纜姿態感測裝置實體圖

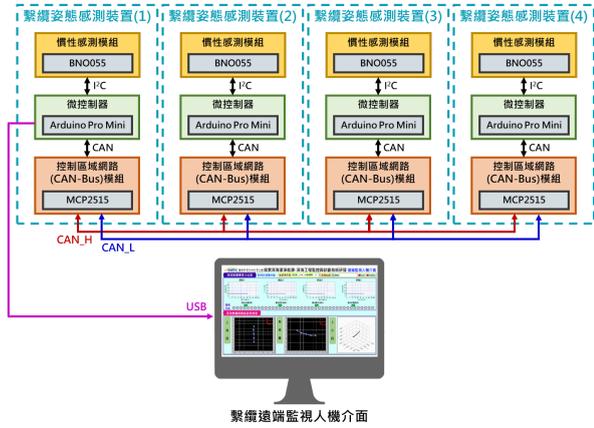


圖2 繫纜姿態感測裝置訊號傳輸架構圖

2. 繫纜張力估測演算法

利用繫纜姿態感測裝置量測到各節點之加速度訊號，經由訊號前處理後，利用牛頓第二運動定律並帶入慣性感測器量測之軸向加速度可計算出各節點所受到之軸向力(式1)，然而，參考研究者Z.X. Zhu et al.文中[7]提及必須考慮到繫纜在水下三維空間下所受到的各種外力，如浮力與重力(式2)、流體阻力(式3)等外力作用，並將這些作用力之方向轉換成與繫纜軸向力同向，即可得出繫纜之動態方程式(式4)，計算出繫纜所受真實之張力。

$$F_i^- = (M_i + \mu) \cdot a_i^- \quad (1)$$

式中， F_i^- 為繫纜第*i*個節點所受之合力， M_i 為繫纜第*i*個節點之質量， μ 為附加質量， a_i^- 為繫纜第*i*個節點之總加速度。

$$B_i^- + G_i^- = \rho \cdot g \cdot V_i - M_i \cdot g \quad (2)$$

式中， ρ 為流體密度， g 為重力加速度， V_i 為繫纜第*i*個節點之體積。

$$F_{Di}^- = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_i \cdot v_i^2 \quad (3)$$

式中， C_d 為繫纜之流體阻力係數， A_i 為繫纜第*i*個節點受流體阻力之截面積大小， v_i 為深海繫纜第*i*個節點相對於周圍流體之速度。

$$\Delta T_i^- = F_i^- - B_i^- - G_i^- - F_{Di}^- \quad (4)$$

3. 繫纜姿態估測演算法

當繫纜姿態感測裝置量測到各節點之加速度、角速度及磁力等運動姿態變化訊號經由低通濾波器將高頻雜訊濾除後，可得到感測器座標系(b)上的加速度訊號(a_b)、角速度訊號(ω_b)及磁力訊號(m_b)。一般而言，繫纜彎曲時所產生的運動姿態角度，可以利用陀螺儀所量測到的角速度訊號(ω_b)經由一次積分獲得；然而，陀螺儀本身所產生的訊號飄移誤差會透過積分程序而隨著時間增加而快速地累積，嚴重造成運動姿態估測的失真。因此，本研究使用擴展式卡爾曼濾波器(Extended Kalman Filter, EKF)來加以融合加速度訊號(a_b)、角速度訊號(ω_b)及磁力訊號(m_b)等感測資訊以降低繫纜運動姿態估測時的積分誤差，進而獲得準確的繫纜運動姿態。

以四元數表示之姿態定義為狀態轉移方程式之狀態變數(x)，利用陀螺儀現在時間點(t)所感測之角速度(ω_t)及上一個時間點($t-1$)更新後之姿態角(x_{t-1})建立一狀態轉移方程式，如式5所示。

$$\hat{x}_t = A_t \hat{x}_{t-1} + B_{t-1} \delta \omega_t \quad (5)$$

式中， $\hat{x}_t = [\hat{q}_{0,t}, \hat{q}_{1,t}, \hat{q}_{2,t}, \hat{q}_{3,t}]^T$ 為現在時間點預測之狀態， $A_t = I_{4 \times 4} + \frac{1}{2} \Omega(\omega_t) \Delta t$ 為現在時間點的狀態轉移矩陣， $B_{t-1} = \frac{\partial A_t \hat{x}_{t-1}}{\partial \delta \omega_t}$ 為上一個時間點之狀態雜訊係數矩陣， $\delta \omega_t = [\delta \omega_{x,t}, \delta \omega_{y,t}, \delta \omega_{z,t}]^T$ 為現在時間點的角速度白雜訊。接著，便可預測現在時間點之狀態誤差共變異數矩陣 \hat{P}_t (式6)。

$$\hat{P}_t = A_t \hat{P}_{t-1} A_t^T + B_{t-1} Q B_{t-1}^T \quad (6)$$

式中， \hat{P}_{t-1} 為上一個時間點更新後之狀態誤差共變異數矩陣， $Q = E[\delta \omega \delta \omega^T]$ 為角速度雜訊共變異數矩陣。

由於角速度所產生之誤差將會隨時間增加而累積；因此，必須透過觀測量(z_t)對預測後的狀態進行更新，在此將觀測量定義為加速度與磁力值，並建立一磁北觀測方程式對角速度所預測之姿態(\hat{x}_t)進行狀態更新，如式(7)所示。

$$z_t^h = H_t \hat{x}_t + \delta z_t \quad (7)$$

式中, H_t 為現在時間點之磁北觀測矩陣,

$\hat{x}_t = [\hat{q}_{0,t}, \hat{q}_{1,t}, \hat{q}_{2,t}, \hat{q}_{3,t}]^T$ 為現在時間點所預測之狀態變數, δz_t 為現在時間點的加速度或磁力值之白雜訊,

z_t^h 為現在時間點的預測觀測量。接著, 便可計算現在時間點的磁北更新卡爾曼增益(K_t), 如式(8)所示。最後, 即可利用磁北更新卡爾曼增益對所預測之狀態及其狀態誤差共變異數矩陣進行狀態更新, 如式(9)及式(10)所示。

$$K_t = \hat{P}_t H_t^T (H_t \hat{P}_t H_t^T + R/r_c)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{x}_t' = \hat{x}_t + K_t (z_t^h - z_t) \quad (9)$$

$$\hat{P}_t' = (I_{4 \times 4} - K_t H_t) \hat{P}_t \quad (10)$$

式中, $R = E[\delta z \delta z^T]$ 為觀測量雜訊共變異數矩陣, 當觀測量為加速度時, R 為重力雜訊共變異數矩陣(R_a); 而若觀測量為磁力值時, R 即為磁北雜訊共變異數矩陣(R_m), z_t 為現在時間點的磁北實際觀測量。

4. 繫纜遠端監視人機介面

本研究使用LabVIEW 2022設計繫纜遠端監視人機介面, 如圖3所示, 該人機介面使操作人員可於岸上透過佈置於繫纜不同節點上的繫纜姿態感測裝置以即時偵測繫纜的運動姿態與計算繫纜張力值大小, 進而實現遠端即時監視繫纜之姿態與張力變化。在繫纜遠端監視人機介面設計上, 上半部份呈現節點1到節點4受到之張力變化圖, 即時顯示經由各個節點上繫纜姿態感測裝置量測到的繫纜節點加速度訊號, 透過繫纜張力估測演算法所估測到的張力變化, 並藉由圖示及數值方式即時顯示; 而下半部份為繫纜運動姿態變化模擬圖, 其中分為上視圖、側視圖及立體3D圖。藉由繫纜姿態感測裝置於各個節點所量測之繫纜加速度、角速度及磁力等運動姿態變化訊號, 透過繫纜姿態估測演算法計算繫纜運動姿態角, 並由該角度計算各節點間之相對位置後繪製成上視圖、側視圖及立體3D圖, 使操作人員可以更直觀的方式判斷目前繫纜的姿態變化及彎曲狀況。

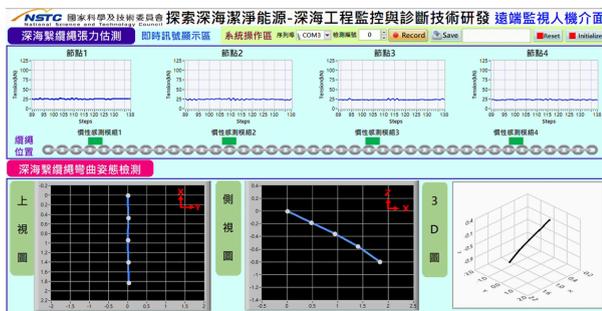


圖3 繫纜遠端監視人機介面

試驗設計

於國立成功大學水工試驗所的大型斷面試驗水槽進行繫纜縮尺模型試驗, 考慮試驗環境將繫纜原型及波浪參數進行縮尺, 在不失模型與原型之相似性下進行試驗。此外, 利用Orcina OrcaFlex進行數值模擬計算, 以驗證張力數值合理性。

1. 試驗配置

本研究採用OC4 DeepCWind半潛式平台作為浮台原型[8]且模擬水深為100 m。考量場地、試驗設備、模型等因素, 試驗縮尺比例採用1/49, 並以福祿數為主導的無因次參數, 將試驗的相關物理參數進行縮尺。因此, 試驗水位為2.04 m, 為了最大程度量測繫纜之張力變化, 且考慮各感測裝置於極端作用下皆可浮於水中, 繫纜姿態感測裝置以間距0.5 m配置於繫纜上, 繫纜姿態感測裝置配置示意圖與實體圖如圖4及圖5所示。

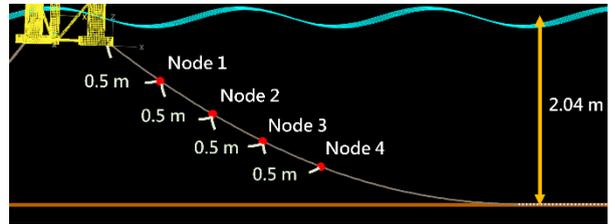


圖4 繫纜姿態感測裝置配置示意圖

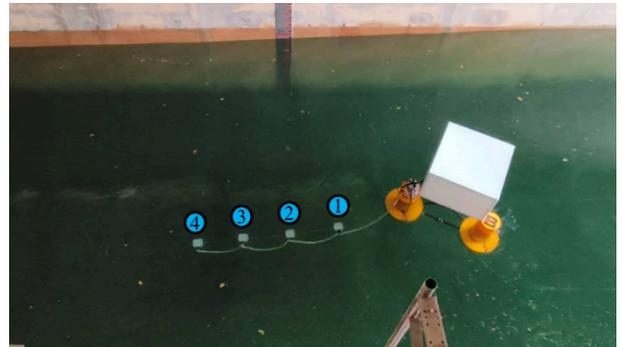


圖5 繫纜姿態感測裝置配置實體圖

縮尺模型試驗於國立成功大學水工試驗所執行, 針對繫纜姿態與張力估測試驗進行探討與實驗, 藉由浮動式平台模型、縮尺繫纜系統與相關儀器設備, 進行規則波試驗與不規則波試驗, 進而量測繫纜姿態與張力變化。試驗場地及相關儀器設備介紹如下:

1.1 大型斷面試驗水槽

於水工試驗所大型斷面試驗水槽進行縮尺模型試驗, 如圖6所示, 該水槽長度300 m、寬度5 m及深度5.2 m, 且水槽消波方式採用漸變段坡度1/100及1/20兩個緩坡結合進行消波。



圖6 大型斷面試驗水槽

1.2 造波機

水槽一端備有一部平推式乾背不規則造波機 (Dry-back system, Piston type), 如圖7所示, 造波板寬度5 m、高度5.2 m, 造波板運動由電腦控制之伺服機構驅動, 且配置主動吸收反射波功能(Active Reflection Compensation system)。於3 m水深下, 波浪週期2.5秒~4.3秒之範圍內可造出最大波高1 m之不規則波。



圖7 平推式乾背不規則造波機

2. 量測項目

試驗將針對繫纜張力進行探討與分析, 同時觀察不同試驗條件下之繫纜姿態變化。量測項目依試次內容不同分為以下兩個部分:

2.1 規則波試驗

進行固定浪向(0°)、12組規則波的造波試驗, 如表1所示, 縮尺試驗波高為0.1 m與0.2 m、週期由1.14 s至4.28 s變化。在試驗過程中, 對繫纜之姿態變化進行測量, 並估算各節點的張力值大小。

表1 規則波試次表

規則波試次表		
	縮尺試驗	原型尺寸
浪向(°)	0	0
波高(m)	0.1	4.9
	0.2	9.8
週期(s)	1.14	8
	2.00	14
	2.86	20
	3.71	25
	4.00	28
	4.28	30

2.2 不規則波試驗

根據往昔經驗資料給定1年與50年颱風回歸期海況條件[9], 縮尺試驗進行固定浪向(0°)、2組海況試驗, 如表2所示, 不規則波採用Jonswap波譜, $\gamma=2.08$, 特徵波高分別為0.09 m與0.24 m, 尖峰波週期分別為1.17 s與1.97 m。在試驗過程中, 對繫纜之姿態變化進行測量, 並估算各節點的張力值大小。

表2 不規則波試次表

不規則波試次表				
	縮尺試驗		原型尺寸	
	特徵波高(m)	尖峰波週期(s)	特徵波高(m)	尖峰波週期(s)
1年颱風回歸期	0.09	1.17	4.2	8.2
50年颱風回歸期	0.24	1.97	11.8	13.8

結果與討論

1. 規則波試次

1.1 Orcina OrcaFlex數值模擬

於OrcaFlex內以原型尺寸之OC4 DeepCWind半潛式平台與繫纜進行模擬, 建模完成並設定水深後, 以全尺寸波高分別為4.9 m與9.8 m且不同週期之規則波波浪參數(表1)輸入至OrcaFlex, 經計算後可獲得各節點之張力數值模擬結果。由於規則波下之各節點數據呈現穩定且有規則性, 因此藉由計算其RMS (Root Mean Square)值作為該規則波的數據象徵, 而將該象徵整理繪圖後如圖8與圖9所示。由這兩張圖可發現, 各節點的張力隨節點順序增加而呈現遞減的趨勢, 同時亦可觀察到隨著波浪的週期增加, 整體的張力趨勢亦隨之增加。

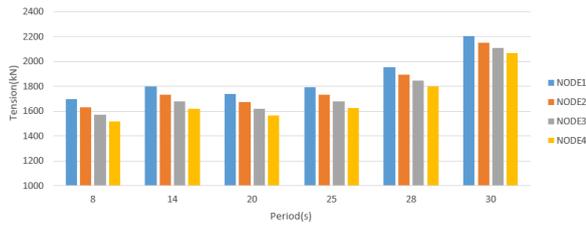


圖8 波高4.9 m之規則波數值模擬RMS結果

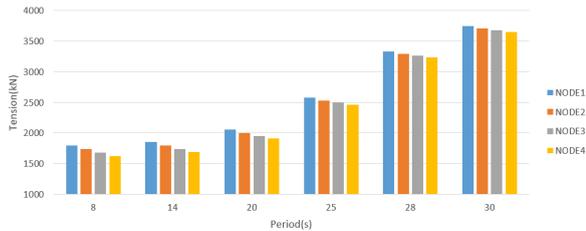


圖9 波高9.8 m之規則波數值模擬RMS結果

1.2 繫纜張力估測試驗

在水下試驗方面，使用縮尺試驗之波浪參數(表1)進行實體造波模擬試驗。然而，將繫纜姿態感測裝置量測的各節點張力變化圖放大為原型尺寸比例後，藉由計算其RMS值並將其整理繪圖後如圖10與圖11所示。由這兩張RMS結果圖可觀察到，當週期增加而整體之張力趨勢呈現遞減狀況，結果明顯與數值模擬(圖8及圖9)相反，推測因繫纜張力估測試驗主要由加速度值估測其繫纜節點之張力，致使當週期較小時因波浪密集容易使前方波浪之反射波與後方波浪疊加，導致短時間內浮動式平台加速度變化大，造成繫纜各節點加速度變化大，故估測之節點張力值較大；反觀，當週期較大時因波浪疏散使浮動式平台加速度變化小，造成繫纜各節點加速度變化小，使得估測之節點張力值較小。另外，觀察各單一波高與週期之試驗中各節點間張力差距並無如數值模擬結果皆呈現依節點順序而遞減，可能為繫纜姿態感測裝置量測訊號時有些許誤差，經數據放大為原型尺寸時而將誤差放大。

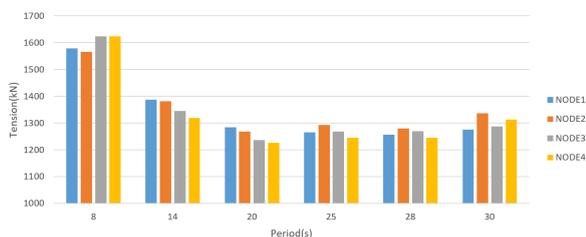


圖10 波高4.9 m之規則波張力估測試驗RMS結果

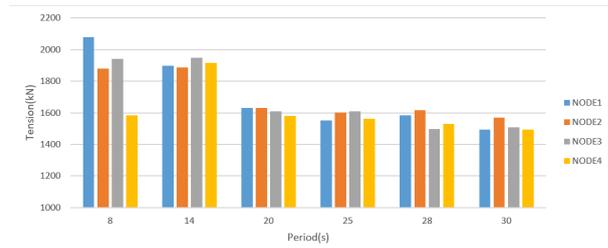


圖11 波高9.8 m之規則波張力估測試驗RMS結果

2. 不規則波試次

於不規則波試次下較不易以時序列比對，因此本研究僅針對張力響應範圍進行比對，並比較各節點間RMS是否合理。在1年颱風回歸期海況試驗，使用縮尺後之波浪參數(表2)進行實體模擬試驗。將試驗結果的各節點張力變化圖放大為原型尺寸比例後，藉由計算其RMS值並將其整理繪圖後如圖12所示。其中，各節點承受的張力RMS大小依序為1224 kN、1197 kN、1256 kN、1226 kN，並未呈現數值模擬之依序遞減結果，而各節點與數值模擬間之誤差值依序為27.9%、27.8%、20.3%、19.3%，此情況可能為感測裝置的防水盒內部保留一定量的空氣，導致深海繫纜在各節點處產生額外的浮力。浮力的提高使得深海繫纜失去了部分自身的重量，進而減輕了向下的重力。由於重力降低，繫纜所受之總張力也相應地降低。

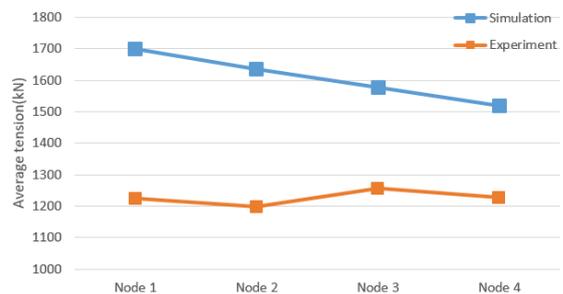


圖12 1年颱風回歸期海況試驗RMS結果

在50年颱風回歸期海況試驗，使用縮尺後之波浪參數(表2)進行實體模擬試驗。將試驗結果的各節點張力變化圖放大為原型尺寸比例後，藉由計算其RMS值並將其整理繪圖後如圖13所示。其中，各節點承受的RMS大小依序為1516 kN、1484 kN、1474 kN、1457 kN，呈現似數值模擬之遞減結果，而各節點與數值模擬間之誤差值依序為13.5%、12.1%、9.6%、7.4%。

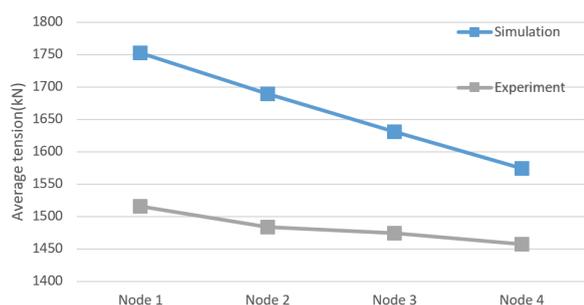


圖13 50年颱風回歸期海況試驗RMS結果

結論

本研究利用繫纜姿態感測系統在海下三維空間中能夠有效地追蹤繫纜的運動姿態角度和彎曲變化，並藉由遠端監視人機介面呈現估算出之彎曲狀況及張力值變化圖。於水下縮尺試驗估測各節點每秒之張力變化後，藉由Orcina OrcaFlex數值模擬與實際水下試驗進行各節點之張力值比較，在1年颱風回歸期下各節點張力值之最大誤差為27.9%，另在50年颱風回歸期下各節點張力值之最大誤差為13.5%。誤差推測為繫纜姿態感測裝置內部留有空氣導致繫纜節點浮力提高，進而使張力值誤差提高，亦或是數據經放大為原型尺寸時而將誤差放大。在往後試驗將探討如何補償及校正感測裝置之配重及相對應之解決方法。

致謝

本論文為國家科學及技術委員會112年度科技專案計畫【探索深海潔淨能源】(計畫編號 NSTC 112-2218-E-019-001-)經費補助，特此致謝。

參考文獻

1. 林泰乙, 高建彰, 黃兆洋, “彰化近岸海域之潮汐活動與海岸作用”, 第九屆水利工程研討會論文集, pp. 555-567 (1997).
2. 呂學信, 俞克儉, “海洋牧場工程技術之研發-箱網結構設計與分析之實務研究”, 第三屆水下技術研討會論文集, pp. H16-H23 (2001).
3. Bureau Veritas, “Ariane7 state-of-the-art mooring analysis software,” BV Software Arianeeducation & Research Version (2021).
4. Berteaux, H. O., “Buoy engineering,” John Wiley & Sons, Inc., pp. 97-109 (1976).
5. S. M. Han and M. A. Grosenbaugh, “On the Design of Single-Point Cable-Linked Moorings for Ocean Observatories,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 31, no. 3, pp. 585-598 (2006).
6. Maria, I., Mattias, L., Siobhan, D., Friedemann, B., Denis, M., Jose, L., D., Rubén, D., V., Tim, H., Lizet, R., Sabina, P., Climent, M., Pau, T., “Review of the state of the art of mooring and anchoring designs,” technical challenges and identification of relevant DLCs (2020).

7. Z.X. Zhu, Y. Yin, H.L. Shen, “Dynamics properties of a deep-water hybrid mooring line,” Journal of Harbin Engineering University, vol. 38, pp. 13-19 (2017).
8. Robertson, A., Jonkman, J., Masciola, M., Song, H., Goupee, A., Coulling, A., & Luan, C. “Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4,” (2014).
9. 趙偉廷, 楊智傑, “台灣離岸風場於極端氣候條件下之極端波浪特性探討”, 第42屆海洋工程研討會 (2020)

Design and fabrication a Measurement System of Mooring Orientations for Offshore Wind Power Floating Platform

B.-Y. Tsai¹ S.-C. Shen¹ Y.-H. Wang¹ Y.-L. Hsu² R.-Y. Yang³ H.-H. Chen⁴ T.-W. Hsu⁵

¹Department of Naval Architecture and Marine Engineering, National Cheng Kung University

²Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering, National Sun Yat-sen University

³Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

⁴Department of Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

⁵Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

Keywords: Inertial sensor, Mooring cable, Floating platform, Tension estimation, Attitude estimation

ABSTRACT

This study develops a floating platform mooring cable attitude sensing system, which integrates high-sensitivity inertial sensing system, tension estimation algorithms and attitude estimation algorithms to measure changes in tension and attitude of the mooring cable from the fairlead to the anchor point. Numerical simulations and calculations are conducted by Orcina Orcaflex to validate if the tension values are legitimate or not. Additionally, a human-machine interface is designed to observe the attitude changes in mooring cable due to wave action and provide decision parameters such as immediate change in tension and attitude. The mooring cable attitude sensing systems consist of high-sensitivity inertial sensors, CAN Bus and microcontrollers, evenly distributed on the mooring cable. These sensing systems can transmit both tension and attitude signals to the human-machine interface and analysis the changes of tension and the shape of the mooring cable. This study capture the mooring cable tension and shape by using the design of the attitude sensing system, allowing operators to intuitively understand the motion behavior of mooring lines under wave action. These parameters serve as references for relevant decision-making processes.