

以數值計算分析張力平台型浮式風機於斷纜條件下 之動態反應

張博超*¹ 紀昕儀*

*國立高雄科技大學 造船及海洋工程系

關鍵詞：張力平台型、繫纜系統失效、瞬態效應、動態分析、AQWA

摘要

隨著政府再生能源中千支風機政策的確立，台灣的離岸風電開發也正全力加速進行中。在各型式的浮式離岸風機中，張力平台型(TLP)由於其繫纜是垂直拉緊狀況，具有較強之勁度，因此通常運動量是相當小的。然而，當繫纜錨定系統突然發生斷裂或脫落時，結構平台的勁度與自然頻率將發生變化，也將產生不平衡的作用力，這些狀況是與原先的設計條件極大差異的，因此整體結構的穩定性將可能急遽變差，且產生非常激烈的瞬態運動響應。同時在瞬間極可能出現較大的瞬時過衝張力，造成對結構元件的損傷，情況通常會比懸鏈式繫纜系統平台更為強烈。TLP 斷纜條件的瞬態效應對於其安全性能有著重大威脅，絕對是設計階段必須考量的。本文乃將針對一目標張力平台型浮式離岸風機，經由數值計算方式來探討其突然斷纜後整體平台的瞬態響應性能。主要乃分析於不同環境條件下，一些與設計重要相關的性能變化，包括平台斷纜後的動態及靜態穩定性，並計算其運動量、漂移軌跡、漂移量及其他繫纜系統的張力值。本文採用 AQWA 軟體，它的頻域分析與系統平衡評估模組，是可處理一條或多條繫纜斷裂的情節；時域分析模組則可進一步設定繫纜斷裂的時間點，或是斷裂所須的張力值，是非常適合本研究之用。

前言

張力平台型 (Tension Leg Platforms, TLP) 浮式風機在組裝過程中展現出對氣候的高度適應性。整個平台及風機可在岸上完全組裝，且利用船隻運輸至目的地，使得氣候條件不再是組裝的限制因素。張力平台型式的水下基礎平台設計具有較淺的吃水、較小的體積以及輕量的特點。由於重心可能位於浮心 (Buoyancy center) 上方，這使得平台處於不穩定的平衡狀態。為了保持穩定，風機使用拉伸的繫纜 (Cable) 和在平台上產生的扶正力矩，以保持相對穩定的位置[1]。平台必須能夠抵擋各種波浪條件，包括極端的海象環境，因此對於其安全性和穩定性提出了挑戰。

此外張力平台型的平衡狀態在浮於水面時屬於不穩定平衡，可能面臨多種安全性風險，特別是繫纜系統的失效[2]。在這個過程中，平台需要有效應對失效情況，以確保平台的安全運行。

張力式風機與船舶運動學之間存在緊密的關係，主要體現在浮力與重力平衡、航行與定位控制、繫纜系統，並都受到風、波、流的外力影響。對於結構物的安全性分析，船舶及海洋工程模型實驗提供了真實確切的物理情境，但由於研究速度、經費和

實驗設備等方面的限制，數值模擬計算分析越來越受到重視。這種分析可以通過計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 進行，特別是針對船體運動預測結構物和流體動力等方面的分析。

為了進行相關研究，本研究採用了 Ansys AQWA 軟體，這是一套針對船舶和海洋工程領域的力學計算分析工具[3]。該軟體以勢流理論為核心，用於模擬風波流環境條件下的動態反應。通過在不同海象條件下進行頻率域的計算，可以初步評估平台的安全性。此外，進行時域的模擬，模擬過程中繫纜系統的瞬間斷裂，計算斷纜前、斷纜瞬間和斷纜後各階段的反應，包括運動量、漂移軌跡、漂移量以及其他繫纜系統的張力值。這有助於觀察和分析平台在斷纜後的動態和靜態穩定性。

本研究的目標是使用數值計算方法進行全面的分析，以評估張力平台型浮式風機在不同海況下的運動性能和安全性。這不僅可以提供對平台行為的深入理解，還有助於設計和操作上的改進，提高浮式風機系統的穩定性和可靠性。

¹ 張博超 (bcchang@nkust.edu.tw)



圖 1: 張力平台型浮式風機[4]

研究目的

本文主要的目標乃以數值分析的方法，針對張力平台型浮式風機進行時域的模擬，模擬過程中的繫纜系統的瞬間斷裂以及計算斷纜前、斷纜瞬間和斷纜後各階段的反應，進行分析計算。

張力平台式本身包括一個主平台和繫纜的拉伸張力，使平台浮於水面上能夠提供良好的靜態穩定度如圖 1，同時可使平台在波浪中進行作動[5]。這種平台擁有多項優勢，首先，其水線面積相對較小，有效降低了水阻，有助於減少波浪和風的負荷。風機頂端運動量較緩和，進一步減少風對平台的影響，使運動更為穩定。由於體積小，平台能更輕鬆應對波浪和風浪的挑戰。最後整體在自然週期、耦合運動方面更具有優勢，而操作和維護方面則是更為容易操作和維護；但同時也面臨一些挑戰，特別是其重心可能高於其定傾中心(Metacenter)，使平台可能處於不穩定平衡，需要仰賴繫纜的拉伸力以維持穩定性，使用垂直繫纜的結構使得平臺需要承受拉力。另外因平台本身輕，且在無纜繩時吃水淺，安裝過程需要特殊的設備，可能增加成本和複雜度。平台對重量變動較為敏感，這可能受制於使用垂直繫纜的結構[6]，但整體而言，平台在多個方面仍具有顯著的優勢。

Wu H 等人[7]將繫纜系統失效定義為突發狀況，可能是由偶然碰撞或其他事故引起，但在理論上，繫纜系統失效是可以被模擬的。基於 Wu J 等人[8]提到在繫纜系統失效時面臨三種主要的漸進式破壞模式：多個繫纜點失效、過度偏移、傾覆。同時也利

用 AQWA 對張力平台式繫纜性能參數進行了一系列纜繩分析，以預測纜繩一次性失效後的耦合結果，結構反應取決於波向，若改變波浪方向相當於改變失效繫纜的位置，繫纜失效後平台結構的瞬態效應比船體運動的瞬態效應更明顯。

Akbarizadeh N 等人[9] 透過使用 ANSYS-AQWA 進行計算流體動力學分析了靜水性能的計算，並利用運動方程式在時域預測運動反應。結果表明靜水性能的相互作用導致了繫泊系統的大幅運動，進而導致繫纜系統的失效。Cheng S 等人[10]透過頻域分析得到了靜水性能參數，並根據波浪力和響應振幅算子 RAO(Response Amplitude Operator)，使用規則波浪作為環境條件，進行了模型驗證以獲得瞬態和穩態的響應參數。

本研究主要為探討張力平台型浮式風機改變浮體及纜繩參數，且在不同的規律波下進行數值模擬比較，得出平台斷纜後的動態及靜態穩定性，並進一步探討其運動量、漂移軌跡、漂移量及其他繫纜系統的張力值。

研究方法

本研究採用計算流體力學軟體 ANSYS AQWA 針對張力平台型浮式風機進行模擬計算，藉此分析平台在靜水狀態下的固有頻率和在斷纜後的動態以及在於不同波浪參數下的模擬，用來作為計算例的平台乃引用文獻[11]的C-TLP。以下乃就針對 AQWA 軟體的數值方法進行簡單說明：

1. 數值方法

AQWA 是藉由勢流理論(Potential theory)進行求解。是一種描述流體運動的理論，並假設流體為無黏性、不可壓縮、非旋性之理想流體，利用速度場和速度勢的概念來表示無旋性速度場。

勢流理論乃將流場的速度勢區分由入射波、繞射力與輻射力速度勢組成，線性疊加表示如下式。對於簡諧傳播的波浪中具有浮動剛體的流場，其速度位勢可分為三個部分可得，並參照文獻[11]可得下列方程式：

$$\phi(\vec{X}) \cdot e^{-i\omega t} = \left[(\phi_1 + \phi_d) + \sum_{j=1}^6 \phi_{rj} X_j \right] \cdot e^{-i\omega t} \quad (1)$$

速度勢 ϕ 需要滿足的控制方程式為拉普拉斯方程式(Laplace Equation)如式(2)：

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

式(1) 其中 ϕ_1 為第一階入射波的速度勢， ϕ_a 為繞射力的速度勢， ϕ_{rj} 則是在 j 向度運動產生 r 向度之輻射波速度勢， $\vec{X} = (X, Y, Z)$ 為空間位置座標。

各速度勢須滿足各自的邊界條件(Boundary Conditions)，可由 3D 面板法(3D Panel Methods)進行計算求解。當這些速度勢求得，可由伯努利方程(Bernoulli's Equation)計算出流場壓力分佈，之後再將這些流場壓力對所有結構水下浸濕表面積分，即可計算出此物體各向度的作用力與力矩。

在 AQWA 中，可進行頻域(Frequency domain)和時域(Time domain)的計算分析；頻域計算採用規則波的繞射理論和莫里森方程式(Morison Equation)。計算過程並未直接模擬非線性力，運動方程式如式(3)：

$$[-\omega^2 M - i\omega C + K]U = F \quad (3)$$

其中 M 、 C 、 K 分別為包括頻率 ω 下的質量(含附加質量)、阻尼(Damping)和剛度(Stiffness)矩陣。方程中的 U 代表運動的反應量，而 F 則是作用在系統上的外力。

時域模擬可以進行水面浮體運動反應，計算浮體位移和運動速度的時間歷程，同時可以加入額外的受力，例如纜繩、風、波、流等。如果在時域模擬中外力不是等振幅的週期性負載，則時域方程式的運動方程式如式(4)：

$$\begin{aligned} \{m + A_\infty\}\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) \\ + \int_0^t R(t - \tau)\dot{X}(\tau) dt \\ = F(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 m 代表結構的質量， A_∞ 是頻率為無限大時的流體附加質量， C 是阻尼係數， K 是整體的勁度矩陣， R 則是速度的脈衝響應函數矩陣。結構在外力作用下的動態行為，考慮了質量、阻尼、勁度以及流體附加質量等因素，所以 AQWA 可針對於規則波中的浮體進行頻域與時域運動模擬。

在本研究中，繫纜元件使用非線性元素，基於勢流理論的莫里森方程式，且參照文獻[11]，可得下列方程式所示：

$$\begin{aligned} F = \rho\Omega\alpha_w + \rho C_a\Omega\alpha_w \\ - \rho C_a\Omega\dot{x} \\ + \frac{1}{2}\rho C_d DV|v| \end{aligned} \quad (5)$$

其中 F 為總力， ρ 為密度， Ω 為體積， α_w 為波浪激勵的力， C_a 為阻尼係數， $\Omega\dot{x}$ 為受到波浪的作用而產生的加速度， \dot{x} 為加速度， C_d 為阻力係數， D 為物體尺寸， V 為速度。

2. 模型平台幾何

本文計算例平台的一些重要尺寸及相關資訊基本上取自文獻[12]，資料整理如表 1。

表 1 試驗平台模型主要尺寸

	C-TLP	Units
Length Overall	80	m
Pontoon Size L x W x H	46 x 15 x 5	m
Column Size	20dia x 51 H	m
Deck Dimensions L x W x H	80 x 80 x 35	m
Total Displacement	31594	mt
Pretension	16511	mt
Pretension Per Tendon	1376	mt
Assumed KG	27.5	m
Tendon Outer/Inner Diameters	813/781.3	mm
Tendon Young's Modulus	2.0E+05	Mpa
Assumed Tendon yield strength	8.00E+02	Mpa
Tendon Stiffness	9.00E+06	N/m
Number of Tendons Per Tension Leg	3	-

並以 Rhinoceros 3D 進行風機幾何模型的描繪及完成，如圖 2 所示；

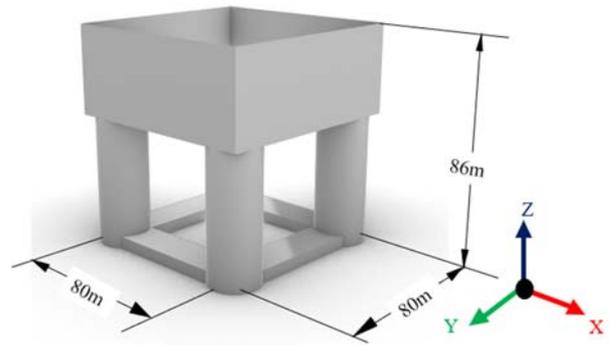


圖 2: 計算例張力平台型浮式風機模型立體圖

3. 分析條件及配置

TLP 在設定吃水線時，其浮力大於重量，因此需要由纜繩將平台拉住，才能平衡於設定之水線；吃水和重心紅點處位置，標示位置如圖 3。

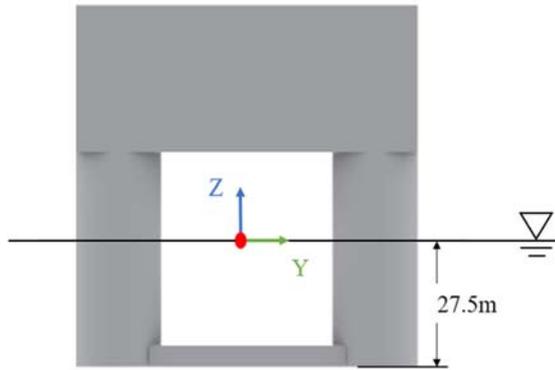


圖 3: 吃水和重心(紅點處)位置

圖 4 為計算流場邊界設定的俯視圖，邊界設定的尺寸則如表 2；設定邊界為此大小是因平台為正方形且具有對稱的特性，故邊界尺寸也為正方形，也避免過大的尺寸大小。

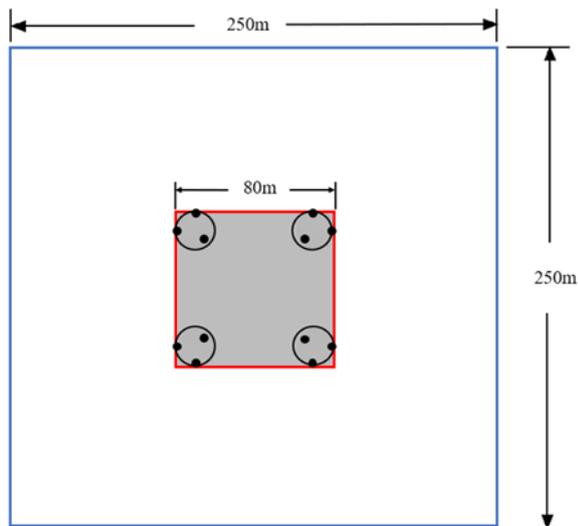


圖 4: 邊界設定俯視圖

表 2 邊界設定值

Water Size Y		
Water Size X	250	m
Water Depth	910	m

結構物體劃分為離散的元素，以進行數值模擬和分析。透過正確設定的小板大小，能夠更有效地捕捉結構物的幾何特徵，避免過大或過小的小板，可防止數值模擬出現不穩定性，受計算小板總數限制，故設定網格大小及總數如表 3，平台網格劃分完成後如圖 5 圖 6 所示，[14]有說明小板總數不超過四萬，由結果來看設定的尺寸能使網格最大化且劃分為最佳化，且不超過小板限制。

表 3 小板大小尺寸及總數

Defeaturing Tolerance	Max Elemen Size	Unit
1	2	m
Total Noles		
30633		

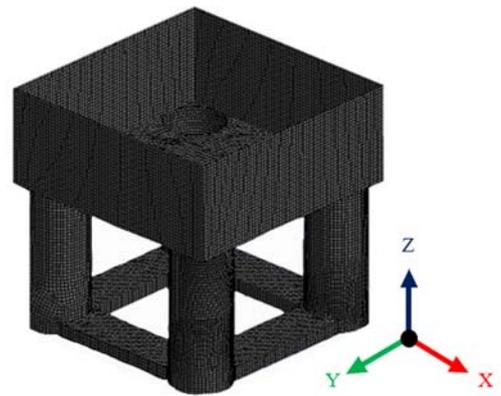


圖 5: 網格劃分結果之立體圖

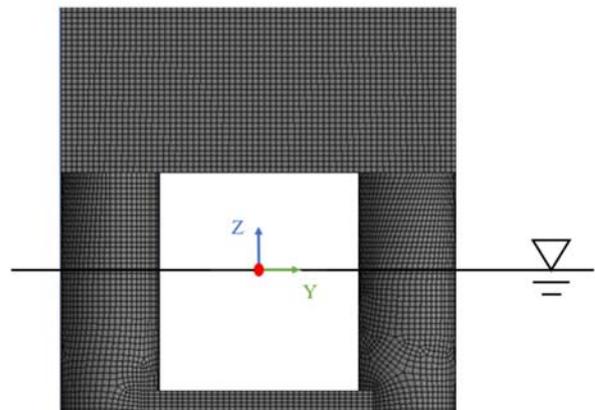


圖 6: 網格劃分結果之側視圖

本研究纜繩的設定為重要的考量因素，用於固定浮體結構，並提供額外的支撐和穩定。纜繩的數量配置、材料強度、固定端位置，以確保浮式風機在不同海況下都能保持平衡和安全。本研究用之 C-TLP 而設置了 12 個固定端，位置如圖 7，纜繩類型資料則如表 4。

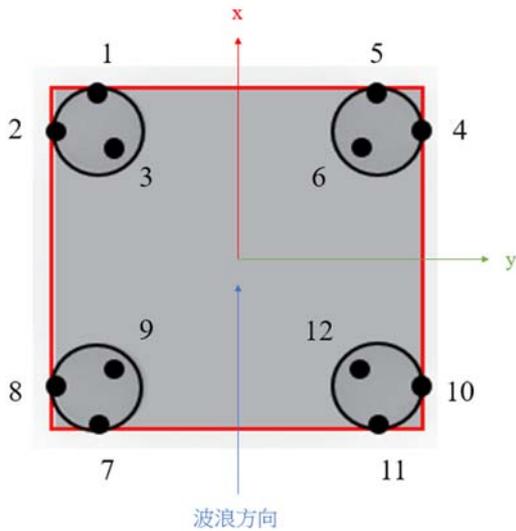


圖 7: 纜繩配置及波浪方向圖

表 4 纜繩類型主要資料

Type	Liner
Connectivity	Fixed Point to Structure
Stiffness	9000000 N/m
Unstretched Length	881 m
Initial Attachment Point Separation	882.5 m

後續為探討纜繩張力，纜繩選用的材質為高模數聚乙烯樹脂(High-modulus Polyethylene)，其極限應力為 1570MPa，其安全係數為 3[13]，為計算出纜繩最大容許張力透過計算式(8)、式(9)得出:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\max} &= \frac{\sigma_u}{SF} \\
 &= \frac{1570\text{MPa}}{3} \\
 &= 523.333\text{MPa} \\
 &= 523333333.3\text{N/m}^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 F &= \sigma_{\max} \times A \\
 &= 523333333.3 \times 0.0397 \\
 &= 20772921.86\text{N}
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中 σ_{\max} 代表最大容許應力(Maximum Stress)， σ_u 為材料的極限強度(Ultimate Tensile Strength)， SF 代表安全係數(Safety Factor)， F 表示受力或作用力的大小， A 代表受力的橫截面積。

在模擬過程中，會先以無斷纜的完整狀態下進行分析，接著再依序以斷纜順序為纜繩 03、纜繩 12、纜繩 09 在不同時間的斷纜情況下進行模擬分析。

4. 波浪條件

目前本文只探討到規則波的作用，而波浪方向則如圖 7 所示。

為能夠初步了解結構對規則波的反應特性，其反應振幅算子 RAO(Response Amplitude Operator)的計算結果提供了更豐富的信息。將結構物被視為一線性系統，以波浪條件作為輸入，而結構物的運動反應則被視為輸出。以複數函數的形式表示，RAO 的模數代表結構的響應振幅，相位則反映了響應的相位。且由於結構對稱性因此選擇起伏(Heave)、縱搖(Pitch)和縱移(Surge)這三個運動向度進行分析。如圖 7 所示，起伏是結構物體在 z 軸方向上的運動，縱搖是結構物體繞 y 軸轉動的運動，縱移是結構物體沿著 x 軸運動，涵蓋了結構物體對於波浪力作用產生的主要反應。

無外部波浪的情況下，這有助於評估結構的固有頻率；其次規則波條件下，受到具有明確方向和週期的波浪作用。這使得瞭解結構在單一方向和頻率的波浪作用下的反應。

(I)靜水:

浮體處於相對平靜和靜止的狀態，透過靜水的狀態模擬出自然振盪運動至平衡狀態，可獲得平台結構的固有頻率。

(II)規則波:

為探討不同規則波的海況下，以週期為固定參數分別研究不同振幅所影響的運動量、漂移軌跡、漂移量、運動的週期及其他繫纜系統的張力值，其規則波參數如表 5，波浪方向如圖 7。參數設定參考有義波高，以兩種極端的海域作為比較值。

表 5 規則波參數

	Amplitude	Period
1	0.5m	5s
2	2.375m	5s

結果與討論

本研究以起伏(Heave)、縱搖(Pitch)、縱移(Surge)進行了模型驗證以獲得瞬態和穩態的響應參數，圖 8、圖 9 和圖 10 分別代表了起伏、縱搖、縱移的 RAO，並與文獻[15]中的 RAO 進行比較。

其代表的主要意義為判定平台在可能發生的共振區與響應量，RAO 的計算分析對耐海性是一項重要的依據。

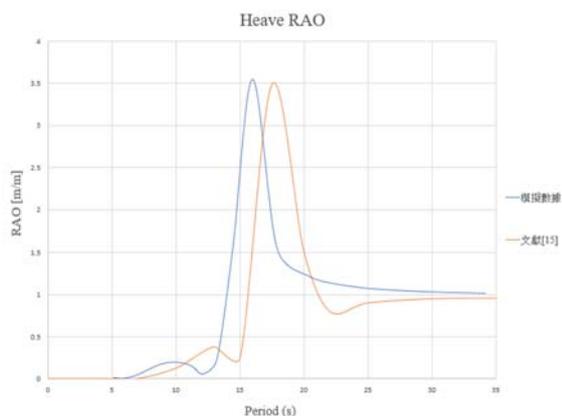


圖 8: 起伏 RAO

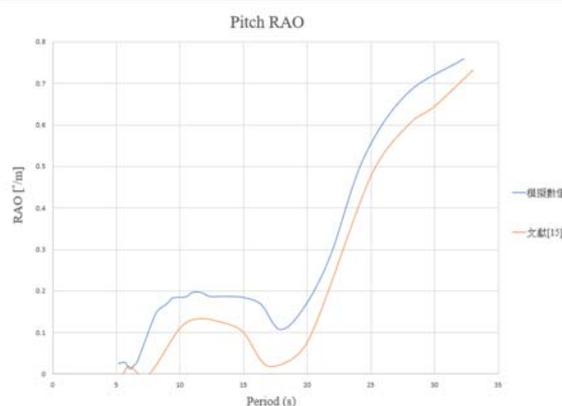


圖 9: 縱搖 RAO

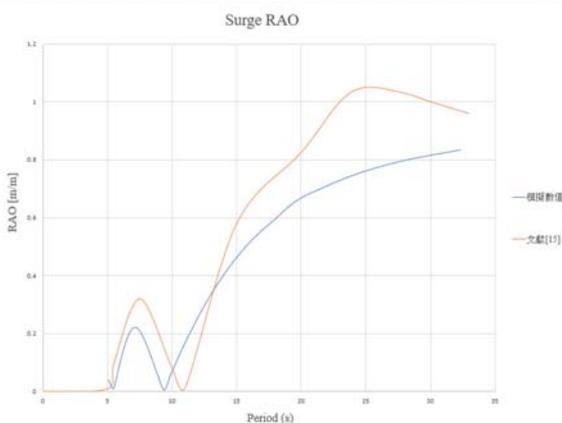
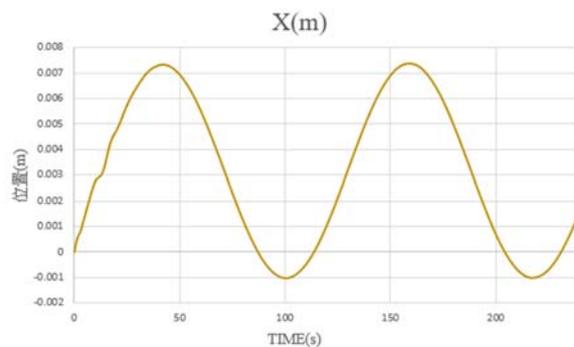


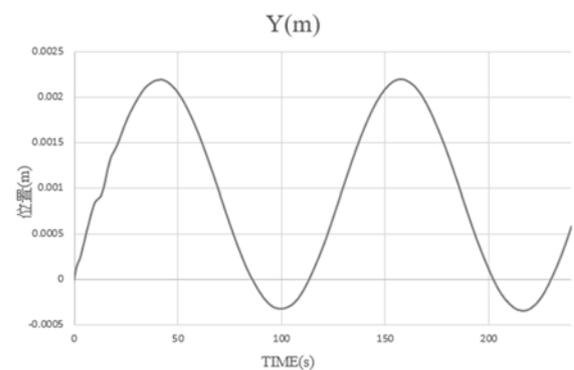
圖 10: 縱移 RAO

則如圖 12 所示，可判斷模型參數是否符合物理現象且具有穩定性。

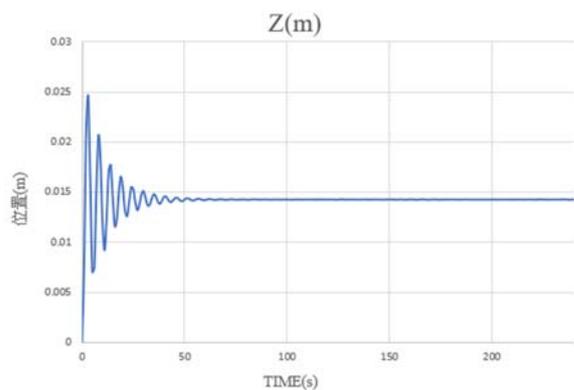
透過結果圖 11 來看，平台的運動量從一開始稍微偏移水線慢慢振盪下來，逐漸趨近於零，可以判斷此結果具有穩定性。



(a) 縱移



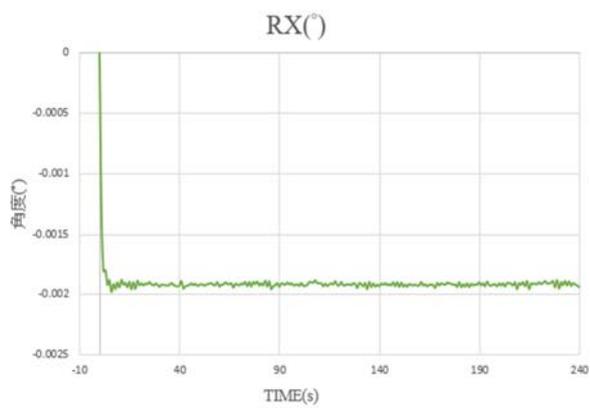
(b) 橫移



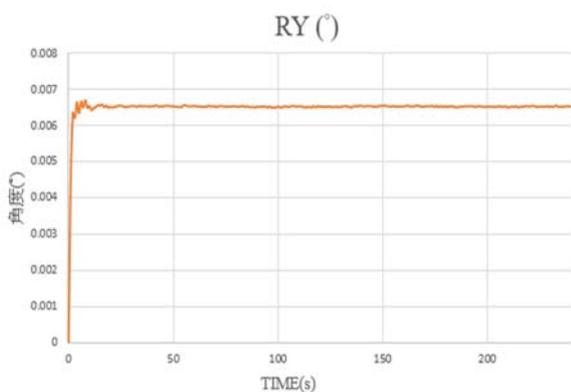
(c) 起伏

模擬結果與文獻相比，兩者 RAO 的數值大小雖有些差異，但變化趨勢基本上一致，顯示本研究的數值模型對於平台的響應具有的可預測性。

在靜水環境下時域計算結果，得出了縱移 (Surge)、橫移 (Sway)、起伏 (Heave)、橫搖 (Roll)、縱搖 (Pitch) 的運動量如圖 11，平台重心的漂移軌跡



(d) 橫搖



(e) 縱搖

圖 11: 靜水情況下的運動量

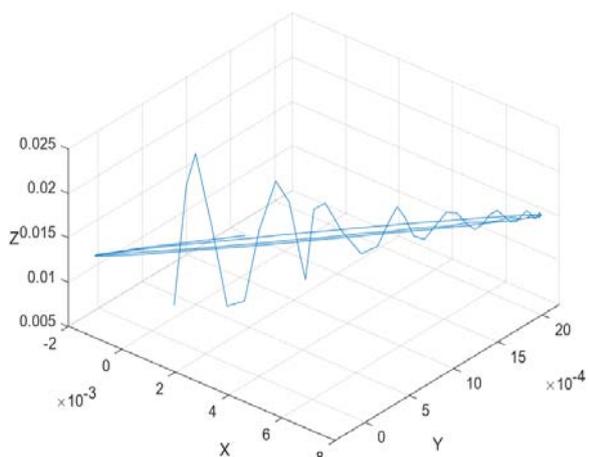


圖 12: 靜水情況下的三軸漂移軌跡

透過靜水的狀態下，即不受外界激勵作用時，可獲得結構體自身固有的振動的頻率，當掌握了結構的固有頻率，就較有可能避免與波浪外力產生共振現象，而可確保結構的安全性。

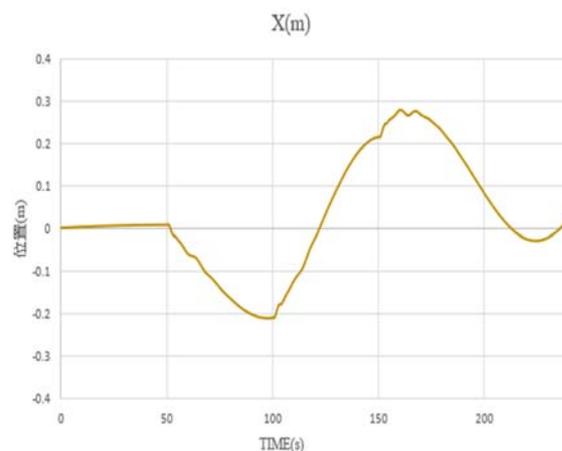
此計算平台之縱移、橫移、起伏、橫搖、縱搖的固有頻率分別如表 6。

表 6 固有頻率

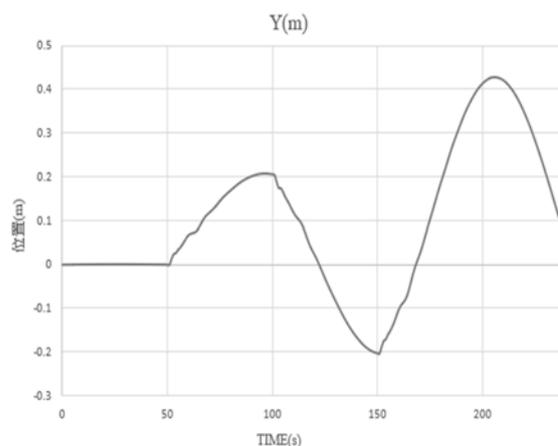
方向	Z(m)	RY(°)	RX(°)	X(m)	Y(m)
固有 頻率 (rad/s)	1.256	2.094	2.094	0.056	0.053
週期 (s)	5	3	3	111	117

為了解到斷纜過後的運動量以及繫纜系統的張力值，按照斷纜數量，由斷一根至斷三根，來判斷平台在斷纜的情況下的張力是否超過最大負荷張力以及造成過度偏移、傾覆的現象。

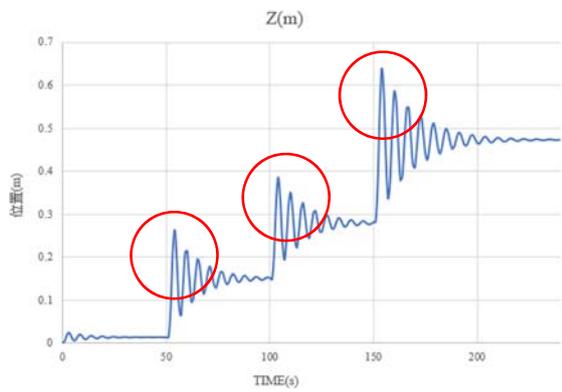
如圖 13 的結果，在靜水的狀態下平台經過斷纜一根至三根的運動量依序增加，而此斷纜的位置及順序分別為 03、12、09，以 03、12 的位置互為對角線，而斷纜的時間分別為 50 秒、100 秒、150 秒，斷纜位置會使縱移、橫移、橫搖、縱搖這四個自由度的運動量會有所變化。



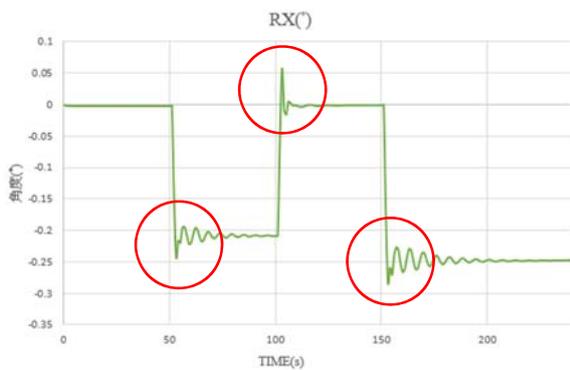
(a) 縱移



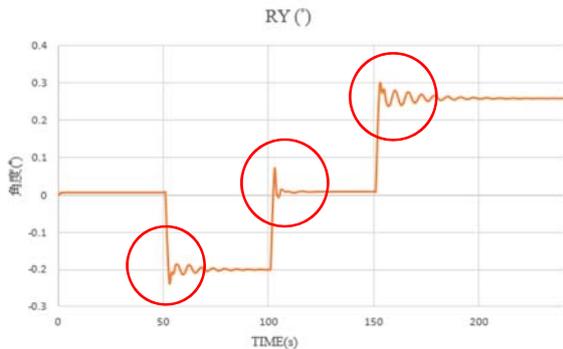
(b) 橫移



(c) 起伏



(d) 橫搖

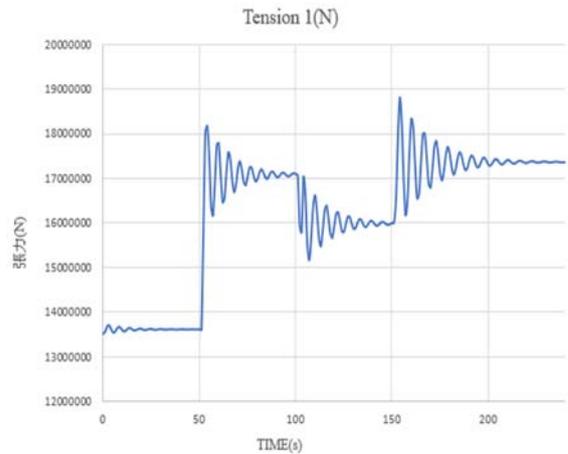


(e) 縱搖

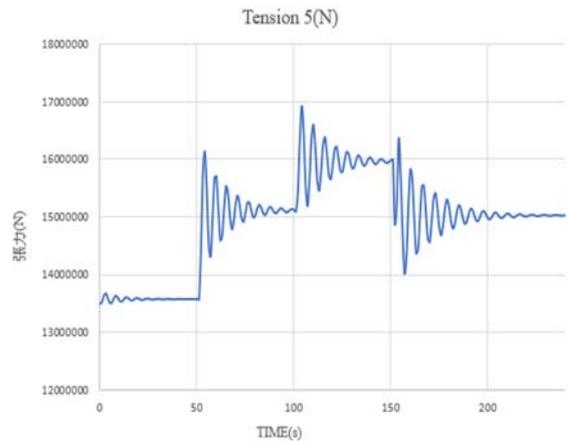
圖 13: 靜水情況下連續於 50、100 及 150 秒斷纜後的運動量

注意到圖 13 的紅圈處，為斷纜的瞬態響應。在這種情況下整體結構的穩定性將可能急遽變差，且產生非常激烈的瞬態運動響應。同時在瞬間極可能出現較大的瞬時過衝張力。

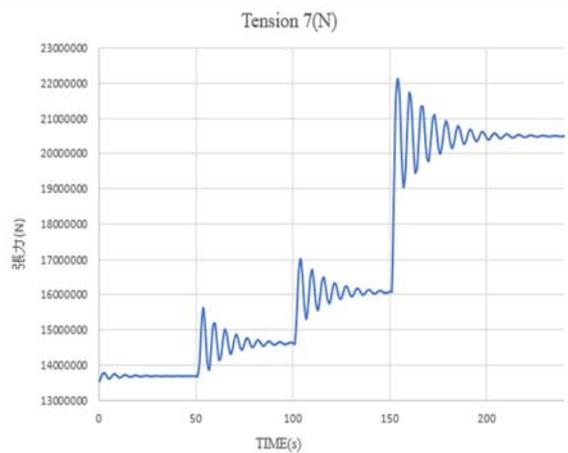
繫纜系統的張力值也是本研究所探討的重點，以纜繩 01、纜繩 05、纜繩 07、纜繩 11 的張力值如圖 14，可以判斷出當纜繩斷裂時，造成平台本身傾斜造成吃水體積改變，使得纜繩張力值會發生增加或減少的現象存在，亦可看到斷纜瞬間及未斷纜繩之張力亦有瞬態過衝之現象。



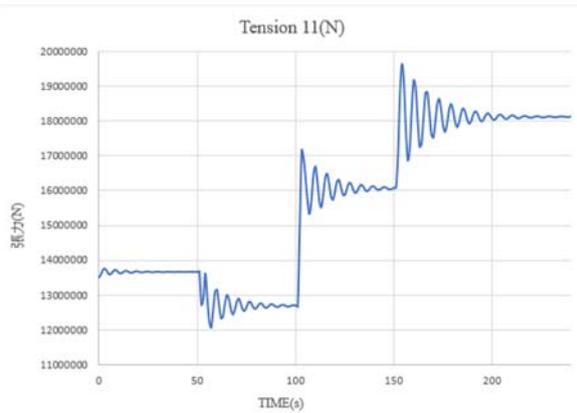
(a) 纜繩 01



(b) 纜繩 05

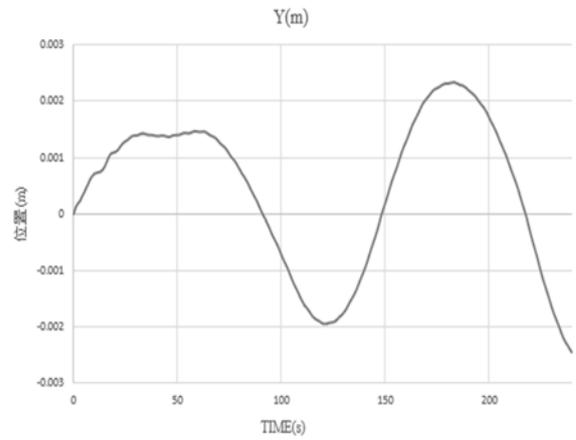


(c) 纜繩 07



(d) 纜繩 11

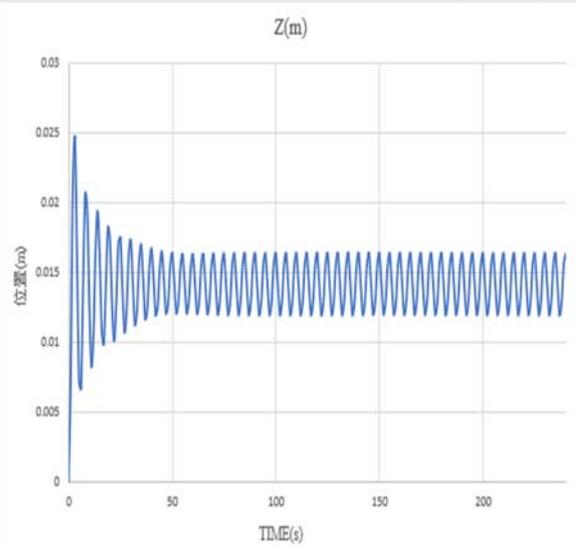
圖 14:靜水情況下於 50、100 及 150 秒斷纜後纜繩的張力值變化



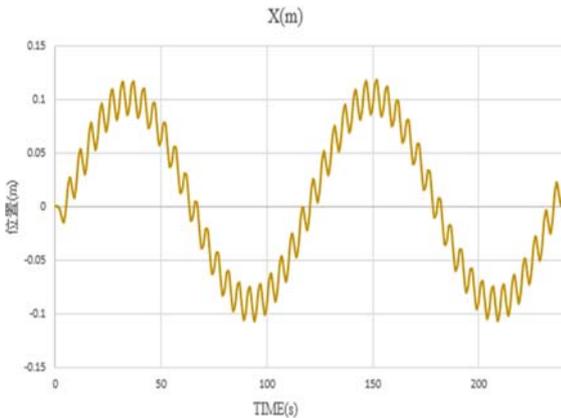
(b) 橫移

如圖 7 的纜繩配置圖，以及上述的張力值變化，當纜繩 03 發生斷裂產生單邊傾斜，觀察到除了同柱之外的纜繩 01，再者為兩側的纜繩 05、07，都有明顯的張力增加，而對角線位置的纜繩 11 則是張力減少；當纜繩 12 斷裂後使平台產生新的平衡，使對角線位置的纜繩 01 的張力值則有明顯的減少；當纜繩 09 斷裂時，會使平台再次產生單邊傾斜，使得纜繩 01、纜繩 07、纜繩 11 的張力有所增加，對角線位置的纜繩 05 則是減少。

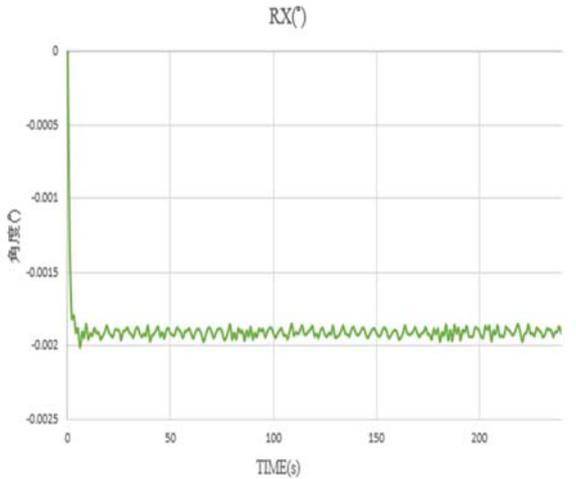
規則波條件下，受到具有明確方向和週期的波浪，這使得瞭解結構在單一方向和頻率的波浪作用下的反應；以週期相同振幅不同做為參數的基準。圖 15 所示，為振幅為 0.5 公尺週期為 5 秒的規則波作用下之結果。在具有規則波的海況下很明顯可以感受到平台本身一直受到波浪的影響，其中又因波方向為 X 使得橫移位移得較為明顯且不規則。其平台重心的三軸軌跡圖則如圖 16 所示，圖中的軌跡呈現螺旋狀，可以明顯感受到受到規則波影響。



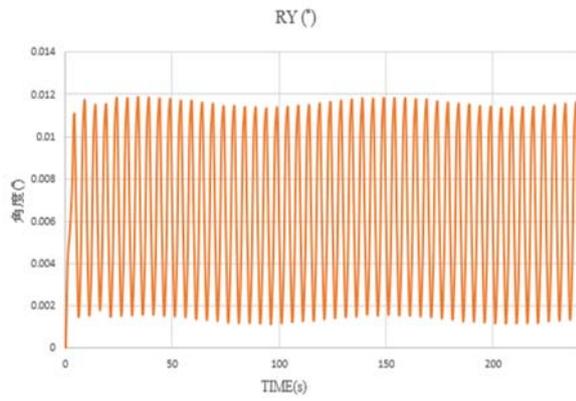
(c) 起伏



(a) 縱移

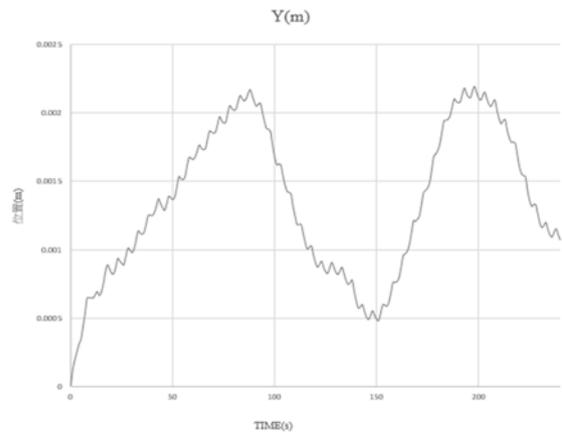


(d) 橫搖



(e) 縱搖

圖 15: 平台受週期 5 秒、振幅 0.5 公尺作用的運動量



(b) 橫移

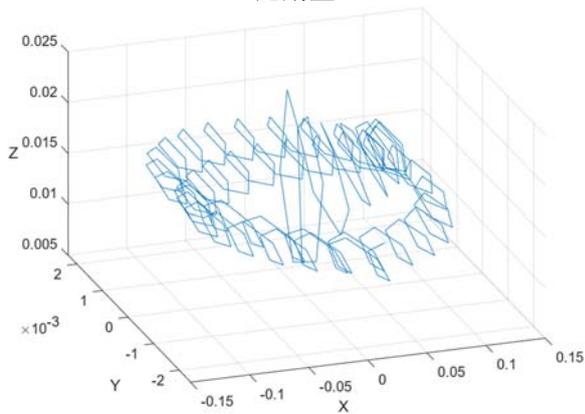
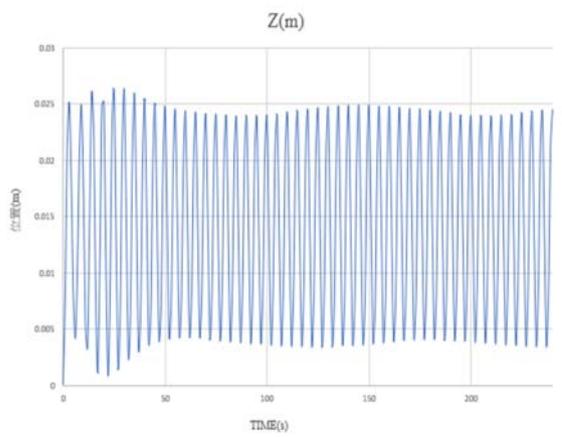
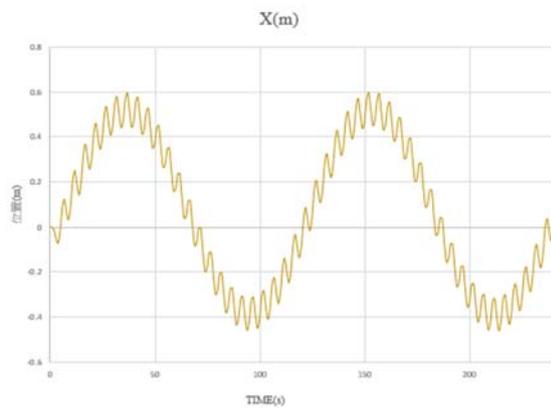


圖 16: 平台受規則波週期 5 秒、振幅 0.5 公尺作用的三軸軌跡圖

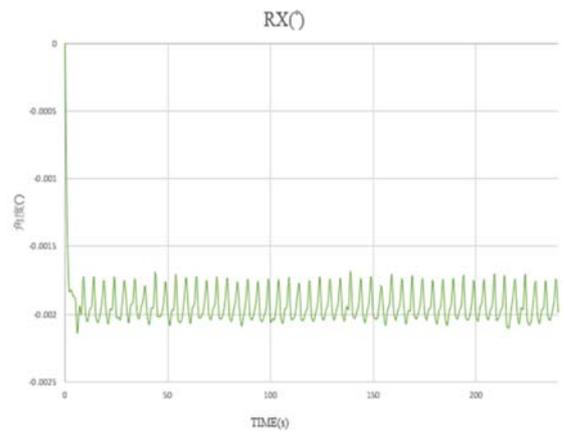


(c) 起伏

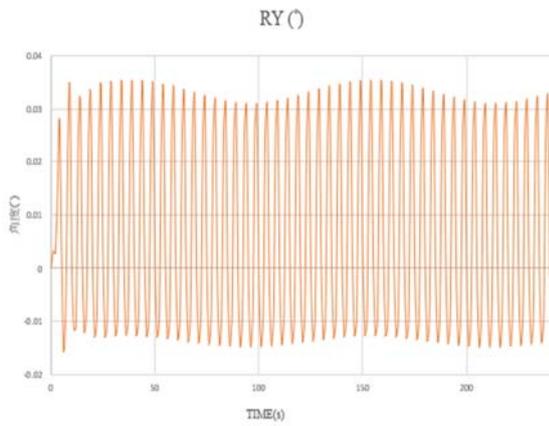
圖 17 則為振幅為 2.375 公尺、週期為 5 秒的規則波作用下之結果。由於振幅提高，各個運動量的位移明顯增多，其三軸軌跡圖如圖 18，也明顯增高。



(a) 縱移



(d) 橫搖



(e) 縱搖

圖 17: 平台受規則波週期 5 秒、振幅 2.375 公尺作用的運動量

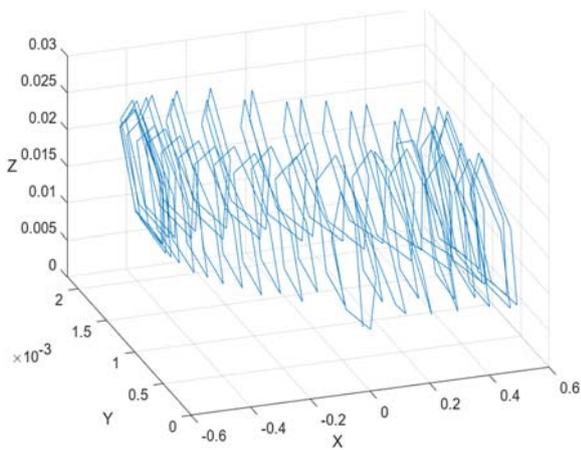
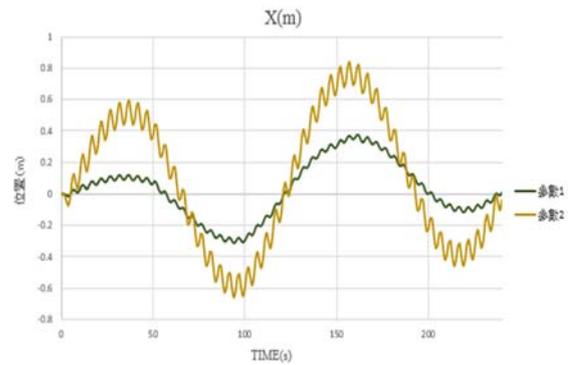
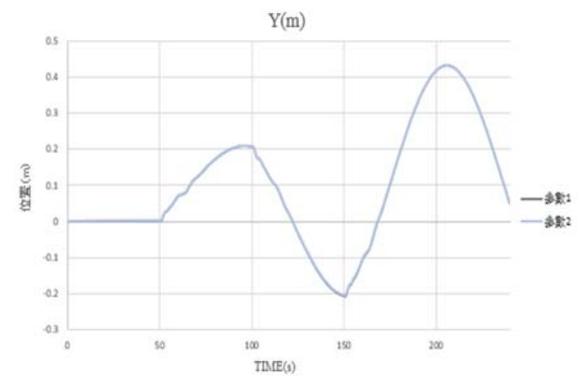


圖 18: 平台受規則波週期 5 秒、振幅 2.375 公尺作用的三軸軌跡圖

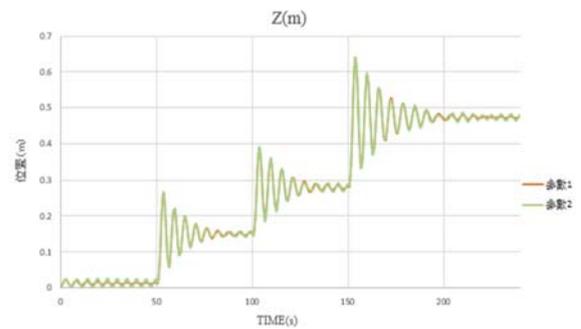
圖 19 為波浪振幅 0.5 公尺和 2.375 公尺作用下，斷纜後平台運動量之比較。能感受到除去波方向的縱移量有明顯的改變以外，其他的自由度的位移量變化不大。



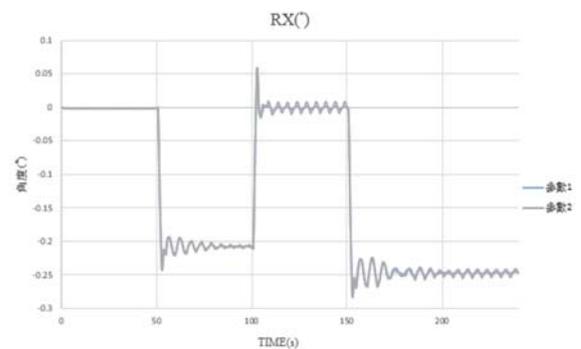
(a) 縱移



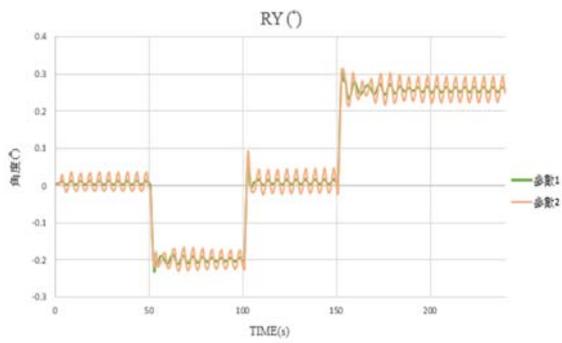
(b) 橫移



(c) 起伏



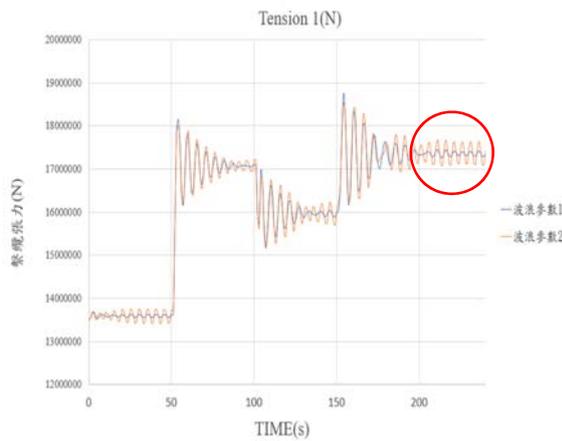
(d) 橫搖



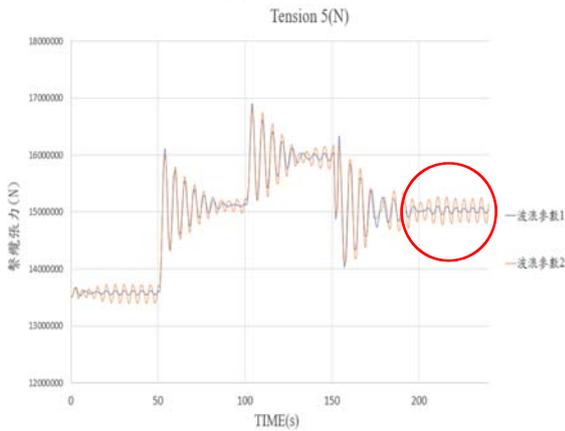
(e) 縱搖

圖 19:不同規則波參數的運動量比較圖

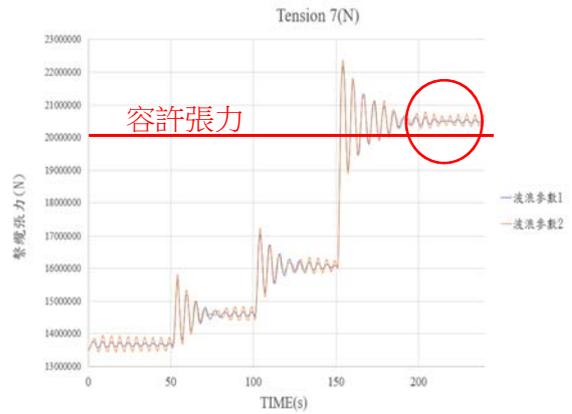
但如圖 20 觀察到纜繩斷纜的張力值時則有明顯的變化，由此可知受到不同振幅高度波浪的影響其力量會被纜繩吸收，同樣以纜繩 01、纜繩 05、纜繩 07、纜繩 11 之張力進行比較。



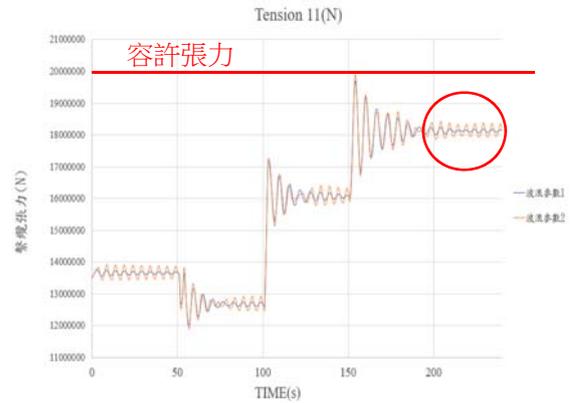
(a) 纜繩 01



(b) 纜繩 05



(c) 纜繩 07



(d) 纜繩 11

圖 20: 纜繩 01、05、07、11 張力比較圖

注意紅圈處，能夠明顯看出張力值的力有明顯的不同，將纜繩 1 的紅圈處放大來看如圖 21，其參數 1 及參數 2 的張力值相差約為 200000N；而在分析條件與配置的章節中，有提到容許張力，其中圖 21 的纜繩 07、11 在斷纜數為 3 時超過了容許張力，需要注意避免造成對平台的更大的斷裂危險。

此外可發現當發生斷纜，雖經過一段時間後，其他纜繩之張力將趨近於穩定，此穩定值或許小於繫纜之容許值，但其斷纜瞬間的過衝張力有可能以大於容許的張力值，而將對纜繩造成傷害。

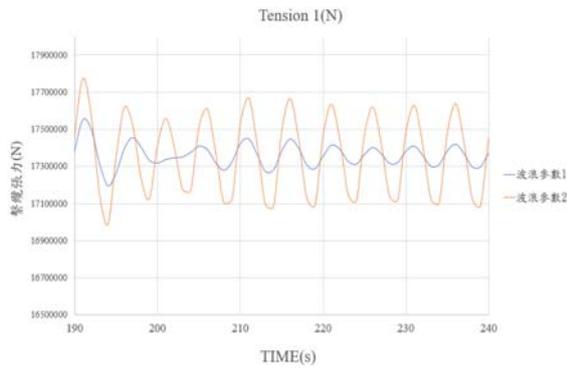


圖 21: 纜繩 01 張力局部放大圖

結果與討論

透過使用 Ansys AQWA 軟體，成功模擬了張力平台型浮式風機在靜水和規則波的環境中的運動行為。模擬結果包括運動量、漂移軌跡、漂移量、固有頻率以及繫纜系統的張力值等相關參數。

模擬計算的結果可以有效判斷平台在不同海況下的動態反應。這對於評估平台的安全性和穩定性，有助於預防潛在的安全風險。

本文已確實模擬出斷纜時的瞬態過衝反應，而斷纜時的瞬態過衝反應對於平台的影響重要，可能引發連鎖反應，影響安全性、環境和經濟等方面。為了避免這種情況的發生，可透過模擬不同吃水線、平台尺寸以及各種纜繩材質的最大容許張力，來設計防止纜繩斷裂的安全機制。這些措施有助於降低斷纜帶來的潛在風險，確保平台的安全運行。

未來將針對波浪影響進一步深入分析，例如改變波浪特性：波的週期、頻率、波向等以及增加風速等，尤其是增加對於非規則波下的運動情況，以及斷纜後是否會造成共振現象進行計算及探討。這有助於擴展研究的範疇，並提供更全面的模擬結果，以便更好地了解張力平台型浮式風機系統的性能。

參考文獻

1. Tabeshpour MR, Ahmadi A, Malayjerdi E. Investigation of TLP behavior under tendon damage. *Ocean Engineering*. 2018;156:580-95
2. Wu J, Yu Y, Yu J, Chang X, Xu L, Zhang W. A Markov resilience assessment framework for tension leg platform under mooring failure. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023;231.
3. ANSYS AQWA, "Line, Librium, NAUT and Tether Manuals", ANSYS Inc, Pittsburgh, CO, USA. 2017
4. Andersen, M. T., "Floating Foundations for Offshore Wind Turbines", Aalborg Universitetsforlag, Ph.d.-serien for Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet. 2016

5. Cao L, Dai M, Zhou X, Huang G, Chen YF, Zhu R. Efficient response analysis of the cable of offshore wind turbine at static state: Hybrid of perturbation method and grey wolf optimization. *Ocean Engineering*. 2023;269
6. Butterfield, C. P.; Musial, W.; Jonkman, J.; Sclavounos, P. and Wayman, L., "Engineering challenges for floating offshore wind turbines", Citeseer. 2007
7. Wu H, Zhao Y, He Y, Shao Y, Mao W, Han Z, Transient response of a TLP-type floating offshore wind turbine under tendon failure conditions. *Ocean Engineering*. 2021;220.
8. Wu J, Yu Y, Cheng S, Li Z, Yu J. Probabilistic multi-level robustness assessment framework for a TLP under mooring failure considering uncertainties. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022;223.
9. Akbarizadeh N, Ketabdari MJ. Comparative study of TLP and ETLP performance in Caspian Sea environment using numerical method. *Marine Structures*. 2022;86.
10. Cheng S, Yu Y, Yu J, Wu J, Li Z, Huang Z. Mechanistic research on the complex motion response of a TLP under tendon breakage. *Ocean Engineering*. 2021;240.
11. 高巍, ANSYS AQWA 軟件入門與提高, 中國水利水电出版社, 2018
12. NING XU, STATIC STABILITY OF TENSION LEG PLATFORMS ,May 2009
13. Suzuki K, Yamaguchi H, Akase M, Imakita A, Ishihara T, Fukumoto Y, et al. Initial Design of Tension Leg Platform for Offshore Wind Farm. *Journal of Fluid Science and Technology*. 2011;6:372-81.
14. 高巍, 董璐, ANSYS AQWA 進階應用, 中國水利水电出版社, 2018
15. Akbarizadeh N, Ketabdari MJ. Comparative study of TLP and ETLP performance in Caspian Sea environment using numerical method. *Marine Structures*. 2022;86.

Dynamic Analysis of TLP Floating Offshore Wind Turbines under Tendon Damages by a Numerical Model

Bor-Chau Chang Hsin-Yi Chi**

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
National Kaohsiung University of Science and Technology

Keywords: TLP, Tendon Damage, Transient effects, Dynamic Analysis, AQWA

ABSTRACT

Among various types of floating offshore wind turbines, the tension leg platform (TLP) floating wind turbines have relatively small motions due to stiff tendons. The sudden failure of one or more tendons causes the change of stiffness and natural periods, the imbalance of forces and moments of the total system which is very different from its design condition, and possibly deteriorated stability and large transient responses. To enhance the safety and global stability of whole TLP system, obtaining failure consequences is necessary. The primary objective of this paper will be performed for a target TLP to investigate its coupled hydrodynamic response after tendon one-time failure. Response statistics of key design parameters including platform stability, transient motions, and tendon tension are analyzed for different environment cases. Towards this end, the AQWA software will be employed which can be conducted in time-domain or frequency-domain coupled with mooring system.