

海上複合式箱網養殖系統之研究

詹竣合¹ 陳怡屏² 黃材成³

¹ 國立中山大學海洋環境及工程學系研究生

² 國立中山大學海洋環境及工程學系碩士

³ 國立中山大學海洋環境及工程學系教授

摘要

本研究對象為複合式單錨箱網，除具有傳統單錨式箱網之養魚功能外，加掛牡蠣框可養殖牡蠣而成複合式之養殖設施，藉以提升傳統箱網養殖之經濟效益。研究目的主要是以小琉球各式海況條件探討複合式單錨箱網之網袋容積率變化及錨定點最大纜繩張力反應等，以作為實務規劃及設計參考之依據。研究方法是質量集結點法建立複合式單錨箱網之數值模式，再經由 4 階的 Runge-Kutta 法求解箱網運動方程式。研究結果顯示，在規則波狀況下，複合式箱網比傳統式箱網在網袋容積率略小而在錨定點纜繩張力則略大，此乃因複合式箱網在外浮框上有多加牡蠣框架會影響網袋變形，間接會增加錨定點纜繩張力，因此複合式單錨箱網有必要加以改善，以克服網袋生存空間不足之問題。

關鍵詞：複合式單錨式箱網、牡蠣養殖框、錨定點纜繩張力、網袋容積率

Study on a Compound Cage Aquaculture System in the Open Sea

Chun-Ho Chan Yi-Bing Chen Chai-Cheng Huang*

* Professor, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

ABSTRACT

This research is to develop a new compound cage system that not only has the traditional cage system but also has a series of oyster containers hanged on the circumference of the floating collar to add economic value to fishery industries. The purpose of this study is to investigate the cage net deformation rate and the maximum mooring line tension at the anchor under a variety of Liuchiu's sea states, and wish this dynamic information can be used as valuable guides for fish farmers and aquacultural cage designers. The numerical method is based on a lumped-mass approach to build a system of motion equations, and then utilizes the fourth order Runge-Kutta method to solve the motion equations. The numerical results reveal that under regular wave conditions, the cage net deformation rate for the compound cage system is slightly less than that of the traditional cage system, but the maximum mooring tension has reversed results, i.e., the compound cage system has higher mooring tension than that of traditional one. To overcome this net shrinkage problem, an improved scheme is necessary to implemented before a real compound cage system is installed in the field.

Keywords: Compound cage system; Oyster container; Mooring tension; Net deformation rate

一、前言

台灣屬於島嶼型地形，與海洋息息相關，養殖

漁業一直是我國重要產業之一。近幾年因為人類對海鮮的過度依賴、海洋環境的污染及人類的濫捕，使得世界海洋漁業的產能幾乎已達極限，但人類不

會因為海洋資源減少而減少食用的慾望，因此得依賴水產養殖才能解決全球漁產品日益不足的困境。由於陸上水產養殖對生態環境造成的負面衝擊令人擔憂，以致於世界沿海國家無不積極發展海上箱網養殖。我國政府也極力推廣海上箱網養殖，以降低陸上魚塢對環境的衝擊，亦可進一步開發台灣經濟海域。為了充分利用我國有限養殖海域，本研究發展出一套複合式箱網養殖模式，即利用現有的單錨式箱網加以改良，在其外框上加掛牡蠣框，以增加養殖空間及效益。箱網網袋內依然可以飼養高級經濟魚種，而牡蠣框則可養殖牡蠣，達到充分利用養殖設施之目的。

二、理論分析

2.1 單錨複合式養殖系統結構簡介

本研究主要應用潘(2007)發展完成之單錨式箱網，如圖 1 所示，在外框上多加了牡蠣框架而成的單錨複合式箱網，如圖 2 所示。而此單錨複合式箱網養殖結構，可區分為兩大系統，即錨碇系統與畜養系統。錨碇系統的部分可細分為錨碇塊 (anchor)、錨碇纜繩 (mooring line)、支繫纜繩 (bridle)、鐵鍊 (chain) 以及金屬連結釦環 (shackle)，而畜養系統則是利用現有的箱網養殖系統中，在浮框內框懸掛網袋以養殖高級經濟魚種，而浮框外框吊掛牡蠣框架養殖牡蠣，以達複合式養殖之目的。

2.1.1 錨碇系統

傳統箱網中，錨碇系統包含錨碇塊、錨碇纜繩及支繫纜繩，其主要作用是將箱網固定在規劃的海域範圍內，以防止箱網受波流作用而流失，本研究主要是參考傳統單錨式箱網，再外浮框多增加牡蠣框架。當箱網受外力作用後，各個構件的受力會經由支繫纜繩及牡蠣框架纜繩傳送到錨碇纜繩，最後反應在錨碇塊上；因此錨碇塊的重量配置是錨碇系統的關鍵所在，必須考慮到箱網受力後錨碇纜繩反應在錨碇塊的張力，加上錨碇纜繩與海底底床之夾角，以做為錨碇塊重量計算及配置之依據。在錨碇纜繩與錨碇塊之間加設有一段鐵鍊，其作用是防止錨碇纜繩與底床摩擦而受損斷裂，並且可以降低錨碇纜繩與底床間之夾角，以減少垂直方向的受力，

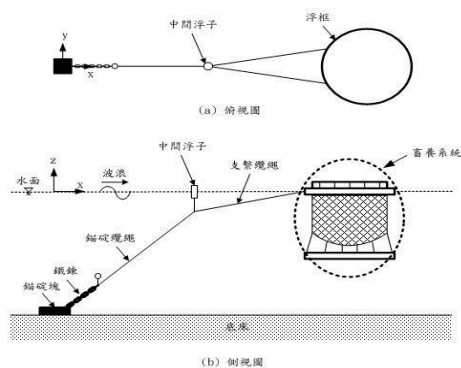


圖 1 傳統單錨式箱網

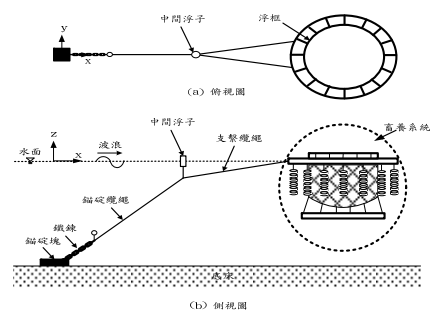


圖 2 單錨複合式箱網

避免錨碇塊被垂直拉起而導致整個錨碇系統之不穩定。而錨碇塊種類之選擇則視養殖現場之底床情況而定，例如澎湖箱網養殖海域的底床主要為沙泥地質，則選用嵌入式鐵錨(embedment anchor)做為主要的錨碇系統；而小琉球海域為珊瑚礁岩盤地形，鐵錨在此無法發揮最大的功用，故選擇以混凝土塊重力式錨(deadweight anchor)代替之。

2.1.2 畜養系統

畜養系統主要包含框架及網袋，而框架包含有浮框、扶手管及沉框，主要作用是支撐網袋及做為工作平台。在箱網受力時，浮框負責將箱網主體的受力傳送給支繫纜繩，其材質一般採用 HDPE (High Density PE, 高密度聚乙烯)，內部空心。浮框的圓周尺寸大小視其養殖環境而異，且其管徑(D)與管壁厚(t)之選擇依據為 SDR (Standard Diameter Ratio)： $t/D = 1/17 \sim 1/11$ ，依養殖地點之風浪大小及使用箱網大小而定。箱網配重主要是用來固定網袋形狀以增加養殖空間，一般都採用沉框式而非重錘式配重。因重錘彼此之間是獨立運動，對於固定網袋的功能會大打折扣，反之，沈框是屬於固定形狀之整

體運動，可減緩網袋變形的幅度，且沈框可經由輸入氣體後提升浮力，使網袋緩緩升上水面，因此有助於換網工作。沈框材質與浮框相同，皆採用 HDPE，但與浮框不同之處為內部注滿海水並加設有鐵鍊，目的為增加其重量，抵抗浮力，沉入海中。

網袋系統主要作用是圈養魚群並防止魚隻脫逃及外圍魚群來掠食，且網袋容積大小更是直接影響養殖魚類的存活率，通常網袋材質一般採用尼龍網。

2.1.3 牡蠣養殖框

依據 Fredriksson et al (2010)之建議，牡蠣養殖框設計為長寬各為 60 公分、高 7.8 公分的 PVC 材質，其垂直網孔為 17mm×25mm，底部孔洞 12mm×12mm，中間孔洞為 48mm，如圖 3 所示。每個框架重為 1.07kg，而其中間孔洞主要是串成牡蠣籠框架，可以增加其養殖的單位，增加牡蠣的產量。選擇 2-3 公分的稚貝放於籠框中，進行養殖。

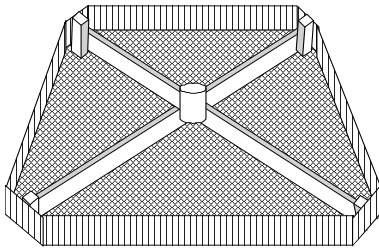


圖 3 牡蠣養殖框形式

2.2 波流場基本假設

箱網在外海所受到的外力主要有風、浪及流等因素。因箱網大部分構件均在海面下，風力的影響不大，故設計時一般以考慮浪與流的影響為主。假設波流場為非黏性且不可壓縮之流體而其運動為非旋性，故存在一流速勢函數，且此流速勢滿足 Laplace's Equation。引用陳、莊(1990)於三度空間、等水深、波向與流向成任意交會角度情況下，以攝動法展開得到之流速勢通解，並進而得到此波流場的速度及加速度場。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(K_x x + K_y y - \sigma t) \quad (1)$$

$$\phi = (U_x x + U_y y) + \frac{Hg \cosh K(h+z)}{2\sigma_c \cosh Kh} \sin(K_x x + K_y y - \sigma t) \quad (2)$$

$$\sigma_c = \sigma - (U_x K_x + U_y K_y) \quad (3)$$

將(2)式分別對 x, y, z 偏微分後，可得三維之速度場：

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \left[|U_x| + \frac{HgK \cosh K(h+z)}{2\sigma_c \cosh Kh} \cos(K_x x + K_y y - \sigma t) \right] \cos \theta \quad (4)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \left[|U_y| + \frac{HgK \cosh K(h+z)}{2\sigma_c \cosh Kh} \cos(K_x x + K_y y - \sigma t) \right] \sin \theta \quad (5)$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{HgK \sinh K(h+z)}{2\sigma_c \cosh Kh} \sin(K_x x + K_y y - \sigma t) \quad (6)$$

將(4)式至(6)式對時間 t 偏微分後，可得三維支局部加速度場：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{HgK\sigma \cosh K(h+z)}{2\sigma_c \cosh Kh} \sin(K_x x + K_y y - \sigma t) \cos \theta \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{HgK\sigma \cosh K(h+z)}{2\sigma_c \cosh Kh} \sin(K_x x + K_y y - \sigma t) \sin \theta \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{HgK\sigma \sinh K(h+z)}{2\sigma_c \cosh Kh} \cos(K_x x + K_y y - \sigma t) \quad (9)$$

2.3 複合式箱網結構外力

假設複合式箱網構件對波流場而言相當微小，不會造成波流場有明顯的改變，可視為小構件適合採用 Modified Morison 經驗公式，則箱網構件在波流場中受到的外力包括有：流阻力及慣性力，構件本身的重力，構件在水中的浮力，以及纜繩及網袋承受的張力等。

2.3.1 流阻力及慣性力

當箱網構件與流體粒子同時發生運動時，依 Brebbia and Walker(1979)之建議將靜態之 Morison 經驗公式改寫如下：

$$(m + \rho \nabla K_m) \frac{\partial \bar{R}}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho C_D A \bar{V}_R |\bar{V}_R| + \rho \nabla C_M \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} \quad (10)$$

其中 ρ 為流體密度， C_D 為流阻力係數(=1.5)， A 為構件在流速方向的投影面積， \bar{V} 為波流場速度， \bar{V}_R 為波流與結構物相對速度， C_M 為慣性力係數(=2.0)， ∇ 為構件體積， K_m 為附加質量係數(=1.0)。

2.3.2 重力

重力是構件本身質量受地球之重力場吸引所產生的力。

$$\bar{W} = m \bar{g} \quad (11)$$

式中，計算時定義 z 軸向上為正。

2.3.3 浮力

浮力是由於構件浮在水中時，構件表面在水面下的位置不同而造成壓力差，浮力即因此壓力差而產生。浮力的基本定義是排開構件體積乘以液體密度。

$$\vec{F}_B = -\rho \nabla g \quad (12)$$

2.3.4 張力

張力是彈性物體在受力伸長變形後的恢復力，在數學上的定義是，受力截面積與其應力之乘積，箱網構件中纜繩及網袋會產生張力。

$$T = A\sigma = AC_1\varepsilon C_2 \quad (13)$$

$$\varepsilon = (\ell - \ell_0) / \ell_0 \quad (14)$$

其中， ℓ_0 為原始長度， ℓ 為變形後之長度， ε 為應變量， σ 為應力， A 為受力截面積， T 為張力， C_1 、 C_2 為構件的彈性係數，應用上通常取 $C_2 = 1$ ， C_1 則根據材料的破壞張力(或達到容許變形量時之張力)、受力截面積及應變量等因素求出。

2.4 質量集結點運動方程式

因為構件具有長度，可以用來計算各種外力如慣性力、流阻力、張力、浮力及重力。利用質量集結點計算時，必須將構件所受的總和外力平分到相關節點上，求出各質量集結點的運動方程式如下：

$$\left(m_i + m_{\text{conn}} + \sum_{j=1}^N k_{\text{rot}} \rho_w \nabla_j \right) \ddot{\vec{R}}_i = \sum_{j=1}^N (\vec{F}_{D_j} + \vec{F}_{I_j} + \vec{F}_{T_j} + \vec{F}_{B_j} + \vec{F}_{G_j}) + \vec{F}_{\text{conn}} \quad (15)$$

$$m_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \quad (16)$$

其中， N 代表節點相關的元素總數，下標 i 代表節點編號，下標 j 代表元素編號，下標 *extra* 代表外加項(如中間浮子)。隨後再利用 Runge-Kutta 法求解箱網運動方程式，以求取下一步階各個質點位置與運動速度。由纜繩各質點之位移即可得知錨碇纜繩各質點間之拉力隨時間變化之情形。

三、結果與討論

假設本複合式箱網設置於小琉球，其相關之海象設計條件及複合式箱網設計之材質等說明如下，並就數值模結果，探討箱網在水體中運動反應及錨碇張力值以作為實務設計之依據。根據(2007 潘)所提供之小琉球海象條件，如表 1。

表 1 做為數值模擬條件可分為下列三種

風浪設計條件	模擬數據	數據資料來源
小琉球漁港設計颱風 (50 年迴歸期)	週期 10 秒 波高 6 米 流速 3 節	漁會工研院能資所報告，其推估該區海潮流最大可達 3 節左右。
一年迴歸期颱風之海象條件	週期 8.5 秒 波高 3 米 流速 2 節	主要是中央氣象局颱風侵台路徑，其平均示性波高及對應之平均示性週期，流速則取一年迴歸期颱風中最嚴重之情況。
平常沒有颱風時之最大風浪條件	週期 6 秒 波高 1 米 流速 1 節	平常沒有颱風時之浪流條件

將(a)複合式箱網型式外觀和(b)複合式箱網的放大圖，以數值模式描述如圖 4 所示。再以數值模擬的方式，將傳統單錨式箱網與複合式箱網做比較，比較兩者間錨碇纜繩最大張力以及網袋容積率之差異，結果如表 2 所示。於設計風浪條件為 50 年迴歸期颱風作用下、一年迴歸期颱風之海象條件及平常無颱風可能最大風浪箱網錨碇纜繩張力反應(kN)包括主纜繩張力及支繫纜繩張力，與網袋容積率(%)收斂情況等之結果，如圖 5、6 及 7 所示。

結果顯示，當風浪條件在 50 年迴歸期颱風、一年迴歸期颱風之海象條件及平常沒有颱風時作用下，其複合式箱網較傳統箱網在網袋容積率方面略小而在錨碇張力則略大，此乃因複合式箱網在外浮框上有多加牡蠣框架會影響網袋縮收，間接會增加錨碇纜繩張力。但總體而言兩者差異並不顯著，概因牡蠣框架相較整組箱網結構仍屬相當微小。

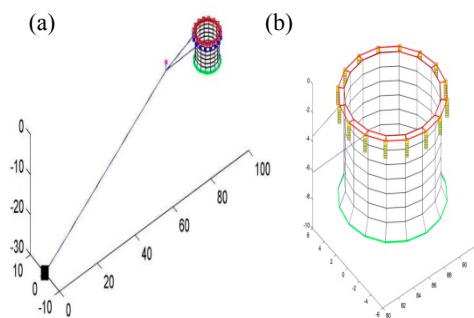


圖 4 數值模擬圖

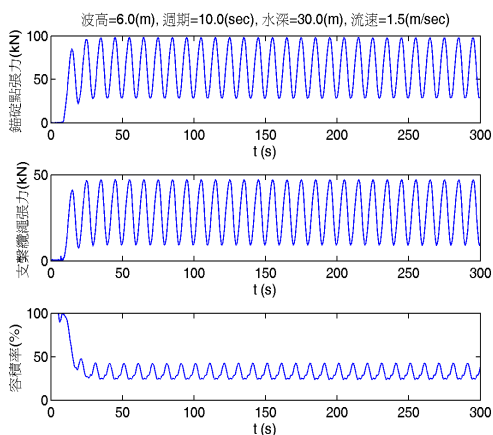


圖 5 單錨複合式箱網於設計風浪條件為 50 年迴歸期颱風作用下產生之錨碇纜繩張力(kN)、支繫纜繩張力及網袋容積率(%)。

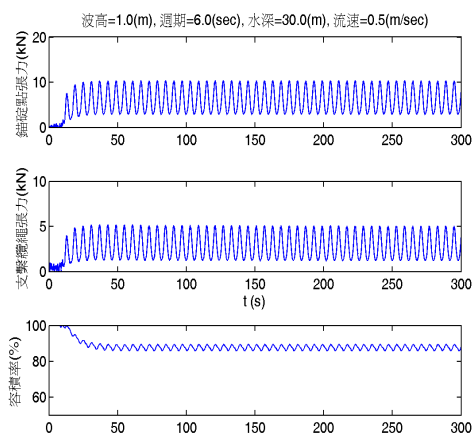


圖 7 單錨複合式箱網平時最大風浪條件作用下產生之錨碇纜繩張力(kN)、支繫纜繩張力及網袋容積率(%)。

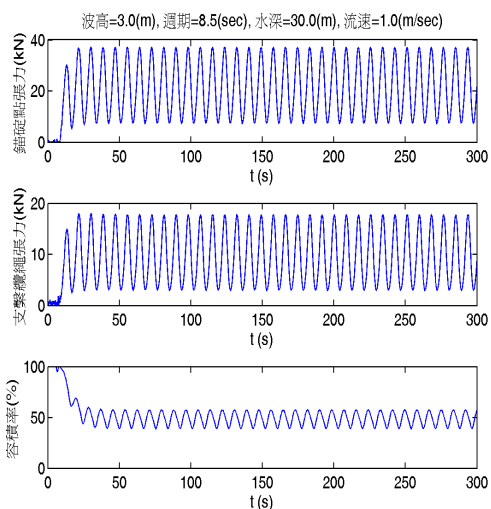


圖 6 單錨複合式箱網於設計風浪條件為一年迴歸期颱風作用下產生之錨碇纜繩張力(kN)、支繫纜繩張力及網袋容積率(%)。

表 2 複合式箱網的放大圖

風浪條件		箱網形式	
		單錨複合式箱網	傳統單錨式箱網
50 年迴歸期颱風	最小網袋容積率(%)	26.6	26.9
	錨碇纜繩最大張力(kN)	98.1	90.1
一年迴歸期颱風	最小網袋容積率(%)	41.2	41.6
	錨碇纜繩最大張力(kN)	37.2	32.9
平常無颱風最大風浪條件	最小網袋容積率(%)	84.3	84.8
	錨碇纜繩最大張力(kN)	10.3	7.2

四、結論

本研究主要探討單錨複合式箱網結構受波浪及海流聯合作用下產生運動行為及錨碇纜繩張力，結論及建議如下：

1. 小琉球 50 年迴歸期颱風風浪、一年迴歸期風浪設計條件及平常無颱風可能最大風浪條件時，其在規則波下則單錨複合式箱網結構與傳統單錨式箱網結構之錨碇點纜繩最大張力與網袋容

積率差異不大。

2. 傳統單錨式箱網與單錨複合式箱網之比較，在有、無吊掛牡蠣框架時，單錨複合式箱網的網袋容積率會有縮小的趨勢，此乃因牡蠣框架的吊掛會產生遮蔽效應，同時會產生衝擊力，所以錨碇點纜繩最大張力會大些。
3. 單錨複合式箱網結構在平常無颱風可能最大風浪條件時，在規則波其網袋容積率為 84.3%；但在小琉球 50 年迴歸期颱風風浪情況時，卻發

生網袋容積率為 26.6%，顯示網袋縮減嚴重，會導致魚群嚴重死亡，因此有必要改善箱網結構例如在箱網前方設置矩形框架，以減少網袋的縮小，增加魚群的生存空間。

4. 由結果可知，一般箱網在設計上安全係數約為 1.5~2 倍，所以箱網結構皆可承受風浪的侵襲，而本箱網主纜繩係由小琉球 50 年回歸期風浪設計，使用直徑 50mm 的 PP 纜繩，其破斷強度為 347.37kN，遠大於本數值模擬的最大張力結果，顯示箱網的結構應可安全無虞。
5. 本研究主要是以一口單錨式箱網做基準，而數值模擬不規則是非常耗時，所以若要發展為多口單錨式箱網，則建議將數值模擬演算平行化，以減少時間的消耗。
6. 本研究現階段是屬於數值模擬階段，僅針對複合式箱網養殖設施結構進行研究。未來將針對實際外海情況加以探討，同時進行實際海上複合式養殖，若成效不錯，則可推廣大範圍養殖，增加產能及產值。
7. 牡蠣框架也不能吊掛過多，因浮框之浮力除需承載網袋及網底配重外，若加掛太多牡蠣框架，重力會大於浮力產生下沉現象，而致箱網下沉至海底造成損壞，因此整體結構浮力之檢驗有其必要性。

參考文獻

1. 陳陽益、莊文傑(1990)「波流交會作用理論之初步探討」，第十二屆海洋工程研討會論文集，第 248-265 頁。
2. 潘仁雅(2007)單錨式箱網結構改善及錨碇纜繩老化風險分析研究，國立中山大學海洋環境及工程學系碩士班碩士論文。
3. Brebbia, C.A. and Walker, S. (1979) "Dynamic analysis of offshore structures," *Newnes-Butterworths*, London, pp .109-143.
4. Fredriksson, D.W., Steppe, C.N., Wallendorf, L., Sweeney, S. and Kriebel, D. (2010) "Biological and hydrodynamic design considerations for vertically oriented oyster grow out structures," *Aquacultural Engineering*, Vol. 42, pp. 57-69.