OAC-UNIV-108-022(研究報告)

浪流作用下複數箱網斷纜及脫錨數值研究

(成果報告)

海洋委員會補助研究

中華民國 108年 11月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考,並不代表該會政策,該會保留採用 與否之權利。」 OAC-UNIV-108-022(研究報告)

浪流作用下複數箱網斷纜及脫錨數值研究

(成果報告)

學校:國立中山大學

指導教授:葉博弘教授

學生:温子傑

研究期程:中華民國 108年05月至108年12月

研究經費:新臺幣貳萬元

海洋委員會補助研究

中華民國 108年 11月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考,並不代表該會政策,該會保留採用 與否之權利。」

| 表 | 次 | | 3 |
|----|----|-------------|----|
| 圖 | 次 | | 4 |
| 摘 | 要 | | 5 |
| 第− | ·章 | 前 言 | 6 |
| 第一 | ·節 | 研究緣起 | 6 |
| 第二 | 節 | 問題背景 | 8 |
| 第三 | 節 | 現況分析 | 8 |
| 第四 | 節 | 研究目的 | 9 |
| 第五 | 節 | 預期目標 | 9 |
| 第二 | 章 | 研究方法與過程 | 10 |
| 第一 | ·節 | 波流場與構件之基本假設 | 10 |
| 第二 | 節 | 構件之外在受力 | |
| 第三 | 節 | 數值模擬 | 15 |
| 第四 | 章 | 結果與討論 | 18 |
| 第一 | ·節 | 模擬試驗配置 | |
| 第二 | 節 | 結構物纜繩之受力 | |
| 第二 | 節 | 斷纜後浮球運動分析 | |
| 第王 | ī章 | 結論 | 24 |
| 參考 | 資 | 61 | 25 |

表 次

| 表格 | 1 | 模擬試驗配置表1 | 8 |
|------|---|-------------------|---|
| | | | |
| 韦枚 | 2 | <i>嬙</i> 繩之最大張力 2 | 0 |
| 1110 | - | | Ő |
| 主枚 | 3 | 河球动艇广播公司县公府投票 2 | r |
| 化俗 | 5 | 仔坏於劉篪恆之取饭泣物里 | 4 |

圖 次

| 晑 | 1 箱網構造示意圖(俯視) | 6 |
|---|-------------------------|-----|
| 昌 | 2 箱網構造示意圖(側視) | 7 |
| 昌 | 3 數值模式程式流程圖 | .17 |
| 昌 | 4 Case 1、2、7、8 配置 | .19 |
| 昌 | 5 Case 3、4、9、10 配置 | .19 |
| 昌 | 6 Case 5、6、11、12 配置 | .19 |
| 昌 | 7 Case1 至 Case6 模擬結果 | .20 |
| 昌 | 8 Case1 至 Case6 纜繩受張力情形 | .21 |
| 昌 | 9 Case7 至 Case12 浮球運動軌跡 | .22 |
| 圕 | 10 Case7 至 Case12 之模擬結果 | .23 |

摘要

海上箱網為國內近年來逐漸興起的養殖漁業方法,而單錨式浮球為此結構物 重要的構件之一。本文旨為分別在純波浪場與波流交互下,以數值模式模擬單錨 式浮球的受力情況以及當發生斷纜後的浮球運動軌跡。本文應用質量集結點法 (Lumped mass method)將結構物分為元素與節點,並利用 Morison 方程式計算各 節點之受力大小。此外,本文也利用四階龍格一庫塔法(Runge-Kutta 4th order method)求解運動方程式中下一時間步之各節點位移與速度,模擬浮球的運動軌 跡。藉由模擬結果計算單錨式浮球中纜繩的張力大小,並以此作為海上箱網纜繩 強度設計之相關依據。模擬結果發現若纜繩長度較長時,無論在純波浪場或波流 交互作用下承受的張力皆較低。另外在結構物發生斷纜後,若沒有流的作用時浮 球僅維持周期性的運動,而浪流作用下的浮球則會向流速方向運動,其運動的位 移量可以從流速與時間推算出。

關鍵詞:質量集結點法、單錨式浮球、動力分析

第一章 前 言

第一節 研究緣起

台灣是個四面環海的海島國家,因此國內的海洋資源相當豐富,但由於長期 的過度捕撈以及全球自然環境的變化,使得現今的海外漁獲量已大不如從前。位 於台灣西南沿岸的傳統養殖漁業,也因為土地與水資源的不足,加上近年來環保 意識的抬頭,導致產業的發展受阻。為了突破漁業發展所遇到的瓶頸,新興的養 殖產業技術被開發了出來。其中,海上箱網養殖由於對於陸上土地與水資源的需 求量低,也可以養殖較高的經濟價值物種如海鱺和石斑,因此成為漁民願意 轉型的方法之一。箱網基本構造主要分為錨碇以及蓄養兩大系統,錨碇系統 又細分為錨碇塊(anchor)、錨碇纜繩(mooring line)、支繫纜繩(bridle)、鐵鍊(chain)、 浮子(buoy);而蓄養系統則主要包含浮框(floating collar)、網片(fish net)及沉框(tube sinker)。



圖 1 箱網構造示意圖(俯視)



圖 2 箱網構造示意圖(側視)

對於箱網整體的穩定性而言, 錨碇纜繩與支繫纜繩為箱網最重要的一部分, 纜繩的些微變動可能會影響其他各物件的受力情況, 箱網的容積大小以及移動或 轉動的方向也會隨之改變。然而台灣每年會遭遇約3、4個颱風侵襲, 尤 其七至九月的夏季, 颱風所帶來的颱風浪以及豪雨沖刷山區產生的土 石、漂流木,可能會破壞海上箱網的纜繩,甚至會發生斷纜或拖錨的情形。 除此之外, 船隻在養殖範圍區航行時若稍有不慎, 也可能會造成纜繩的斷裂。總 而言之, 無論是自然或是人為所發生的斷纜與拖錨, 可能因此會改變箱網的受力 大小或是運動方向, 嚴重則會造成箱網的整體破壞, 導致經濟上的損失。

第二節 問題背景

本研究為研究在真實波浪場與流場的海域中,若海上箱網發生纜繩斷掉或脫 錨情況下,箱網中各個物件所受到的外力情況為何,並且利用數值模擬的方法, 探討箱網容積的變化以及其六個自由度之運動方式。藉由本研究的研究,可以設 計出更穩定的箱網構造,即使發生一部分斷纜的情況下也可以保持整體的完整性。 本研究最後會針對箱網做出風險上的相關評估,希望可以讓箱網養殖業者更了解 其潛在的風險因子,或是災害後的保險可以依循相關的根據,並且提供政府制定 箱網的規範,使國內的箱網產業更加興盛。

第三節 現況分析

隨著世界各國對於海洋資源和漁獲的需求量日漸增加,而然全球的魚類資源 卻逐漸萎縮,人們不得不另尋其他方式改善現今的窘境。海上的箱網養殖除了可 以降低對於土地的汙染及需求外,也可以提供豐富的漁業資源,因此成為了傳統 漁業轉型的方式之一。隨著近年來箱網養殖的發展愈來愈蓬勃,對於箱網系統之 運動狀態的相關研究也逐漸增加。

在過去的文獻中,大多分析箱網中單一構件在波浪與流的作用下,其所受到的力量大小以及變形量。在纜繩張力方面,參考王柏升(2006)用質點結點法建立各質點其運動方程式,經由四階的 Runge - Kutta 法求解箱網運動行為來比對單 錨式箱網實際遭受颱風侵襲時之箱網運動及錨碇纜繩張力變化情形。李冠穎(2010)以質量集結點法及將蚵架視為單一剛體並建立數值模式,採用 Morison 經驗公式為理論架構,並應用牛頓第二定律建立運動方程式,再藉由四階的 Runge - Kutta 法求解運動方程式,並以水工模型試驗加以驗證浮筏式蚵架遭受不規則波 流場作用下其纜繩張力反應。在錨碇系統方面,吳聖海(2006)針對海上箱網錨碇 系統所使用之嵌入式鐵錨及重力式錨的抓地力作一系列探討,對於西子灣的砂質

土壤與澎湖底質的粉土進行相關試驗並與理論推算之數值作比對,以訂定鐵錨抓 地力之評估方法。Rocker(1985)提出重力是錨碇塊在凝聚性土壤與非凝聚性土壤 在短期靜態與動態荷重狀況,計算其抓地力,並探討其剪力剪力隼之設計。

第四節 研究目的

前述的文獻中,箱網大多在為一穩定的波浪場與流場,而並非箱網發生斷纜後狀態。然而當箱網遇到斷纜或是脫錨的情況時,可能會因為其運動方向急劇變 化或是容積量的忽然下降而造成箱網中的養殖物種流失或死亡,導致經濟上的損 失。因此本研究將探究箱網發生纜繩斷裂後,箱網的受力大小、運動方向及容積 變化量,並且最終藉此設計出一個穩定完整的箱網系統,以供日後國內養殖漁業 業者在規劃設計階段及日後經營管理之參考依據。

第五節 預期目標

本研究預計於四月開始撰寫複數箱網之數值模型,並在五月中旬完成模式的 建立。原先預期在五、六月時計算箱網的受力大小,並同時著手於分析脫錨、斷 纜後之運動情況,在期中報告時完成箱網的上述兩個目標。期中報告後,計算箱 網容積率變化為八、九月的預計工作,十月的預計目標為擬定箱網相關設計規範 以及撰寫期末報告。

由於本研究於六月份才開始進行,因此原先預期的工作目標皆被拖延。預計 在四、五月所建立的數值模型於七月中才完成浮球、纜繩與錨碇塊的設置,而非 整個複數箱網結構物。經指導老師討論之後決定先進行計算浮球、纜繩與錨碇塊 在波浪場中的受力大小以及探討脫錨、斷纜後之浮球運動情況分析。

第二章 研究方法與過程

第一節 波流場與構件之基本假設

一、 波流場之基本假設

本研究引用陳、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(perturbation approximation method)展開至三階得到之波流共存 場之流速勢通解,而其簡化波流交會後之線性流速勢解如(2)式所示,波流交會後 之延散關係式(dispersion equation)如(4)式所示。

$$\eta = \frac{H}{2}\sin(\vec{\mathbf{K}}\cdot\vec{\mathbf{X}} - \sigma t) \tag{1}$$

$$\phi = \overrightarrow{V_c} \cdot \overrightarrow{X} + \frac{Hg}{2\sigma_e} \frac{\cosh K(h+z)}{\cosh Kh} \cos(\overrightarrow{K} \cdot \overrightarrow{X} - \sigma t)$$
(2)

$$\sigma_e = \sigma - \overrightarrow{V_c} \cdot \overrightarrow{K} \tag{3}$$

$$\sigma_e^2 = gK \tanh Kh \tag{4}$$

其中, $\eta=\eta(x,y,z,t)$ 為波動之自由表面,t為時間, $\vec{\mathbf{K}} = k_x \vec{\imath} + k_y \vec{j}$ 為波數向量, $k_x \cdot k_y$ 為波數在 x、y 方向之投影分量, $\vec{\mathbf{X}} = x \vec{\imath} + y \vec{j}$ 為位置向量, σ 為交會週波率 (wave frequency), $\vec{V_c} = v_x \vec{\imath} + v_y \vec{j}$ 為速度向量, σ_e 為交會週波率(apparent angular frequency), h 為水深, z 為 z 方向距離, g 為重力加速度, $\mathbf{K} = |\vec{\mathbf{K}}|$ 為週波數(wave number)。

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = v_x + \frac{Hgk_x \cosh K(h+z)}{2\sigma_e \cosh Kh} \sin(k_x x + k_y y - \sigma t)$$
(5)

$$v = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} = v_y + \frac{Hgk_y \cosh K(h+z)}{2\sigma_e \cosh Kh} \sin(k_x x + k_y y - \sigma t)$$
(6)

$$w = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{HgK\sinh K(h+z)}{2\sigma_e \cosh Kh} \cos(k_x x + k_y y - \sigma t)$$
(7)

將(5)式至(7)式個別對時間 t 微分後,可得三維之局部加速度場,如下所示:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{Hgk_x\sigma\cosh K(h+z)}{2\sigma_e\cosh Kh}\cos(k_xx + k_yy - \sigma t)$$
(8)

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{Hgk_y\sigma\cosh K(h+z)}{2\sigma_e\cosh Kh}\cos(k_xx + k_yy - \sigma t)$$
(9)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{HgK\sigma\sinh K(h+z)}{2\sigma_e\cosh Kh}\sin(k_x x + k_y y - \sigma t)$$
(10)

二、 構件之基本假設

本研究中,浮球與纜繩之相關尺寸設定如下所示:

假設浮球為直徑 1.10 m、高度為 1.30 m 的圓柱體,其總重為 480 kg 且慣 性力係數為 1.50。纜繩之直徑為 0.05 m,密度為 940 kg/m^3,每單位長度之重 量為 1.52 kg/m,慣性力係數為 1.52。

第二節 構件之外在受力

海上結構物所受到的環境外力主要有風、浪與流,但本研究中將不考慮風力, 因此可將外在受力分為流阻力及慣性力、浮力、重力、纜繩之張力。

一、 流阻力及慣性力

由於浮球與纜繩相對於波流場而言相當微小,因此可以視其為小構件(small body)。流阻力中的摩擦阻力(friction drag)因為相對形狀阻力(form drag)的影響甚小,因此可以將其忽略。慣性力包含 Froude-Krylov Force 以及附加質量力(added mass force)。本研究引用 Morison 經驗公式,來計算浮球與纜繩所受之流阻力及 慣性力。

$$\vec{F} = \vec{F_D} + \vec{F_I} = \rho C_D A \frac{\vec{V}|V|}{2} + \rho \forall C_M \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$$
(11)

$$C_M = 1 + K_m \tag{12}$$

其中 \vec{F} 為流阻力 $\vec{F_D}$ 與慣性力 $\vec{F_I}$ 之總和, ρ 為流體密度, C_D 為流阻力係數, C_M 為慣性係數,A為結構物在流速方向的投影面積, \vec{V} 波流場速度, \forall 為結構物體積, K_m 為附加質量係數。

當此系統之構件與流體粒子同時發生運動時,則依 Brebbia and Walker(1979) 之建議將無相對運動之 Morison 經驗公式修改成具有相對運動之 Morison 公式。

$$\vec{F} = \rho C_D A \frac{\overrightarrow{V_R} |V_R|}{2} + \rho \forall K_m \frac{\partial \overrightarrow{V_R}}{\partial t} + \rho \forall \frac{\partial \overrightarrow{V}}{\partial t}$$
(13)

$$\overrightarrow{V_R} = 1 + \vec{R} \tag{14}$$

其中**V**_R為水粒子與構件之相對速度, **R**為構件運動速度, (13)式右邊第一項 為相對運動造成之流阻力, 第二項為附加質量力, 第三項為排開水體之慣性力。 繼續推導上式以及整理如下。

二、 重力
重力
$$\overrightarrow{F_W}$$
是構件本身質量受地球之重力場吸引所產生的力。
 $\overrightarrow{F_W} = m\overrightarrow{g}$ (17)

其中,重力加速度 $\vec{g} = -g\vec{k}$,計算時定義 z 軸向上為正。

三、 浮力

浮力**F**_B是由於構件浮在水中時,構件表面在水面下不同位置的壓力差而產生的,其基本定義為液體排開構件之體積乘以液體密度。

$$\overrightarrow{F_B} = -\rho \forall \overrightarrow{g} \tag{18}$$

四、 張力

張力Fr是彈性物體在受力伸長變形後的恢復力,定義上張力為受力截面積與 其應力之乘積,在本研究中只需求得纜繩之張力。

$$\overrightarrow{F_T} = A\sigma = AC_1 \varepsilon^{C_2} \tag{19}$$

$$\varepsilon = \frac{(l-l_0)}{l_0} \tag{20}$$

其中,A為受力截面積, σ 為應力, ε 為應變量, C_1 、 C_2 為構件之彈性數,本 研究中將 C_1 取為1, C_2 則取70245672, l_0 為構件之原始長度,l為構件變形後之長 度。

將(11)式加入浮力、重力以及張力後可以得到結構物的外力總和。

$$(m + \rho \forall K_m) \frac{\partial \vec{R}}{\partial t} = \vec{F_D} + \vec{F_I} + \vec{F_B} + \vec{F_W} + \vec{F_T}$$
(21)

第三節 數值模擬

一、 質量集結點法

在計算浮球與纜繩之受力大小為時,將構件理想化為一組有限段之剛體構件, 稱為有限段方法(finite segment method)。此法在構件質量分佈的假設上又可細分 為均佈質量法(consistent method)與質量集結點法(lumped mass);前者假設質量均 匀的元素分布於構件長度上,後者則假設元素的質量集中於節點上。

因構件具有長度,可以用來計算各種外力如慣性力、流阻力、張力、浮力及重力。使用上習慣將節點與元素依序編號,並列出節點與元素之間的相關性,便可利用構件對應節點之關係,將構件所受的總和外力平分到相關節點上。

二、 Runge-Kutta 法

Runge-Kutta 法為一種常見於解非線性常微分方程的方法。本研究在模擬浮 球與纜繩之運動過程時,須求解各個質量集結點的運動微分方程式,即 $\Sigma F = m \ddot{X}$, 以得到下一時刻之位移 X 及速度 \dot{X} 。利用四階 Runge-Kutta 法可以將此運動微分 方程式求解,須先將型式轉換為 state-variable form (即 $\ddot{X} = \Sigma F/m$),可以同時求出 所有質點在 t 時刻之位置{ x_t },以及經 Δt 時間後的質點位置{ $x_{t+\Delta t}$ },其中 Δt 為時 間步階(time step)。

三、 計算機程式流程

本研究數值模式以MATLAB程式撰寫,程式分為主程式以及副程式Derivs、 Force、Velocity、Buoy、Cd、Rk4、Animate。主程式為輸入海象條件(如波高、週 期、水深、海流流速等)、計算波浪相關常數以及各構件之相關尺寸特性,再利用 質量集結點法將構件切分成均匀等長的元素並建立元素與相對應的節點之間的 對應關係。接著設定計算時間*t_{max}*和時間步Δt並開始迴圈,在迴圈中先呼叫 Derivs 副程式建立運動方程式。Derivs 副程式會先呼叫副程式 Force 來計算所有 元素所受之外力總和並平均分佈給相關節點,最後建立運動方程式。在這一過程 中,副程式 Force 也會另外呼叫副程式 Velocity、Buoy 與 Cd, Velocity 為是用來 計算波浪場之速度與加速度,並利用 Cd 所算出各構件的阻力係數來計算波流場 中之慣性力、流阻力。副程式 Force 也一併計算節點之重力、張力與浮力,其中 浮球的浮力利用 Buoy 副程式計算出的。

副程式 Derivs 接著將 Force 得到的聯立運動方程式帶入另一副程式 Rk4 中的 Runge-Kutta 法解聯立運動方程式,並將各個節點的位置座標回傳給主程式。 回傳後主程式接著會檢查是否完成計算時間,若否則繼續迴圈,若是則將所有時間步的各節點位置傳給副程式 Animate 輸出圖片與影片。



圖 3 數值模式程式流程圖

第四章 結果與討論

第一節 模擬試驗配置

本研究分別探討浮球與纜繩在未斷纜以及與斷纜後之受力與位移變化。波浪 條件皆為水深 20m、波高 3.0m、週期 8.5 sec。實驗配置分為十二組,並以 Case1 至 Case12 命名。其中 Case1 至 Case6 為結構物尚未斷纜前之狀態, Case7 至 Case12 則為結構物在 8.5 秒時發生斷纜後之運動模擬,其他海象資料如週期、水 深等以表(1)所示,而結構物之初始位置狀態則以下圖所示。本研究之成果將以結 構物纜繩受力與斷纜後浮球之運動狀態進行探討。

| | 波高 (m) | 週期 (sec) | 水深 (m) | 繩長 (m) | 流速 m/s | 狀態 |
|------------------|--------|----------|--------|--------|--------|---------|
| Case1 | | | | 20 | 0.0 | |
| Case2 | | | | 20 | 1.0 | |
| Case3 | | | | 40 | 0.0 | 未發生斷 |
| Case4 | | | | 40 | 1.0 | 纜 |
| Case5 | | | | 60 | 0.0 | |
| Case6 | 2 | 05 | 20 | 00 | 1.0 | |
| Case7 | 3 | 8.3 | 20 | 20 | 0.0 | |
| Case8 | | | | 20 | 1.0 | |
| Case9 | | | | 40 | 0.0 | 於 8.5 秒 |
| Case10 Case11 | - | | | 40 | 1.0 | 發生斷纜 |
| | | | | 60 | 0.0 | |
| Case12 | | | | 00 | 1.0 | |

表格 1 模擬試驗配置表







圖 5 Case 3、4、9、10 配置



圖 6 Case 5、6、11、12 配置

第二節 結構物纜繩之受力

模擬結果後結構物之纜繩所受到的最大張力如下表所示,可以發現繩長為水深1倍時(Case1、2)所受到之最大張力比其他兩組繩長還大,而3倍(Case5、6)則較小,但水深1倍時較難分辨流作用是否會影響兩者張力。其他兩組繩長中, 當結構物處於僅波浪場即流速為零時(Case3、5)之最大張力比波流交會之情狀下 (Case4、6)還小,2倍水深之繩長中有波流作用為僅波浪作用的3.7倍,而3倍水 深繩長為近5倍。

| | 最大張力(N) |
|-------|----------|
| Case1 | 13231.84 |
| Case2 | 11506.13 |
| Case3 | 1400.57 |
| Case4 | 5238.02 |
| Case5 | 968.98 |
| Case6 | 4810.58 |

表格 2 纜繩之最大張力



圖 7 Case1 至 Case6 模擬結果



圖 8 Case1 至 Case6 纜繩受張力情形

第二節 斷續後浮球運動分析

模擬時間為 10 個波浪週期 t=85 sec,並於一個週期時(t=8.5sec)發生斷纜, 表 3 為浮球最後之位移量。圖 5 為浮球運動側視軌跡,其中僅位於波浪場中的結 構物(Case7、9、11)之浮球皆呈現 z 方向的週期性運動,在 x 方向並沒有明顯的 變化。而位於波流交會中的結構物(Case8、10、12)之浮球在 x 方向變化則相較明 顯。當流速為 1.0 m/s 且運動時間為 t=8.5 sec 到 t=85 sec 時,可以估算浮球的最 後位移量為 76.5 m。

| | 浮球最後之位移量(m) |
|--------|-------------|
| Case7 | 7.99 |
| Case8 | 87.17 |
| Case9 | 7.25 |
| Case10 | 74.87 |
| Case11 | 11.20 |
| Case12 | 70.42 |

表格 3 浮球於斷纜後之最後位移量



圖 9 Case7 至 Case12 浮球運動軌跡



圖 10 Case7 至 Case12 之模擬結果

第五章 結論與建議

本研究由以上結果可以得到以下結論,當位於波流相互交會中的浮球纜繩所 受到的張力相對於僅波浪作用的還大,尤其纜繩較長時兩者更為明顯。當浮球初 始位置在錨錠塊正上方,即纜繩長與水深相同時,纜繩所受到的張力會比其他長 纜繩還大許多,同時是否有流的作用也不太會影響其張力。因此考慮到真實海面 為波浪與海流交互的情形,建議纜繩長度為水深3倍以降低纜繩張力。

在結構物發生斷纜後,當沒有流的作用時,浮球僅維持周期性的運動,而浪 流作用下的浮球則會向流速方向運動,其運動的位移量大致可以從流速與時間推 算出。

本研究因為時間所限因此僅完成纜繩與浮球之模擬,兩者構件在箱網結構物 中作為基本的安定作用,對箱網是不可缺少的重要要件。完成纜繩與浮球的模擬 建立後,未來建議將依序加入其他構件以更完整的建置箱網結構物,同時後續也 須進行水工模型試驗相互驗證,以保持本研究之真實性。

參考資料

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。

 王柏升(2006)單錨式箱網現場實驗研究,國立中山大學海洋環境及工程學系 碩士論文。

 吴聖海(2006)海上箱網錨碇物抓地力在砂質底床之研究,國立中山大學海洋 環境及工程學系碩士論文。

 潘仁雅(2007)單錨式鄉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論文。

5. 李冠穎(2010)外海浮筏式蚵架動力分析,國立中山大學海洋環境及工程學系 碩士論文。

6. Blevins, R.D. (1984) Applied fluid dynamics handbook, Van Nostrand Reinhold Company.

7. Huang, C.C., Tang, H.J., and Liu, J.Y. (2008). Effect of waves and current on gravity-type cages in the open sea. Aquacultural Engineering, 38(2), 105-116.