

颱風對小型圓框沉下式箱網之結構與深度之影響

楊清閔·賴繼昌·黃星翰·何珈欣·翁進興·藍揚麒*

行政院農業委員會水產試驗所沿近海資源研究中心

摘要

國內外常有颱風侵襲箱網養殖場並造成養殖魚類全死亡或逃逸，造成養殖業者莫大損失之事件。臺灣夏秋期間經常有颱風來襲，部分箱網養殖業者採用圓框沉下式箱網 (submersible cage)，使整組箱網沉入離海表面約 20 m 水深處避開海面強流與強浪，但卻無法得知箱網於水下的變化情形。本研究以實際箱網養殖場之小型圓框沉下式箱網 (網框直徑 16 m、網深 8 m)，結附 9 個水深計於箱網四周測點上，並設置 1 組流速流向儀，藉以觀測颱風前後箱網於水下的深度變化與養殖海域之流向與流速。無颱風時，箱網於水下各測點均能保持穩定深度，養殖海域海流流速超過 20 cm/s 時，易使網具上浮，造成容積比減少。莫蘭蒂颱風中心通過養殖海域時，海流流速超過 30 cm/s 且持續約 3 hr，最高流速可達 41.6 cm/s，且維持約半小時；箱網由水深 20 m 處上浮至 5 - 8 m，且箱網發生嚴重變形。馬勒卡颱風中心未經過養殖海域，但亦造成箱網上浮，且網片嚴重變形，使得養殖空間遭壓縮變小。本研究可提供箱網養殖產業在開發抗強流箱網及提升水下固定網形與水下錨碇技術的參考依據，並探索減少下沉箱網網具變形的的方法，降低養殖魚類的死亡率。

關鍵詞：莫蘭蒂颱風、網具變形、箱網水下深度變化、網具上浮

前言

過去十餘年來，箱網養殖場域已由風浪較小的內灣水域逐漸朝向近海或灣外等離岸較遠、水深較深的海域進行設置 (Lader and Enerhaug, 2005)，以因應箱網設施大型化與養殖規模擴大而發生養殖海域空間不足，及避免沿岸或內灣箱網養殖所產生的殘存餌料、魚類排泄物堆積與大雨過後河川污染水注入而影響水質等問題。海面設置箱網網具易受潮流與波浪的影響而變形，進而造成養殖有效容積縮小 (Yoichi *et al.*, 1985; Nagamatsu *et al.*, 1986; Wang *et al.*, 1993; Yu, 2000)，湍急潮流之下亦可能造成網具的破損與流失 (Qu *et al.*, 2011)。此外，箱網結構變形與網片褶皺會縮小養殖空間，提高魚群密度，易使魚體摩擦網片及造成魚群緊迫壓力，易影響魚類行為、活力與成長 (Huang *et al.*, 2007; Lien *et al.*, 2007)。綜上所述，養殖魚類易因箱網容積減少而降低其成長率、提高死亡率，造成箱網產業巨大損失。

臺灣於夏秋期間颱風侵襲頻仍，使用圓框沉下式箱網 (submersible cage) 養殖的業者於颱風來襲前，會將浮於水面之網框進行灌水，使箱網沉入離海表面約 20 m 水深處，以避開海面的強流、強浪與大雨造成海面鹽度減低的影響。然而，即使將箱網沉入水中，仍可能會受到海流影響造成箱網結構變形擠壓養殖空間，讓箱網中的養殖魚群受傷或死亡，以及養殖場域硬體與錨碇設施上的破損。因此，箱網養殖場域之海況與颱風來襲之因應措施，直接關係到養殖收益成效，而透過颱風前後箱網結構變形與上浮情形之研究，可提供箱網養殖產業因應颱風的重要資訊。

颱風期間使用監測儀器進行養殖箱網之網具結構及深度變化之研究極為困難，且儀器損害風險高，因此，該方面之研究相當缺少。現地實測箱網變形的試驗方面，DeCew *et al.* (2013) 採用聲學方法 (接受器、聲波發射器、水下聽音器) 監測部署在海流中的小型箱網，即時獲取其位移與變形數據。Klebert *et al.* (2015) 分別運用 19 與 6 個壓力式感應器結附於箱網及底網網框上，觀測海流流速影響箱網容積變化。Dong *et al.* (2021a) 以水槽試驗測量柔性箱網網袋內部和周圍阻力、箱網

*通訊作者 / 高雄市前鎮區漁港北三路 6 號 ; TEL: (07) 821-8103 ext. 219; E-mail: yclan@mail.tfrin.gov.tw

變形和水槽流場中的網形變化。Dong *et al.* (2021b) 以模型試驗和海上實際箱網進行阻力及網形變化試驗。了解颱風經過箱網養殖海域時，對水下之小型圓框沉下式箱網之網具結構及其所在深度之變化，本研究在颱風期前安裝流速流向器於養殖場中，並結附水深計於箱網不同深度位置，觀測颱風來襲前箱網正常使用情形，以及颱風來襲時放沉之箱網各部位的水下深度變化。本研究將有助於產業界瞭解箱網養殖場於颱風來臨時之海流海況，及箱網在放沉後受到強流影響而上浮的變化情形，解決箱網產業界對於現有箱網於水下深度變化及網具變形的疑問，正確地操作箱網下沉，減少箱網下沉後因變形而造成魚類體表的損傷與死亡，並提供箱網養殖產業在開發圓框沉下式箱網時的一些參考依據，減少網具變形以提高生產效能。

材料與方法

本實驗於 2016 年 8 - 9 月間赴屏東縣車城鄉海口港附近海域，離岸約 2 km 處的箱網養殖現場進行監測儀器安裝。養殖用箱網為小型圓框沉下式箱網，網框直徑 16 m、網深 8 m，箱網設置海域水深約 30 m。箱網結構如 Fig. 1 所示，箱網浮框材質採用 HDPE (High Density PE)，管徑 250 mm。箱網網片採用尼龍製黑色無結節方形網目，網線直徑 (D) 為 2.3 ± 0.08 mm，網腳長 (L) 為 33.3 ± 0.98 mm， $D/L=0.07$ 。箱網底部以繩索吊掛重錘，設置 24 個吊掛點，每點各吊掛 25 kg 重錘，合計 600 kg 的底部配重，錘重繩採用直徑 19 mm 之 pp 繩。海面處之箱網外框以 90 度為間隔，設置 1 個直徑 1 m，浮力約 1,000 kg 的浮球，每個浮球以兩條纜線連結於浮框；浮球下纜線連結水下錨碇系統，用於固定箱網位置，連結纜線採用直徑 25 mm 之 pp 繩。在發布陸上颱風警報時，箱網養殖場工作人員搭船出海，收起浮球並利用機具向箱網浮框灌入海水，使箱網緩慢下沉至水下 20 m 左右，以避開海面的強風與波浪之影響。

2016 年 8 月 5 日至 9 月 25 日期間進行流速流向儀及水深計之布設。流速流向儀 (FSI 製，ACM-Plus) 置於海中之重量為 1.8 kg，以超音波測量海流流向與流速，流速準確度在 ± 1 cm/s，流向

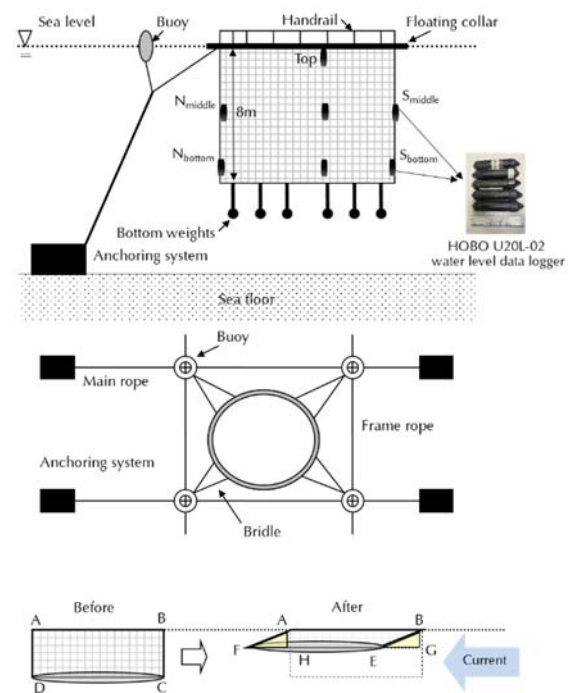


Fig. 1 Diagram of a small round submersible cage.

準確度 ± 2 度。為避免當地海流之流速流向受到箱網袋網的影響，將流速流向儀裝置於鄰近未掛網片之空箱網框水深 5 m 處，每 0.5 hr 記錄一次流速與流向資料，記錄該時段內之平均流速流向及分向流速流向，以 cm/sec 為單位。於颱風期間空箱網未放沉，流速流向計未回收，持續放置原處接收資料。本研究使用之水深計採用 HOBO U20L-02 型水深計，其直徑為 3.18 cm，長度為 15.24 cm，精確度為 ± 3 cm；由潛水人員將水深計裝置 1 支於箱網浮框下水深約 1 m 處，另於水深 4 m 與 7 m 處網具之東、南、西與北等四方各裝置 1 支水深計，共設置 9 點水深計；每半小時記錄 1 次，以量測箱網網片各測點在水下之水深變化。水面 0 m 的基準值採用各水位記錄器取下後，於 10 月 4 - 6 日期間記錄之 96 筆資料的平均值進行校正。在箱網容積比計算方面，以往研究為能準確計算箱網網袋之容積變化而採用複雜計算公式，不利於產業業者的運用，因此本研究在計算網袋容積比採用簡易式圓柱型體積做為參考。原箱網容積為 Fig.1 中之圓柱體 ABCD，則理想箱網容積應為：(網深 8 m) $\times \pi \times$ (網框直徑 16 m/2)²，水流通過網片後速度會被折減 (遮蔽效應)，箱網袋網理應呈現囊狀。假設受潮流變形箱網呈現平行四邊形 ABFE 的形

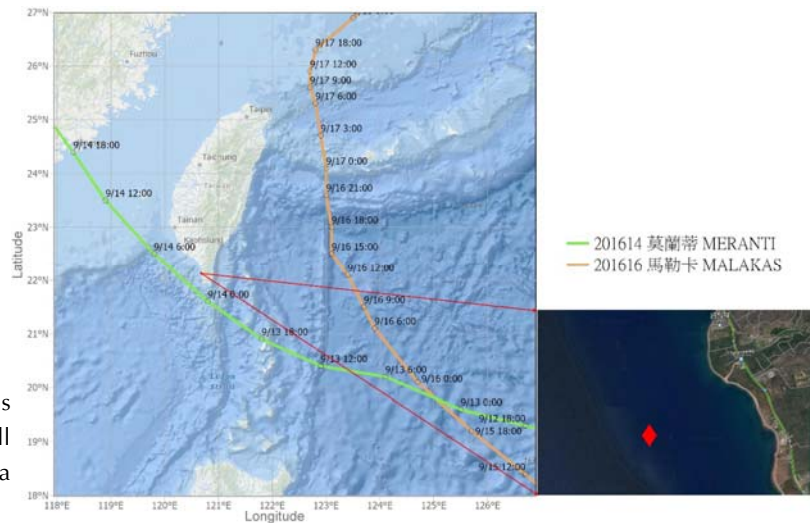


Fig. 2 The moving paths of typhoons MERANTI and MALAKAS. A small round submersible cage is marked by a red diamond.

狀代替，則箱網容積則為： $(EF \text{ 的平均水深}) \times \pi \times (\text{網框直徑 } 16 \text{ m}/2)^2$ ，此時箱網容積比為 $(EF \text{ 的平均水深}) / (\text{理想水深 } 8 \text{ m})$ ，即可簡化為水深深度比計之。依此，區間 NO.1 的箱網容積比為： $[(N7 + S7 + W7 + E7) / 4 - N1] / [\text{區間 NO.1 的平均 } (N7 + S7 + W7 + E7) / 4 - \text{平均 } N1]$ 。假設區間 NO.1 的網深平均值為正常使用下時的箱網網深，則區間 NO.2 的箱網容積比為 $[(N7 + S7 + W7 + E7) / 4 - N1] / [\text{區間 NO.1 的平均 } (N7 + S7 + W7 + E7) / 4 - \text{平均 } N1]$ 。

本實驗期間共經歷 2 次颱風，包括莫蘭蒂與馬勒卡颱風，其行經路徑如 Fig. 2 所示。中央氣象局颱風資料庫 (Typhoon Database) 顯示，第 1 次為編號第 14 號的莫蘭蒂 (MERANTI, 201614)，屬於強烈颱風，臺灣於 2016 年 9 月 13 日 08:30 發布陸上颱風警報，並於 9 月 15 日 11:30 解除。此颱風於 9 月 13 日 14 時中心在恆春東南東方海面，暴風圈進入巴士海峽，同日 23 時暴風圈進入臺灣東南部及恆春半島，於 9 月 14 日 13 - 14 時颱風中心最接近高雄，造成全臺農業損失約 1 億元新台幣。第 2 次為編號第 16 號的馬勒卡 (MALAKAS, 201616)，屬於中度颱風，於 9 月 16 日 08:30 發布陸上颱風警報，並於 9 月 18 日 08:30 解除。此颱風 9 月 16 日 20 時中心在恆春東方海面，暴風圈進入臺灣東南部近海。箱網養殖場依陸上颱風警報的發布與經驗判斷，預警性將箱網下沉躲避颱風。本箱網於試驗期間實際仍有養殖魚類，在颱風過後讓箱網上浮並固定後的投餵

餌料時，可發現少數魚類死亡或表皮受傷。9 月 13 日中午至 9 月 18 日上午放沉時間 5 日，故本實驗期間可分為 3 區間採計資料，箱網深度於資料採計時刪除作業人員上午作業時間，箱網深度的資料採計期間如下所示：

區間 NO.1：8 月 6 日至 9 月 13 日，箱網正常使用，計 1,842 筆 (921 hr)。

區間 NO.2：9 月 13 日中午放沉箱網至 9 月 18 日上午，計 232 筆 (116 hr)。

區間 NO.3：9 月 18 日中午至 9 月 26 日上午，颱風過後箱網恢復正常使用，計 336 筆 (168 hr)。

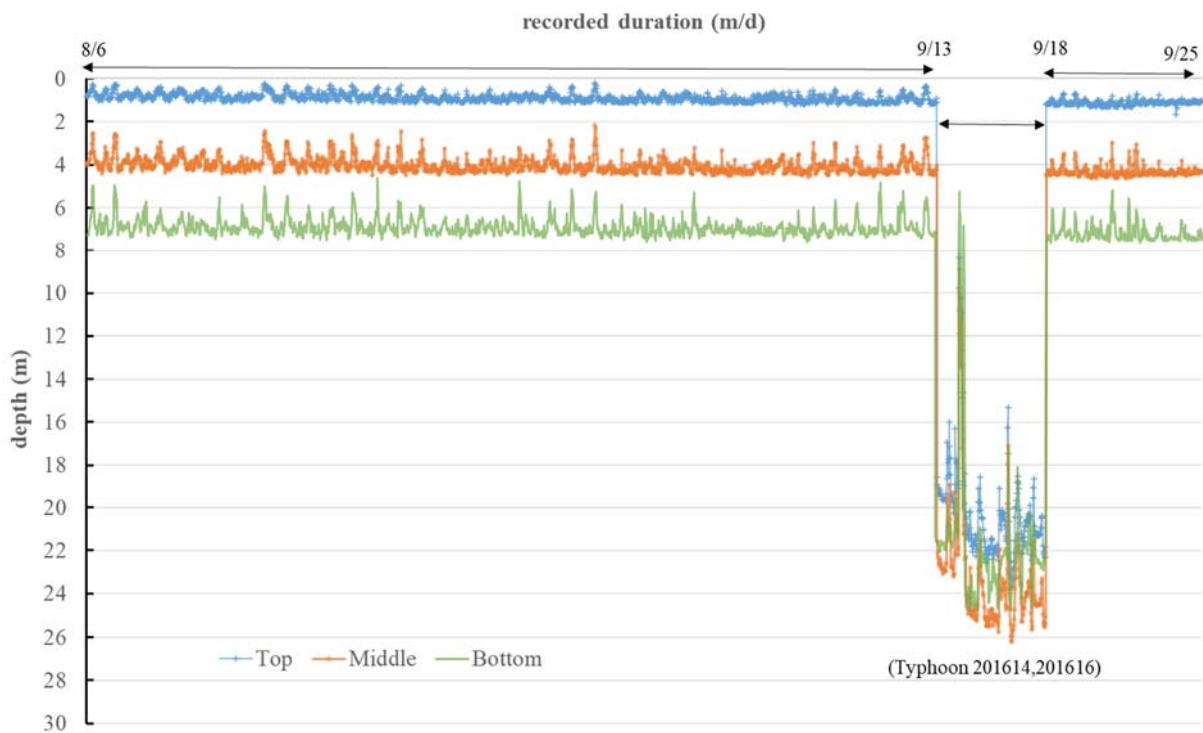
結 果

一、實驗期間箱網各測點水深變化

實驗期間之箱網 9 測點水深位置變化之結果如 Table 1 所示。另外取用網浮框下水深約 1 m 處 1 點及箱網南端水深 4 m、7 m 各 1 點，作為代表箱網上部、中部、底部 3 處之水深位置 (Fig. 3)，由圖可明顯看出區間 NO.2 (9/13 - 18) 為避開颱風，放沉箱網時水深位置急速變化情形。區間 NO.1 為箱網實際使用情形，計測時間 921 小時 ($n=1842$)，箱網上部水位計在 0.9 m 深，箱網中部之北、南、西、東各端點水深分別為 3.7 m、4.0 m、4.1 m、4.0 m，箱網底部之北、南、西、東各端點水深分別為 6.6 m、6.9 m、6.9 m、7.0 m 處。平均值與理想狀態的容積比達 99%，變化不大，可視為

Table 1 During the experiment, the water depths of the depth sensors that were attached to the nine positions of the small, round, submersible cage were measured

Date	Adoption time	Record number	Depth of cage top (m)				position	Depth of cage middle (m)				position	Depth of cage bottom (m)			
			AVG	SD	deepest	shallowest		AVG	SD	deepest	shallowest		AVG	SD	deepest	shallowest
NO.1 8/6-9/13	38.5 days	1842	0.9	0.2	1.2	0.2	N	3.7	0.6	4.5	1.1	N	6.6	0.8	7.7	2.0
							S	4.0	0.4	4.6	2.2	S	6.9	0.4	7.6	4.6
							W	4.1	0.3	4.7	2.4	W	6.9	0.6	7.7	2.9
							E	4.0	0.3	4.5	2.5	E	7.0	0.4	7.6	4.6
NO.2 9/13-18	4.8 days	232	20.2	2.3	23.7	8.3	N	22.1	3.2	25.3	9.0	N	21.0	3.0	24.7	5.6
							S	23.2	2.8	26.2	8.9	S	21.8	3.3	24.8	5.2
							W	23.1	2.9	26.3	9.1	W	20.2	3.1	25.1	7.1
							E	22.4	2.2	25.4	10.3	E	22.2	3.1	25.3	5.8
NO.3 9/18-25	7.0 days	336	1.1	0.1	1.7	0.7	N	3.7	0.6	4.5	1.3	N	6.6	0.7	7.5	3.5
							S	4.3	0.2	4.7	3.0	S	7.2	0.4	7.6	5.2
							W	4.4	0.2	4.9	3.1	W	6.8	0.6	7.6	4.1
							E	4.2	0.3	4.5	2.3	E	7.1	0.4	7.6	5.2

**Fig. 3** During the study period, the water depths measured by depth sensors attached to the top, center, and bottom of a small, circular submersible cage.

本次實驗對照組。以同水深測點比較，箱網北端的測點水深位置標準差較其他端大，可得知箱網北端在實際使用時的水深變化較大，且箱網底部北端的浮起深度最淺達到水深 2.0 m，比較底部平均值的 6.6 m 水深，底部浮起 4.6 m 亦較其他端的差距大。箱網西端底部浮起差距 4 m 次之，東端及南端相對穩定，平均值由底部水深 7 m 處浮起的

最淺水深在 4.6 m 處。區間 NO.2 為避開 14 號、16 號颱風所進行的箱網下沉，計測時間 116 小時 (n=232)，箱網整體下沉水深約在 20 m 處，各測點的水深變動幅度大，尤其是颱風經過時影響最劇，觀測到整個箱網由水深 20 m 處浮起至水深 5 - 8 m 處。本次亦有觀測到原較深的底部浮起較上部或中部大，推測箱網網具整體並無法在水下保持穩定形

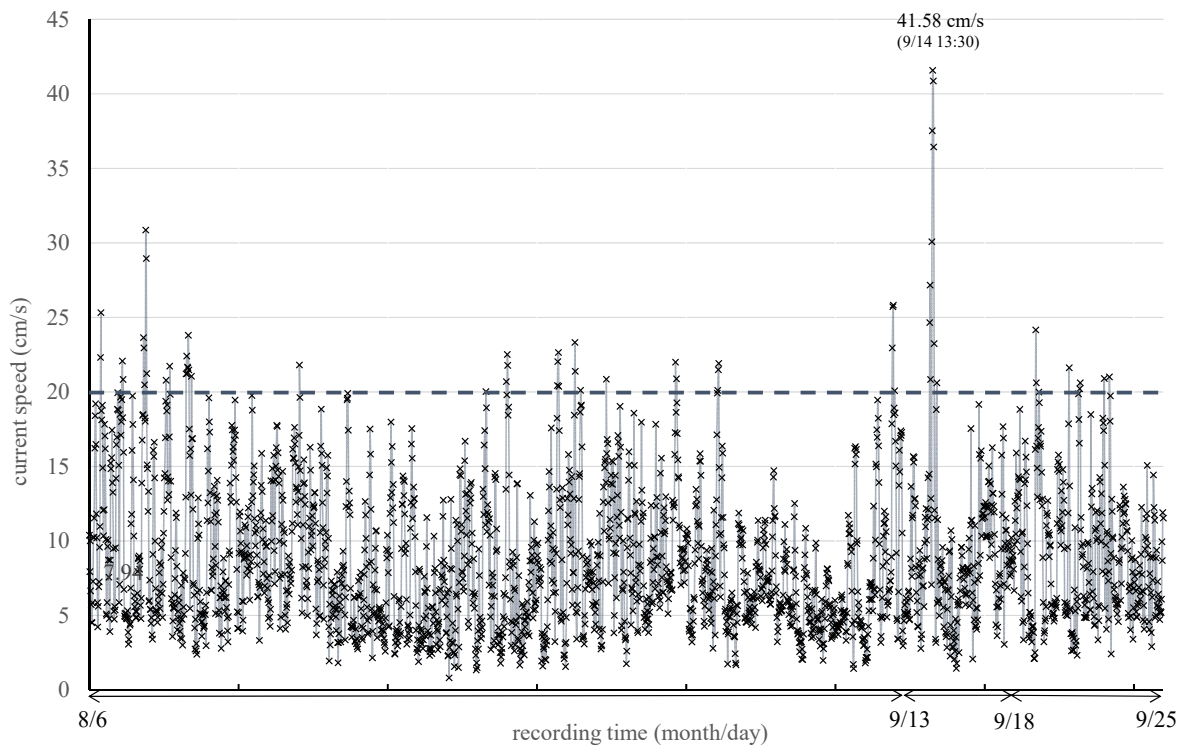


Fig. 4 The velocity of the water current in the vicinity of the small, circular, submerged cage during the study period.

狀，而是呈現橫倒或是上下顛倒（底網穿越浮框）的形態。區間 NO.3 為解除陸上颱風警報後，下沉的箱網恢復至原先狀態，計測時間 168 hr (n=336)，由圖及表均可看出箱網各測點的水深變化與區間 NO.1 相同，箱網上、中、底部恢復至水深 1、4、7 m 處，而箱網北端的測點水深變化較大亦與區間 NO.1 的情形相同。

實驗期間之箱網養殖場流速變化結果如 Fig. 4 所示，區分區間 NO.1、2、3 流速變化，流速整體超過 20 cm/s 共計 60 次，於區間 NO.1 共計 42 次，佔區間 NO.1 監測時段次數的 (42/1,842) 2.3%；颱風通過時之區間 NO.2 共計 10 次，佔 4.3% (10/232)；區間 NO.3 共計 8 次，佔 2.4% (8/336)。由 Fig. 4 可知，9/13 - 18 颱風影響下，養殖場受流速超過 20 cm/s 的次數為常時的 2 倍，影響時間集中持續約 3 - 5 hr，甚至受到流速超過 40 cm/s 以上持續達 1 hr 的影響；而未有颱風時，流速超過 20 cm/s 的情形下，時間約持續 1 - 2 hr。此外，養殖場流速超過 10 cm/s，未滿 20 cm/s，區間 NO.1、2、3 的次數分別為 547 次 (29.6%)、71 次 (30.6%)、120 次 (35.7%)；流速未滿 10 cm/s 之區間 NO.1、2、3 的次數分別為 1,262 次 (68.2%)、151 次

(65.1%)、208 次 (61.9%)。即大致上箱網養殖場約 60 - 70% 的時間，流速未滿 10 cm/s。

區間 NO.1 之箱網水下網形較無劇烈變化，以長時間平均值為基準，若以網具浮起高度上下間距差為容積壓縮比，忽略流向之影響，其不同流速下的變化情形如 Fig. 5，區間 NO.1 的箱網網形大部分保持在容積比 1 以上，養殖場流速未滿 5 cm/s 時，水下網形更為穩定。而流速愈快時，容積比的變化分散幅度增加。養殖場流速超過 20 cm/s，易造成網具上浮，容積比減少。區間 NO.1 容積比最小為 0.45，出現在流速 22.5 cm/s 時；區間 NO.1 僅出現 4 次容積比未滿 0.6，當時的流速均達 20 cm/s 以上。區間 NO.1 流速最快為 30.9 cm/s，容積比為 0.66。

二、颱風通過時之流場變化及小型沉下式箱網水下變化情形

本實驗為避開 2016 年編號第 14 號莫蘭蒂 (MERANTI, 201614) 強烈颱風及編號第 16 號馬勒卡 (MALAKAS, 201616) 中度颱風，箱網放沉 5 日，期間為 9 月 13 日中午至 9 月 18 日上午，計測時間 116 hr (n=232，約 4.8 日)，箱網各測點深

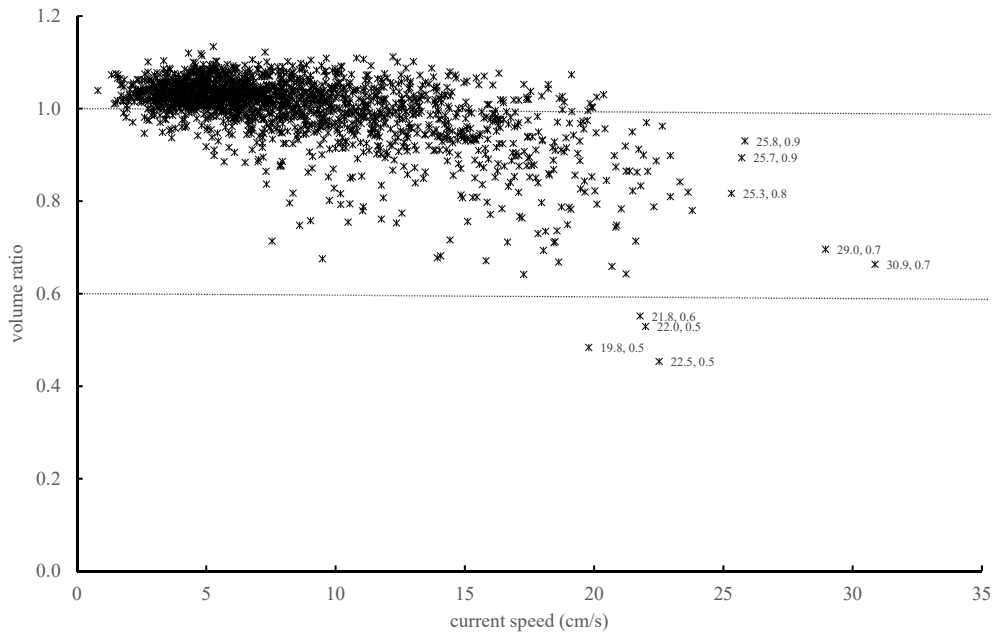


Fig. 5 Relationship between current velocity and cage volume ratio during NO. 1.

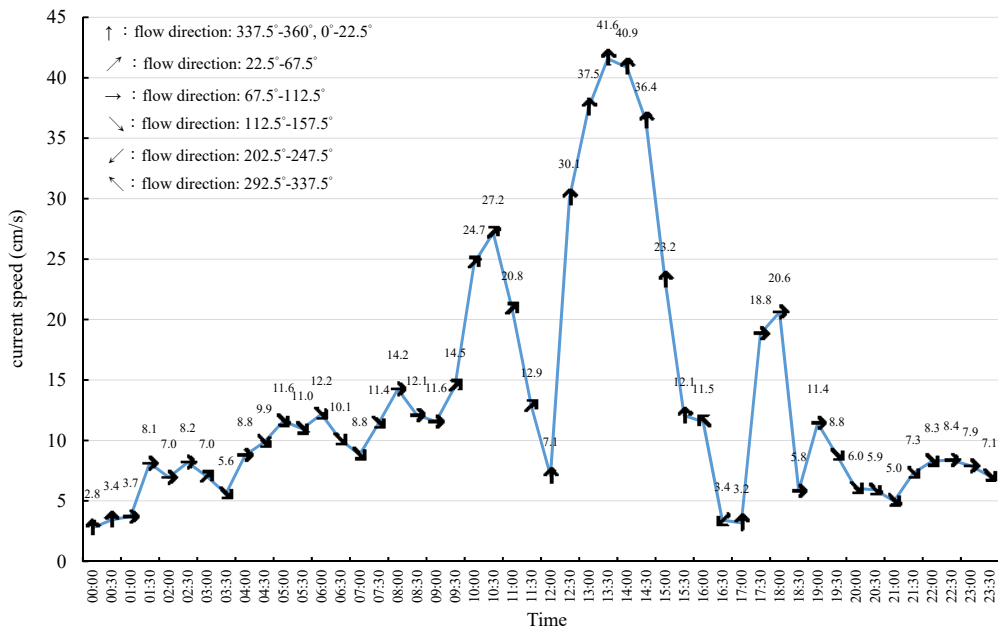


Fig. 6 The velocity and direction of the nearby water when Typhoon Meranti (201614) passed by the cage on September 14.

度位置如 Fig. 3 及 Table 1 所示。箱網下沉後上部水位在 20.2 m 深，箱網中部之北、南、西、東各端點水深分別為 22.1 m、23.2 m、23.6 m、22.4 m，箱網底部之北、南、西、東各端點水深分別為 21.0 m、21.8 m、20.2 m、22.2 m 處，原箱網底部應在水深更深處，但箱網中部水深平均值較底部更深，推測箱網網具整體並無法在水下保持穩定形狀，區間 NO.2 經常呈現箱網橫倒或是上下顛倒的形態。

由 Fig. 2 颱風路徑圖可知 9 月 14 日 13:00 - 14:00 颱風中心最接近高雄，觀測颱風直接侵襲養殖場之 9 月 14 日的 24 hr 養殖場流速流向，結果如 Fig. 6 所示，颱風經過前，14 日的凌晨海流流向以向東、東南流為主 (01:00 - 09:00)，平均流速約在 10 cm/s，之後流向轉向東北流後流速增強，10:00 - 11:00 先有 1 波平均流速超過 20 cm/s 的東北流後流速趨緩，隨後約 12:00 時，流向轉向北流，

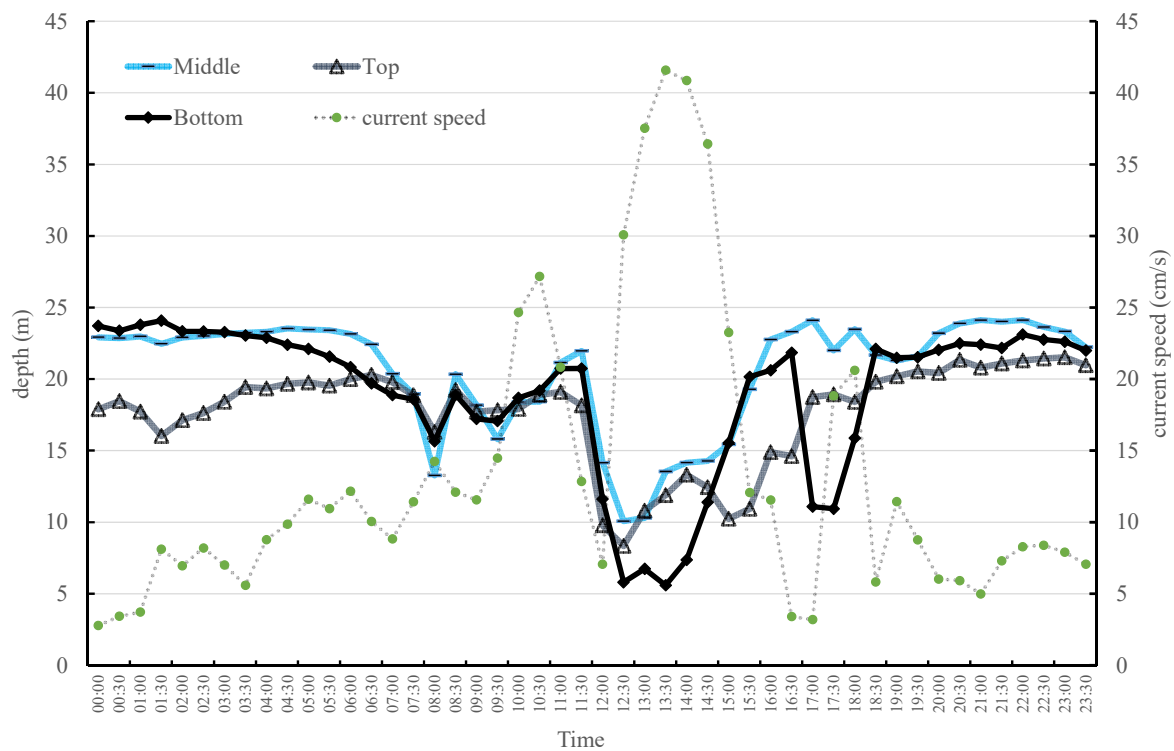


Fig. 7 The current velocity (dashed line) and water depths at three locations of the cage when Typhoon MERANTI (201614) passed by on September 14.

流速急速增強，12:30 記錄到流速超過 30 cm/s 持續約 3 hr，0.5 hr 平均流速最高達 41.6 cm/s。圖中記錄之 13:00 - 14:00 之養殖場流速持續 1 hr 超過 40 cm/s 以上，即颱風中心經過養殖場附近，與中央氣象局記錄之颱風路徑圖經過養殖場的時間點相似。而颱風過後，養殖場的海流流速漸緩，雖仍有 1 波流速超過 20 cm/s 的東流後，海流流向恢復以向東、東南流為主，流速約在 10 cm/s。另外，觀測颱風經過時之箱網下沉後各端於水下深度的 24 hr 變化，因四端的變化趨勢一致，取箱網北端做圖如 Fig. 7 所示，颱風經過前，14 日的凌晨 (00:00 - 03:00)，下沉的箱網尚能保持上部在 18 m 水深，中部及底部在 23 - 24 m 水深處，但此時的箱網底部接近中部，水深幾乎一致，在 7:00 左右之箱網上部、中部、底部的 3 測點幾乎全集中於 20 m 水深處，顯示下沉箱網的水下變形頗為嚴重。而颱風在養殖場附近之時間約 12:30 時，觀測到原應在水下 26 m 深的箱網底部測點浮上至約水深 5 m 處，且底部浮起較中部及上部大，推測箱網呈現上下顛倒 (底網穿約浮框)，網具變形嚴重。此外，詢問養殖場人員得知，在流速強勁時，可能發生箱網底網浮上，並穿越箱網上部浮

框的情形。本次由 Fig. 6 - 7 所示，颱風於 9 月 14 日下午 14:00 - 15:00 時達流速最快，而網底已上浮至水深 6 - 7 m 處，而箱網中部則在最深之 10 - 15 m 處，箱網上部的深度則在二者中間，此情形可判斷應是發生底網浮上穿越浮框情形。颱風經過後，箱網底部回到原水深的趨勢較上部及中部大，但其間上部往上浮起、中部及底部下沉，很難判斷網形變化及其間牽扯的交互作用。尤其觀測到颱風後次 1 波流速超過 20 cm/s 的期間，箱網各測點的水深變化極不一致，箱網底部浮起嚴重近水深 10 m 處，而上部及中部則保持在一定水深約 20 m 處，原間距 6 m 的箱網上部與底部，拉扯至最大間距約達 10 m 且網具上下顛倒。而颱風過後之流速逐漸恢復穩定，但水下箱網上部、中部、底部的 3 測點亦幾乎全集中於 20 m 水深處，箱網測點間距並無恢復正常，推測箱網在水下已擠壓在一起。Fig. 8 當中在極低流速 5 cm/s 以內，就有接近 -1.5 的數值，結果明顯不合常理。比較合理的解釋是，現地實驗受限於儀器記憶體容量和電池工作時限等因素，取樣頻率無法設定太高，而每 30 min 取樣一次的水深和流速，並不足以真實反應波浪週期約 5 - 10 sec 的變化，且水位計和流

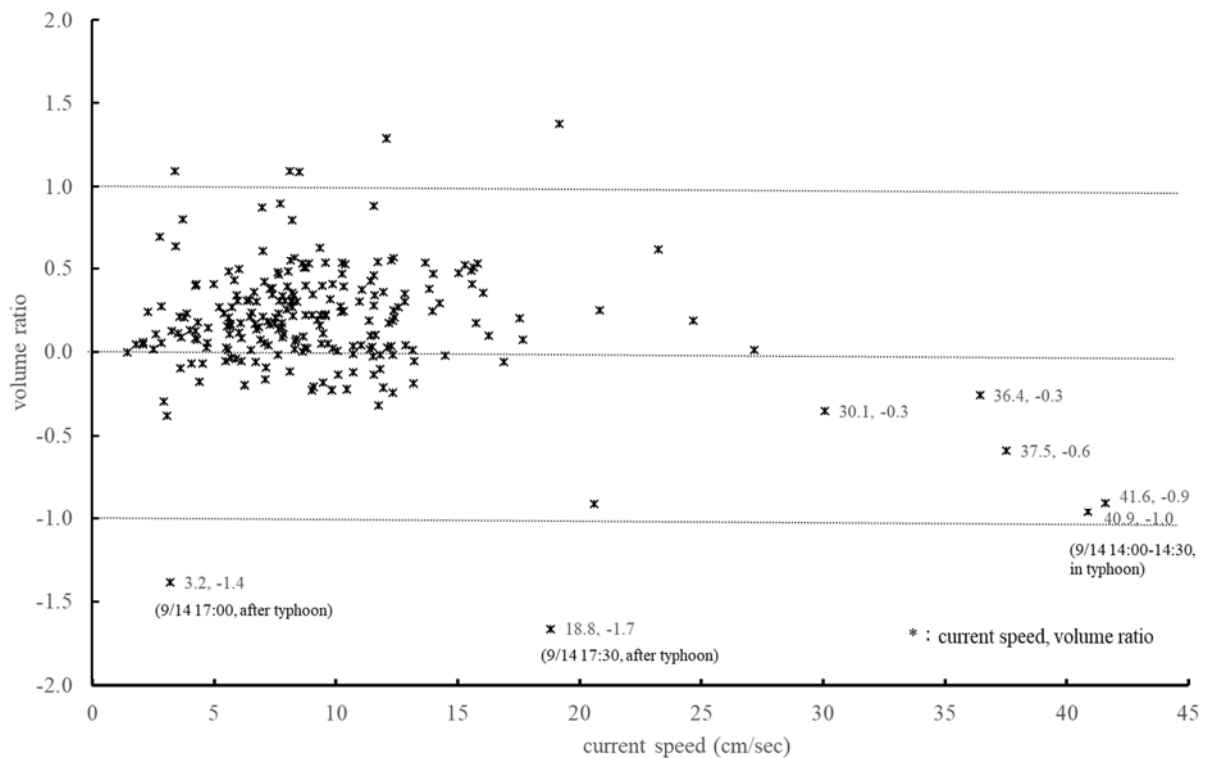


Fig. 8 Relationship between current velocity and cage volume ratio during the NO. 2 period.

速計安裝位置有所距離，雖然儀器可以設定成時間同步紀錄，但會存在動態反應上的時間差，因此會有水位計數據和流速數據對不上的情況。因此測得 9 月 14 日 17:00 之流速在 3.2 cm/s 時，箱網的容積比為-1.4，而下午 17:30 之流速 18.8 cm/s 時，箱網的容積比為-1.7。為避免此類數據無法反應現實情形，後續研究建議可提高儀器的取樣頻率，才能增進網袋變形量測的精確度。

另外，中度颱風馬勒卡 (MALAKAS, 201616) 於 9 月 16 日 08:30 發布陸上颱風警報，於 9 月 18 日 08:30 解除。箱網此時仍沉在水下。依 Fig. 2 - 3 觀察，此颱風於 9 月 16 日 15:00 轉向北，而其暴風圈已進入臺灣東南部近海，故箱網在 9 月 16 日下午 17:00-18:00 時呈現浮起，浮起程度不及莫蘭蒂颱風，但仍有網具上下顛倒或橫倒的情形。

觀察區間 NO.2 之下沉箱網之水下深度的變化較大，以區間 NO.1 長時間平均值為基準，若以網具浮起高度上下間距差為容積壓縮比，忽略流向之影響，其在不同流速下的變化情形如 Fig. 8，由圖可知，區間 NO.2 的箱網容積比分散，養殖場流速未滿 15 cm/s 時，大致在-0.5 - 0.5 之間，而容積比出現負值，可能當時的箱網已呈底網穿越浮

框狀態，箱網底部的浮起已經超過箱網上部所致。而颱風經過時之養殖場流速超過 30 cm/s 時，觀測到容積比均為負值，而流速最大之超過 40 cm/s 的 2 筆，其容積比幾乎達負 1。另外觀察到颱風通過後之次 1 波流速超過 20 cm/s 時，容積比超過-1 的 2 筆資料，下沉箱網之網形變化難以判斷。

討 論

Huang and Wang (2007) 曾在 2005 年 9 月觀測到強烈颱風泰利影響下海流資料，海面流速大於海底流速，而接近海面段的流速有時會呈現突兀情形，推測是因波浪所造成的影響。颱風時最大流速接近 60 cm/s，其餘時段流速在 30 - 50 cm/s 左右。而本研究對 2016 年強烈颱風莫蘭蒂 (No.14) 中心經過箱網養殖場時之水深 5 m 處的 24 hr 流速流向進行觀測，颱風時 0.5 hr 平均流速最大為 41.58 cm/s，流速超過 30 cm/s 持續達 3 hr 以上，颱風來襲時段的流向呈現向北流的情形。雖然海域與環境不同可能造成當地流場流域的差異，但颱風通過時海域流速在 30 - 50 cm/s 左右與本研究觀測相同。

流速對箱網網具變形及容積變化的相關論文當中, DeCew *et al.* (2013) 以聲學方法監測海流中小型箱網變化, 流速 13.8 cm/s 時之箱網容積損失 1.1%, 流速增至 50.2 cm/s 時之箱網容積損失 34%。Klebert *et al.* (2015) 以壓力式感應器結附箱網監測海流流速影響箱網容積變化時得知, 海流流速超過 60 cm/s 時之箱網容積減少 30%, 流速穿過箱網後之內部流速減少 21.5%。Yang *et al.* (2021) 以船速 1 節 (51 cm/s) 拖曳與本實驗相同之箱網時, 底部抬升高度約 5 - 6 m, 箱網容積空間剩 30-35%。Tomi *et al.* (1979) 的研究指出, 箱網受力會隨流速而增加, 並導致容積減小。Wang *et al.* (1993) 指出箱網受流流速達到 20 cm/s 時, 其箱網內容積已降至原來容積之 50%, 甚至更低。而 Weng (1999) 研究得到不同之結果, 流速達 50 cm/s 時, 容積降至原來 50%。Chen (2012) 利用數值模擬的方式, 一年迴歸期颱風之海象條件之波高 3m 與流速 2 節 (100 cm/s) 下, 最小箱網容積率約 41.6%。Lin (2002) 在水槽實驗中得知, 隨流速增加時其箱網容積會明顯變小, 抗力值則明顯變大, 而流速達 50 cm/s 時, 容積比在 0.41。Nagamatsu *et al.* (1986) 利用方形、八角、圓形三種模型箱網, 比較箱網受流後之容積變化, 流速達 0.35-0.5 m/s 時, 三種箱網的容積會減少 50 - 66%, 流速達 50 cm/s 以上, 三者容積比均僅剩 0.5。Lien *et al.*, (2007) 測試實驗, 在流速達 0.5 m/s 時, 有高達 80% 的容積空間減少。Lader and Enerhaug (2005) 實驗低流速 (小於 0.2 m/s) 時箱網變形程度小於 5%, 但高流速時則變形程度劇增。流速高過 0.2 m/s 時網圓柱變形明顯。Huang *et al.* (2008) 指出, 影響網具容積變化之容積減少係數, 流速度 > 波高 > 波週期; 在 0.5 m/s 的流速中, 以波周期較短 (6 sec) 及波高較高 (6 m) 之容積剩餘率在 50% 左右, 波周期漸長及波高漸低時, 則容積剩餘率則有在 60% 以上。Chen (2012) 利用數值模擬的方式, 設定平常沒有颱風時風浪條件之波高 1 m 與流速 1 節 (約 50 cm/s) 下, 最小箱網容積率約 84.8%。由上述之各種模擬試驗, 各文獻中流速對箱網容積的影響所得結果不一, 但均有流速愈快造成箱網的容積減少的趨勢, 流速達 50 cm/s 時, 箱網容積減少 40 - 80%。另外, 依本研究結果, 在未有颱風的情形下, 養殖場 5 m 深的海流最大流速為 30.9 cm/s,

容積率約 66.3%; 而容積率最小為 45.3%, 流速為 22.5 cm/s。流速超過 20 cm/s 雖僅佔觀測時間的 2.3%, 但流速超過 20 cm/s 的時段, 容積比減少的情形明顯。而颱風來襲箱網下沉情形時, 整個箱網由水深 20 m 處浮起至水深 5 - 8 m 處, 流速超過 40 cm/s, 且容積比出現負值, 顯示箱網變形嚴重。此外, 上述數值模擬或水槽實驗等的實驗設定為實驗期間箱網浮框在上方網底在下方, 但經由本研究實際觀測養殖場箱網後得知, 下沉後的穩定箱網雖可呈現呈現如同在水上的圓餅狀, 但在颱風或強流經過時, 下沉箱網整體浮起, 且可能呈現橫倒或顛倒的狀態, 或是網片壓縮等難以判斷的狀態, 在其他研究中並未考慮到此一情形, 而箱網上浮且上下顛倒 (底網穿約浮框) 的容積率呈現負值, 亦未在其他研究中出現。因此建議未來的水槽試驗或數值模擬時, 可考慮箱網可能在水下橫倒、顛倒或壓縮的綜合情形考慮進去。此外, 本次觀測到箱網有上下顛倒或網形難以判斷的情形發生, 而本研究僅結附箱網水下各測點水位計進行監測, 水位計並無水平移動的測量, 無法描繪實際水下箱網變形或是否發生纏絡的詳細情形。

Zhang (2000) 提及颱風期間將箱網沉入水中可減少錨碇點受力及降低箱網容積變形。Yu *et al.* (2006) 指出箱網之網形隨流速之增加而向水流後方傾斜, 其網底深度隨流速增加而變淺。依 Huang and Wang (2007) 提及颱風期間海面流速大於海底流速, 而接近海面段的流速有時會呈現突兀情形, 推測是因波浪所造成的影響。依本研究觀測此次箱網下沉至 20 m 水深情形來看, 颱風來襲時, 箱網底部已浮起至水深 5 m 處, 因此推測受流速增強而上浮的箱網變形或空間的壓縮將會更為嚴重。而箱網養殖場常提出疑問, 認為放沉箱網後, 雖颱風中心未經過養殖場, 但魚類死亡的情形較颱風來襲時嚴重。經由本次觀察中度颱風馬勒卡 (No.16) 得知, 箱網預警放沉後, 颱風中心雖轉向且離養殖場遠, 但可能暴風圈已影響養殖場海域流況, 造成網具上浮。而箱網上浮後並非呈現理想圓柱狀, 推測箱網結構中僅網框可固定網形, 其下方柔軟的網片隨流上浮, 可能在水下顛倒或擠壓, 甚至穿越浮框, 造成魚群躲避空間不足, 故即使颱風中心未直接侵襲養殖場, 海流造成箱網上浮及容積壓縮與嚴重傾斜是魚類死亡的主要原因。

針對箱網下沉後不易固定網形，未來應分析放沉箱網後固定箱網的技術，以避免箱網整體過度上浮或擠壓，以及思考箱網以不同材質網片修改或增加底部可承受範圍內之下拉與錨碇重量，實驗減少網具變形的的方法。此外，在箱網底部加設沉框可能有助於固定網形，Chen (2012) 提及沉框用來固定箱網形狀以增加養殖空間，因沉框屬於固定形狀之整體運動，可減緩箱網變形的幅度。而重錘式屬於彼此之間獨立運動，對於固定箱網的功能會大折扣。Tang (2001) 指出底部配重系統，沉框式較重錘式可減少箱網變形率 15%。Huang *et al.* (2007) 指出在各最差海況中，箱網使用沉框可提高 10% 的容積減少率，也顯著減小網具形狀變形，減少魚群受網具空間劇烈波動而體表擦傷死亡。本研究亦與養殖場討論加設箱網沉框，但加設沉框後的人員操作與更換網片較為麻煩，可能需要更多的作業經驗，及箱網下沉後是否有助於空間增加，沉框被自然力破壞時，可能造成養殖場錨碇系統更大的損壞等疑慮，因此未來可先利用小型箱網加設沉框的各項實驗，用以解明養殖場對箱網沉框使用的疑問。

結 論

本研究觀測在無颱風情況下，箱網於水下的各測點均能保持在一定深度，容積比可達 99%，養殖場流速超過 20 cm/s 的時間僅佔 2.3%，但易造成網具上浮，容積比減少。箱網網框固定於養殖場水面時，養殖空間並無太大問題，但颱風預警性下沉箱網後，由於水深 20 m 處欲固定網形極不易，且海流造成網具上浮，甚至壓縮變形與網片纏絡，箱網內的魚群可能躲避不及擦傷死亡，嚴重者網具破壞魚群逃逸。故未來實驗時，需考慮以更強的結構與配重進行抗強流影響，或增加穩定箱網結構及水下網形的輔助設備。

在箱網上安裝監測儀器觀測颱風影響極為困難，常伴隨儀器損害的高風險，然而，本研究觀測到在颱風中心通過養殖場海域時，流速超過 30 cm/s 且持續約 3 hr，平均 0.5 hr 流速最高達 41.6 cm/s。下沉的箱網由水深 20 m 處浮起至 5 - 8 m，且箱網可能上下顛倒（底網穿約浮框）及嚴重變形，或者網具及網片的破損。即使颱風中心未經過養殖場，

暴風圈可能影響海況而使箱網上浮，造成空間壓縮與網片嚴重變形，為箱網下沉恢復正常使用後，魚類常發生死亡的主因。未來實驗可朝水下固定網形技術及箱網水下錨碇技術的應用方向進行，藉以降低養殖網具之變形程度。

謝 辭

本研究係農委會 105 年度政府科技發展計畫政策預算計畫「臺灣沿海藍色經濟成長推動計畫」子計畫「鮪類箱網養殖生產技術之建構與繁養殖技術之開發」之部分成果。本研究感謝屏東縣車城鄉海洋箱網養殖業者的協助與記錄。

參考文獻

- Chen, Y. P. (2012) Study on a compound cage aquaculture system in the open sea. Master Thesis, National Sun Yat-Sen Univ., 89 pp.
- DeCew, J., D. W. Fredriksson, P. F. Lader, M. Chambers, W. H. Howell, M. Osienki, B. Celikkol, K. Frank, E. Høy (2013) Field measurements of cage deformation using acoustic sensors, *Aquac. Eng.*, 57: 114-125.
- Dong, S., X. You, and F. Hu (2021a) Experimental investigation on the fluid-structure interaction of a flexible net cage used to farm Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*). *Ocean Eng.*, 226: 108872.
- Dong, S., S. G. Park, D. Kitazawa, J. Zhou, T. Yoshida, Q. Li (2021b) Model tests and full-scale sea trials for drag force and deformation of a marine aquaculture net cage, *Ocean Eng.*, 240: 109941.
- Huang, C. C. and B. S. Wang (2007) A field experimental study on an In-Situ single point mooring net cage system. *Proc. 29th Ocean Eng. Conf. Taiwan*, 661-666.
- Huang, C. C., H. J. Tang and J. Y. Liu (2007) Modeling volume deformation in gravity-type cages with distributed bottom weights or a rigid tube-sinker. *Aquac. Eng.*, 37 (2): 144-157.
- Huang, C. C., H. J. Tang and J. Y. Liu (2008) Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea. *Aquac. Eng.*, 38 (2): 105-116.
- Klebert, P., Ø. Patursson, P. C. Endresen, P. Rundtop, J. Birkevold and H. W. Rasmussen (2015) Three-dimensional deformation of a large circular flexible sea cage in high currents: Field experiment and modeling. *Ocean Eng.*, 104: 511-520

- Lader, P. F. and B. Enerhaug (2005) Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 30 (1): 79-84.
- Lien, E., L. M. Sunde and K. Midling (2007) Aquaculture Technology. *In* Aquaculture Research: from Cage to Consumption (M. Thomassen, and B. Norberg eds.), Research Council of Norway, 304-319.
- Lin, H. C. (2002) The mechanical characteristics of the circular type netting cages. Master Thesis, National Taiwan Ocean Univ., 88 pp.
- Nagamatsu, K., H. Nishinokubi and K. Nakasai (1986) The mechanical characteristics of a netting store pot. *Bull. Fac. Fish. Nagasgi Univ.*, 59: 1-10.
- Qu, X. Y., F. X. Hu, D. Shiode, T. Tokai, T. Kumazawa and Y. Takeuchi (2011) Experiments of aquaculture cage using metal bottom nets models. *Academic Lecture Proceedings, Japan Institute of Aquaculture Industry*, 23: 123-126.
- Tang, H. J. (2001) Improvement on aquaculture cage net volume deformation. Master Thesis, National Sun Yat-Sen Univ., 130 pp.
- Tomii, W., K. Naiki and Y. Yamada (1979) Investigations into technical development of mariculture on commercial scale applied to offshore region. *Proc. Japan-Soviet Joint Sym. Aquacul.*, 7: 111-20.
- Wang, M. C., K. Y. Shie and M. C. Wang (1993) Flow velocity and volume changes of the aquaculture cage. *J. Fish. Soc. Taiwan*, 20 (2): 83-90.
- Weng, D. Y. (1999) The mechanical characteristics of the netting cages. Master Thesis, National Taiwan Ocean Univ., 48 pp.
- Yang, C. M., C. C. Lai, H. H. Huang, J. S. He and J. S. Weng (2021) Volume changes in small round net cage during ship towage. *J. Taiwan Fish. Res.*, 29 (2): 67-75 .
- Yoichi, O., Y. Tawara and H. Taketome (1985) Studies on behavior of fish cage against flow of water - on relationship between volume of cage and current velocity. *J. Fish. Eng.*, 6: 297-321.
- Yu, K. C. (2000) Analysis of marine fish cage design. Ph.D. Thesis, National Taiwan Ocean Univ., 132 pp.
- Yu, K. C., K. J. Tsay and L. Z. Cheng (2006) The field experiment of anti-wave net cage performed in southwestern water of Taiwan. *J. Fish. Soc. Taiwan*, 33(1): 45-53.
- Zhang, Y. M. (2000) Study on submergible cage aquacultural engineering. Master Thesis, National Sun Yat-Sen Univ., 103 pp.

Impacts of a Typhoon on the Depth and Structure of a Small Round Submersible Cage

Ching-Min Yang, Chi-Chang Lai, Hsing-Han Huang, Jia-Sin He,
Jinn-Shing Weng and Yang-Chi Lan*

Coastal and Offshore Resources Research Center, Fisheries Research Institute

ABSTRACT

Frequent occurrences of typhoons invading cage culture farms and causing the death or escape of all the farming fish result in substantial losses for farmers in our country and abroad. Before a typhoon hits Taiwan, fishermen who use round submersible cage farming will submerge the cage to a depth of about 20 meters to avoid the effects of strong currents and waves on the sea surface. Typhoons are prevalent in Taiwan during the summer and fall. However, the fisherman are unaware of the depth changes of the cage. In this study, 9 depth sensors and an Acoustic Doppler Current Profiler were attached to a small round submersible cage with a diameter of 16 m and a net depth of 8 m in order to detect the change in the cage's depth in different parts, as well as the speed and direction of current during the typhoon that struck Taiwan. The cage can maintain a stable depth when there is no typhoon, but when the current speed exceeds 20 cm/s, its volume ratio will decrease and it will float to the surface. When the center of the Meranti Typhoon passes through the culture farm, the current speed exceeds 30 cm/s for approximately three hours, with a maximum speed of 41.6 cm/s that is maintained for approximately half an hour. The deformed cage is floated from a depth of 20 meters to a depth of 5 to 8 meters. The center of the Malakas Typhoon did not pass through the culture farm, but it caused the cage to float upwards and the mesh to become severely deformed, resulting in a reduction in breeding space. This research may provide the cage culture industry with references for the technological development of the anti-strong flow cage, cage structure fixation, and underwater anchor to reduce fish culture mortality.

Key words: Typhoon MERANTI (201614), net deformation, depth change, cage float

*Correspondence: No. 6, Yugang N. 3rd Rd., Cianjhen District, Kaohsiung 80672, Taiwan. TEL: (07) 8218103; E-mail: yclan@mail.tfrin.gov.tw