

OAC-112-011 (研究報告)

烏賊卵特性應用於水下纜線保護研究  
(成果報告)

海洋委員會補助研究

中國民國 112 年 8 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-112-011

烏賊卵特性應用於水下纜線保護研究  
(成果報告)

學校：國立清華大學

指導教授：楊佩良

學生：陳醇臻

研究期程：中華民國 112 年 3 月至 10 月

研究經費：新台幣九萬七千元

海洋委員會補助研究

中國民國 112 年 8 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。」

「本研究報告絕無侵害他人智慧財產權之情事，如有違背願自負民、刑事責任。」

## 目次

表次.....	5
圖次.....	6
摘要.....	8
第一章 前言.....	9
第一節 研究動機與現況.....	9
第二節 研究目的.....	9
第二章 文獻回顧.....	10
第一節 海底纜線現況.....	10
第二節 烏賊卵性質.....	11
第三章 材料與方法.....	14
第一節 生物實驗.....	14
第二節 撞擊試驗機構設計.....	15
第三節 烏賊卵撞擊模擬實驗.....	17
第四節 水晶寶寶撞擊模擬試驗.....	19
第四章 結果.....	21
第一節 生物實驗.....	21
第二節 撞擊試驗機構設計.....	21
第三節 烏賊卵撞擊模擬實驗.....	23
第四節 水晶寶寶撞擊模擬試驗.....	34
第五章 討論.....	44
第一節 生物實驗.....	44

第二節 抗壓試驗機構設計.....	44
第三節 烏賊卵撞擊模擬實驗.....	45
第四節 水晶寶寶模擬撞擊實驗.....	47
第六章 結論.....	48
參考資料.....	49

## 表 次

表 2-2.1 不同種類烏賊卵孵化、生命時長、孵化時間比例。.....	13
表 3-4.1 包膜水晶寶寶製作步驟表。.....	20
表 4-3.1 撞擊試驗中滑動現象與層狀結構脫落統計表。.....	26
表 4-3.2 平頭－健康烏賊卵撞擊試驗一、二，撞針撞擊前後速度及兩者差值表.....	29
表 4-3.3 平頭－不健康烏賊卵撞擊試驗，撞針撞擊前後速度及兩者差值表。.....	30
表 4-3.4 尖頭－健康烏賊卵撞擊試驗一、二，撞針撞擊前後速度值及兩者差值表。 .....	33
表 4-4.1 烏賊卵與水晶寶寶撞擊試驗，不同撞針撞擊現象描述表。.....	38
表 4-4.2 無包膜水晶寶寶撞擊試驗數據表。.....	40
表 4-4.3 包膜水晶寶寶撞擊試驗數據表。.....	43

## 圖 次

圖 2-1.1 海底纜線各筆因斷裂圓餅圖。.....	10
圖 2-1.2 台灣海域船舶即時資訊。.....	11
圖 2-2.1 普通烏賊卵隨時間變化圖。.....	12
圖 3-1.1 烏賊卵。.....	14
圖 3-1.2 龍洞灣的軟絲卵。.....	15
圖 3-2.1 第一版及第二版撞擊機構。.....	16
圖 3-3.1 健康與不健康烏賊卵圖。.....	17
圖 3-3.2 烏賊卵衝擊模擬實驗設備架設圖。.....	18
圖 3-4.1 烏賊卵與包膜水晶寶寶比較圖。.....	19
圖 4-1.1 螯蝦進食烏賊卵圖。.....	21
圖 4-1.2 竹叢礁上的軟絲卵。.....	22
圖 4-2.1 撞擊機構空轉撞針位置對時間關係圖。.....	23
圖 4-3.1 烏賊卵在受到尖頭撞針撞擊的幾何外型變化圖。.....	24
圖 4-3.2 高速攝影機拍攝烏賊卵在平頭撞針撞擊下形狀變化圖。.....	25
圖 4-3.3 烏賊卵經過尖頭撞針重複撞擊後表面出現的小洞。.....	26
圖 4-3.4 停止記錄撞針位置時，健康烏賊卵與軌道關係圖。.....	27
圖 4-3.5 健康烏賊卵－平頭撞擊試驗（一）、（二）結果。.....	28
圖 4-3.6 不健康烏賊卵樣品 1、樣品 2 與樣品 3 的撞擊試驗圖。.....	30
圖 4-3.7 健康烏賊卵－尖頭撞擊試驗（一）、（二）結果。.....	32
圖 4-4.1 水晶寶寶生長曲線圖。.....	34
圖 4-4.2 高速攝影機拍攝包膜水晶寶寶在撞針撞擊下形狀變化圖。.....	35
圖 4-4.3 包膜水晶寶寶撞擊試驗撞針位置對時間關係圖。.....	36
圖 4-4.4 停止記錄撞針位置時，包膜水晶寶寶與軌道關係圖。.....	37
圖 4-4.5 無包膜水晶寶寶－平頭撞擊試驗結果。.....	39

圖 4-4.6 無包膜水晶寶寶－尖頭撞擊試驗結果。.....	39
圖 4-4.7 包膜水晶寶寶－平頭撞擊試驗結果。.....	42
圖 4-4.8 包膜水晶寶寶－尖頭撞擊試驗結果。.....	42
圖 5-2.1 前後兩版撞針比較圖。.....	45
圖 5-3.1 烏賊卵層狀結構。.....	46

## 摘要

海生硬骨魚的幼魚會在卵排出後三至七天孵化，卵的結構由卵膜、圍卵腔、卵黃及胚胎所組成（邵廣昭、楊瑞森、陳康青、李源鑫，2001）；烏賊的幼體根據品種的不同，孵化時間從兩周到半年不等(Forsythe et al., 1994; Tongtherm et al., 2016)，本篇研究使用的虎斑烏賊卵，孵化時間落在二至四周。並且烏賊卵與海生硬骨魚卵的結構不同，卵膜的最外層多了由蛋白質所組成的層狀構造(Bonnaud et al., 2013)，厚度 0.3 至 4 毫米(Wang et al., 2010)。然而，目前的研究仍然不清楚層狀結構是透過什麼方式保護烏賊卵。

我們的研究發現烏賊卵具有滑動及層狀結構分離的特性，並在實驗室的环境透過水晶寶寶、海藻酸鈉溶液與乳酸鈣溶液模擬出層狀結構。當平頭撞針撞擊健康烏賊卵，會發生滑動及層狀結構分離，層狀結構的分離必定伴隨滑動；尖頭撞針撞擊健康烏賊卵數次，表面出現小洞後，因為層狀結構的存在使烏賊卵不會破掉；水晶寶寶的外層包裹上層狀結構後，能提升抗撞擊能力，使水晶寶寶遭到撞擊後不易裂成兩半。

網路資料目前傳輸的主要方式是透過海底纜線(Clark, 2016)，一旦毀損會對人們的日常生活帶來巨大的不便，而毀損的主要都是船錨所造成(Eleftherakis & Vicen, 2020)。本篇研究提供了一個新穎的方向，設計海底纜線的保護結構。

關鍵字：烏賊卵層狀結構、虎斑烏賊、海底纜線、抗壓試驗、生物材料、微膠囊技術

# 第一章 前言

## 第一節 研究動機與現況

通訊纜線為重要的國家基礎設施，一旦發生故障所造成的損失及影響十分巨大，其重要性可從下面兩個例子窺知一二。

案例一：於 2020 年 10 月盜採砂石導致電纜裸露而損壞，造成有線電視、MOD、寬頻網路、部分行動基地台、專線等都無法使用，文章中提到每協調 1 次國際海纜船至少千萬元起跳，材料費用等須另計，該年度維修經費已逾 5000 萬元。(中時新聞網，2020)

案例二：2006 年恆春大地震震壞了不少海底電纜，影響大多數的東南亞國家，即使所有地區皆緊急展開修復行動，根據網路暨通訊流量偵測業者 Renesys 的估計，海底電纜的全面修復仍需耗上幾個星期。(iThome，2006)

本研究提供新的觀點保護海纜，減少國家每年維修海纜的費用，穩定基礎通訊設施。

## 第二節 研究目的

本研究旨在了解烏賊卵最外層的層狀結構是如何保護胚胎免於受到外力衝擊，並設計類似烏賊卵的仿生層狀結構，期望在未來能應用於海纜的保護。

## 第二章 文獻回顧

### 第一節 海底纜線現況

全球平均每年都會有超過 100 條的海底纜線斷裂，造成人們的不便及經濟損失。目前全球百分之九十七的數據都是透過海底通訊纜線進行傳輸的，而衛星僅占百分之三(Eleftherakis & Vicen, 2020)。海纜一旦損壞，需要數周到數個月維修，伴隨的費用也是千萬元起跳，時間及金錢的代價十分高昂。從圖 2-1.1 可以看出損壞的肇因主要由人類活動所造成，第一是船錨(43%)，其次為拖拉漁網(33%)，再來才是自然的地質活動所造成(Eleftherakis & Vicen, 2020)。

External Aggression Cable Faults

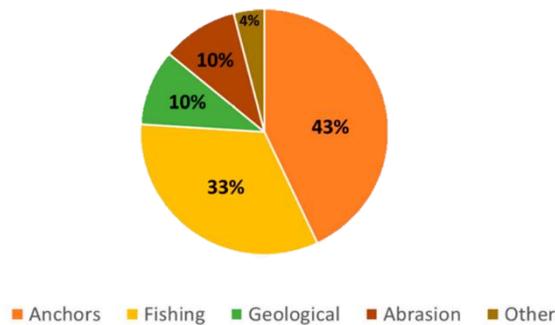


圖 2-1.1 海底纜線各肇因斷裂圓餅圖(Eleftherakis & Vicen, 2020)

纜線的損壞所造成的影響是如此巨大，本研究試著從纜線安裝的角度去思考要如何解決。目前的佈設方式可分為兩種：敷設及埋設。前者是將纜線直接鋪設在海床上，沒有泥沙保護；後者則是將纜線深埋於海床至少 1.5 公尺底下。在考慮到海床狀況、減輕纜線因為扭轉、拉伸和張力下彎等機械應力、水下生物的侵襲、船隻拋錨、漁撈作業等破壞，並提高海纜的安全及可靠性，主要的佈設方式都是「埋設」。儘管如此，纜線仍會因為地質活動、船錨等因素直接暴露，被拖拉漁網、水下生物損壞。目前從臺灣海域船舶動態資訊系統，可以查得台灣海域船舶航行紀錄，圖 2-1.2 所示。找出違規錨泊、推網捕魚的船隻進行懲處，避免纜線損壞。然而在考慮系統背後維護及監

控的人事成本下，效果仍是未知。(廖吉義，2017)

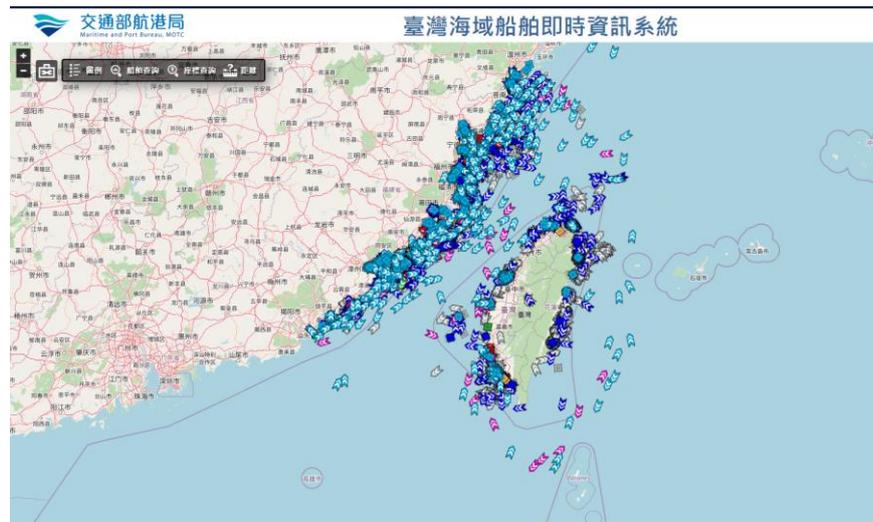


圖 2-1.2 台灣海域船舶即時資訊 (台灣海域船舶即時資訊系統，2022)

目前的解決辦法僅是治標而不是治本，就算有前述的防範措施，但在無法預期的人為和自然因素下，海纜仍會遭受破壞。因此，根本的解決方法是提升纜線自身的保護能力。然而現今的研究多聚焦於錨是怎麼樣破壞纜線，或是破壞產生的原因。例如：錨可能會穿透海床與電纜直接接觸，造成海纜損壞，或是錨於海床中移動的過程，在海纜上方產生負載造成海纜損壞 (Osthoff et al., 2017)。海浪、洋流、海底土石流、火山、地震等地質活動會造成大陸棚中的減少沉積物，造成原本安裝在海床 1 公尺下的海纜裸露而損壞(Kvalstad et al., 2001; Wang et al., 2018)。如果我們可以改進現有的纜線結構，提升海纜吸收外力的能力，或許就可以解決海纜損壞所造成的通訊不便及經濟損失。烏賊卵具有類似泡泡紙的保護機制，本研究試圖透過研究烏賊卵的層狀結構，作為水下纜線保護的切入點。

## 第二節 烏賊卵性質

烏賊卵類似泡泡紙，保護胚胎在發育過程中不受到獵食者的威脅(Barbieri et al., 1997)。日常生活中在運輸各式貴重物品的時候我們都會使用泡泡紙緩衝，避

免物品損毀。泡泡紙原理是以薄膜包含空氣，形成氣泡來吸收撞擊，在產品受到震動時保護產品。我們希望透過了解烏賊卵的層狀結構是如何在水下保護胚胎不受到獵食者的威脅(Boletzky, 2003)，設計水下纜線的保護結構。

烏賊跟大多數魚類一樣都是卵生物種，烏賊卵卻有與一般海生魚類不同的卵膜結構與發育特性。多數魚卵的結構由卵膜(chorion)、圍卵腔(perivitelline space)、卵黃囊(yolk)、胚胎(embryo)所組成(Wang et al., 2010)，然而烏賊卵在結構上不一樣的地方，就是在卵膜的最外層具有複雜的層狀結構，組成成分是母烏賊生殖腺體所分泌的蛋白質，烏賊卵的層狀結構會隨者發育時間變薄，圍卵腔內液體與海水之間濃度的差異使卵的尺寸逐漸變大(Zatylny-Gaudin & Henry, 2018)。而這個現象不僅存在於虎斑烏賊(*Sepia pharaonis*)，也可以在普通烏賊(*Sepia officinalis*)的卵觀察到(Zatylny-Gaudin & Henry, 2018)。虎斑烏賊(*Sepia pharaonis*)卵的大小隨者時間而增大，逐漸變成透明(Iglesias et al., 2014)。普通烏賊(*Sepia officinalis*)卵在不同發育階段，分裂期(cleavage)、原腸形成(Gastrulation)、器官形成期(Organogenesis)，烏賊卵的尺寸隨時間而增大，如下圖 2-2.1。

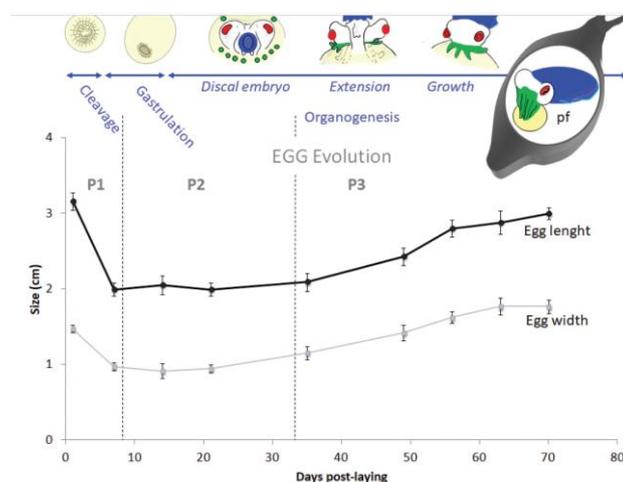


圖 2-2.1 普通烏賊卵隨時間變化圖(Zatylny-Gaudin & Henry, 2018)

根據種類、尺寸和生長環境，海生硬骨魚的壽命差異很大，但平均介在 2

至 20 年，且多為卵生物種，海生魚卵會在大洋或沿岸海域隨波漂浮(Wang et al., 2010)，胚胎從發育到孵化的時間平均在一個星期內，可烏賊卻很不一樣。烏賊卵不僅為沉性卵，會沉入水底，孵化時間也很長，8 至 150 天不等。烏賊的壽命根據品種的不同大概一到四年左右，但是烏賊卵從發育到孵化卻要花上烏賊壽命約十分之一的時間。其中不同種類的烏賊卵雖然從產卵到孵化的時間都不太相同，但也是一到三個月的時間，如表 2-2.1。

表 2-2.1 不同種類烏賊卵孵化、生命時長、孵化時間比例

物種	虎斑烏賊	普通烏賊	澳洲大烏賊
孵化時間(天)	25	65	120
壽命(天)	240	548	1095
孵化時間/壽命	0.1	0.1	0.1

註：虎斑烏賊(Lee et al., 2016)；澳洲大烏賊(Cronin & Seymour, 2000)；普通烏賊(Jereb et al., 2015; Martins et al., 2018)

生物的卵富含營養價值，容易成為獵食者的目標(Martins et al., 2018)。與同為產沉性卵的魚類相比，烏賊沒有親代的照護行為，僅將卵產在石頭底下或珊瑚礁的縫隙中。烏賊卵固定在同一位置長達 25 至 120 天，且缺乏親代的照護，烏賊卵面臨捕食的風險肯定相當高。目前已知烏賊卵的層狀結構提供胚胎物理及化學上的保護機制，作為泥土微粒、微小有機物的屏障；具有良好的彈性(Wang et al., 2010)；也可抑制細菌生長(Wang et al., 2010)。此外，文獻指出烏賊卵的層狀結構能夠讓獵食者不易獵食，使螯蟹、螯蝦的螯滑開。但文獻缺乏烏賊卵在不同發育階段，層狀結構所能承受的最大外力相關數據(Martins et al., 2018)。為了減緩錨及水下生物對海底纜線所造成的損壞，本研究透過量測烏賊卵層狀結構於不同階段能承受的最大外力，最佳化海底纜線保護結構。

## 第三章 材料與方法

### 第一節 生物實驗

#### 螯蝦獵食實驗

本實驗我們假設東方螯蝦為烏賊卵的狩獵者，試圖在實驗室的環境中驗證此一假說，烏賊卵如圖 3-1.1 所示。



圖 3-1.1 烏賊卵。

烏賊卵和東方礁螯蝦皆從阿坤的水族遊樂園購買而來。烏賊的品種是虎斑烏賊 (*Sepiapharaonis*)，而螯蝦的品種為科氏礁螯蝦 (*Enoplometopus crosnier*)。科氏礁螯蝦的尺寸大約在 10 至 13 公分之間，牠們通常棲息在珊瑚礁或岩礁區域，性格較為害羞。本此時驗所使用的柯氏礁螯蝦尺寸約為 13 公分。當螯蝦從阿坤的水族遊樂園購買回來時，牠因為尚未熟悉新的環境，常常待在角落試圖逃離這個水缸。為了能夠減緩螯蝦的不安全感，我們購買了造型石放置在魚缸中，讓螯蝦可以躲藏其中。兩周過後，觀察到螯蝦已經熟悉了這個環境，實驗才開始進行。

本實驗對烏賊卵進行三種不同的處理，觀察螯蝦對不同處理下的烏賊卵會產生什麼樣的獵食行為。在實驗開始前，螯蝦已經停止餵食數天，確保牠是處於飢餓狀態，以觀察到牠對於烏賊卵的進食行為。三種處理方式如下：

第一種：處理方式為不做任何特殊處理，僅提供健康的烏賊卵給螯蝦觀察。

第二種：處理方式是將飼料浸泡於水中後，抹在烏賊卵上。

第三種：處理方式是將烏賊卵與飼料一同放入魚缸中。

這些處理方式將用於觀察螯蝦在不同條件下對於烏賊卵的獵食行為。

### 軟絲野外觀察

軟絲為台灣重要的海洋經濟作物，常見的軟絲學名為萊氏擬烏賊(*Sepioteuthis lessoniana*)，與虎斑烏賊同為頭足綱的生物。每年的五月到九月為卵絲產卵季，軟絲的產卵地點可以是固定在水裡的珊瑚礁石(Sauer et al., 1993)或是漂浮於水中(Worms & PR, 1983)的海草與海帶(Nabhitabhata & Ikeda, 2014)，軟絲的卵從產卵至孵化所需要的時長為 2-4 週(Nabhitabhata & Ikeda, 2014)。由於烏賊卵多產在礁石底下或是珊瑚礁內部，較難以觀察。所以我們改觀察與烏賊卵外型及產地皆相似的軟絲卵，是如何在野外的環境生存。

透過和新北市貢寮區的 52 龍洞潛水中心熟悉當地環境的導潛員，帶我下潛至龍洞四號內深度約 15-20 公尺的軟絲復育場，復育場內的軟絲卵如圖 3-1.2 所示，觀察軟絲卵在野外環境中的生長狀況，及可能會遇到的狩獵者。



圖 3-1.2 龍洞灣的軟絲卵。版權所有 2023：52 龍洞潛水中心，經許可再版。

## 第二節 撞擊試驗機構設計

於五金行購買電線、斜口鉗、arudino、麵包板、開關、馬達等電子材料，搭配衝擊機構，使裝置能夠達到固定輸出速度及固定輸出力。機構透過 Autodesk inventor 繪製並輸出成 .stl 檔案，由 Prusa i3 MK3S+ 的塑膠擠出成型技術列印而成。

第一版底座與第二版底座相比，拱形結構從四個減少為兩個，減少撞針在運行過程中，因摩擦力不均所造成的速度差異。此外，在第二版底座右側新增一個平台，能將馬達固定在上面，使撞擊機構從手動變成電動。

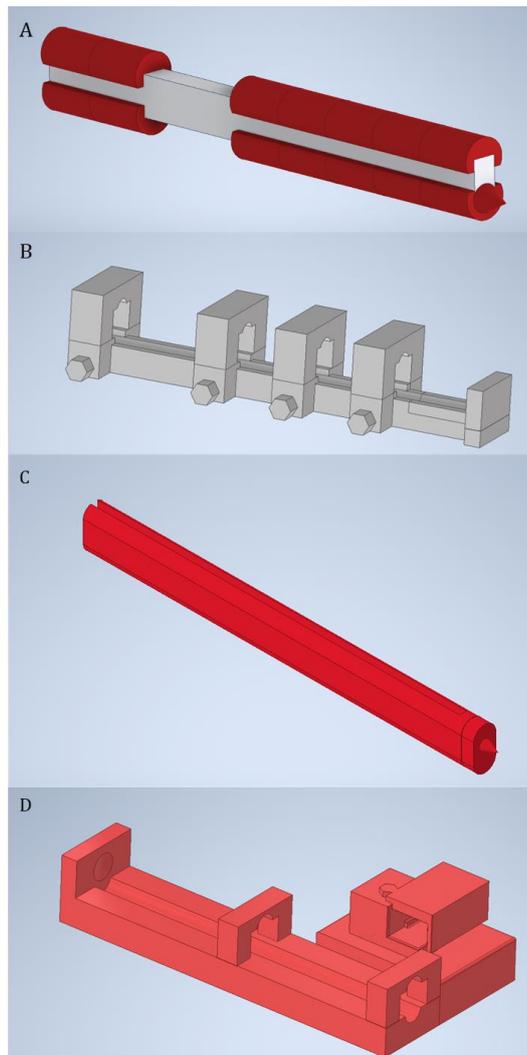


圖 3-2.1 第一版及第二版撞擊機構。(A)第一版撞針。(B)第一版底座。(C)第二版撞針。(D)第二版底座。

### 第三節 烏賊卵撞擊模擬實驗

為了模擬烏賊卵遭受撞擊的過程，我們選取兩種不同發育階段和健康程度的烏賊卵。分別是產卵後三至四周，發育末期的健康烏賊卵，尺寸約為 3 公分外觀呈現白色透明，燈光下可清晰地看見虎斑烏賊幼體（圖 3-3.1A）；及產卵一周內發育初期的不健康烏賊卵（圖 3-3.1B），其尺寸約為 1 公分，外觀呈現黃色且混濁，在燈光下可以觀察到受精卵的存在。

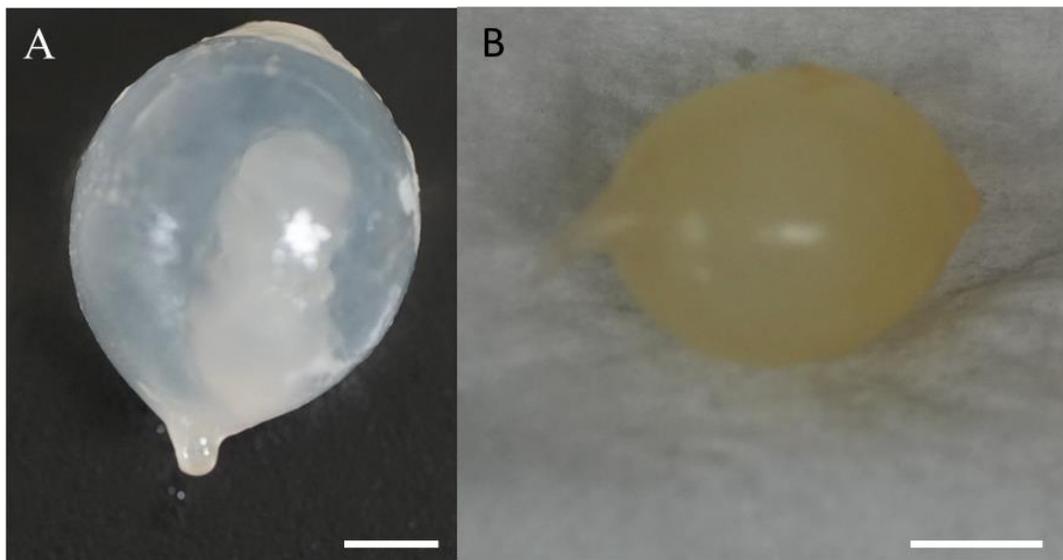


圖 3-3. 1 健康與不健康烏賊卵圖，比例尺 10 毫米。圖(A)健康烏賊卵，圖(B)不健康烏賊卵。

將兩種烏賊卵放置在撞擊機構上進行實驗，使用人工推動及固定馬達輸出的方式，搭配尖頭和平頭的撞針撞擊烏賊卵，觀察烏賊卵自身以及其層狀結構在受到撞擊時發生的形狀改變。為了捕捉撞擊過程的細節，我們使用 IphoneXR 及高速攝影機 (Phantom highspeed camera) 以 2000fps 進行拍攝，將影片透過分析軟體 (Tracker) 進行量化的分析，設備架設如圖 3-3.2 所示。

為了避免烏賊卵表面的海水在撞針撞擊過程中產生影響，我們將待撞的烏賊卵放置在撞擊機構上之前，使用廚房紙巾吸附卵膜表面的海水，以避免烏賊卵的滑脫。



圖 3-3.2 烏賊卵衝擊模擬實驗設備架設圖。架設完衝擊模擬機構後，透過高速攝影紀錄烏賊卵受到尖頭及平頭的撞針的形狀改變。

#### 第四節 水晶寶寶撞擊模擬試驗

本實驗使用包膜與無包膜的水晶寶寶來模擬烏賊卵進行撞擊試驗，探討烏賊卵外層的層狀結構與否，對於撞擊過程的保護卵內物質能力的影響。健康的烏賊卵與水晶寶寶在外型上相似，如圖 3-4.1 所示，同樣為球體具有彈性，在受到外力壓縮後，能恢復至原本的形狀不會破裂；而烏賊卵外層的層狀結構，可使用海藻酸鈉水溶液與乳酸鈣水溶液混和後，塗抹至水晶寶寶表面模擬。

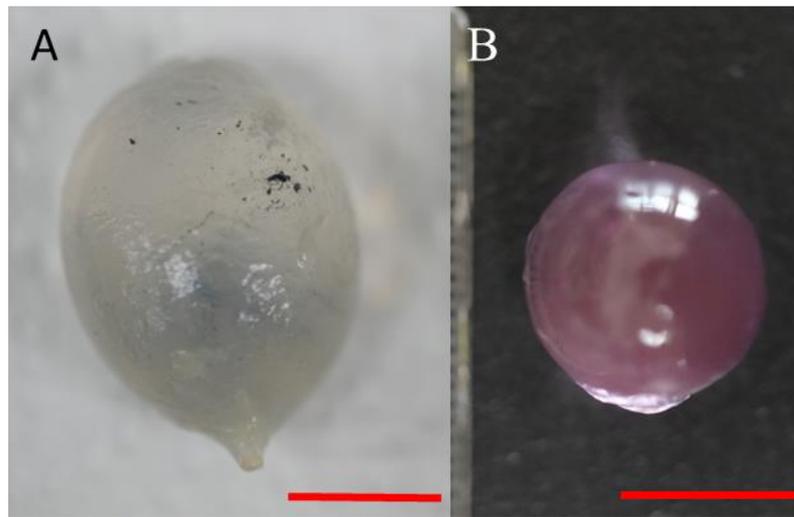


圖 3-4.1 烏賊卵與包膜水晶寶寶比較圖，比例尺 6 毫米。圖(A)烏賊卵，圖(B)包膜水晶寶寶。

水晶寶寶是一種很像粉圓的化學物質，只要將水晶寶寶放於容器內加適量的水，水晶寶寶就會膨脹長大。我們購買市售水晶寶寶，將尚未膨脹的水晶寶寶放入水杯中後，每 30 分鐘從水杯中取出水晶寶寶，放在桌上用相機進行拍照，照片則透過影像分析軟體 ImageJ 進行分析，得到水晶寶寶的直徑和時間關係圖，見圖 4-4.1。以確保每次撞擊實驗中的水晶寶寶尺寸大致相同，消除水晶寶寶尺寸及浸泡時間，對撞擊試驗所產生的誤差。

海藻酸鈉水溶液(A 劑)及乳酸鈣水溶液(B 劑)，在室溫下混合後會產生交鏈鍵結的晶球特性 (黃玉鈴、蔡豐富、張修銘、王文良、江伯源，2012)，利用此特性搭配水晶寶寶可模擬出具有層狀結構的烏賊卵，步驟及 A 劑與 B 劑濃度如

下所示：

A 劑：乳酸鈣 5 克、蒸餾水 100 克。

B 劑：海藻酸鈉 3 克、蒸餾水 100 克。

表 3-4.1 包膜水晶寶寶製作步驟表

步驟	說明
一	在室溫下將海藻酸鈉粉末與水泥和調配成重量百分濃度為 3% 的海藻酸鈉水溶液作為 A 劑；將乳酸鈣粉末與水泥和條配成濃度為 5% 的乳酸鈣水溶液作為 B 劑。
二	將小顆的水晶寶寶一顆一顆的放入水中，靜置五小時後，挑選出看起來像是球形的水晶寶寶用於步驟三。
三	水晶寶寶放入裝有海藻酸鈉的鐵盤後，使用棉花棒撥水晶寶寶，使水晶寶寶表面都均勻的抹上一層薄薄的海藻酸鈉溶液。
四	將表面塗有海藻酸鈉溶液的水晶寶寶移置湯匙上，將湯匙泡入裝有乳酸鈣溶液的容器內 3 分鐘。海藻酸鈉與乳酸鈣之間的交鍊鍵結，使水晶寶寶表面有一層薄膜。浸泡過程中使用棉花棒輕輕地撥水晶寶寶，確保塗抹於表層的海藻酸鈉都有和乳酸鈣行化學反應。
五	將水晶寶寶移置廚房紙巾上，將其表面的水分吸收乾淨，檢查剛剛的海藻酸鈉溶液是否都有完全固化。
六	將殘留於水晶寶寶表面乳酸鈣水溶液用清水沖洗 20~30 秒後，即可進行下一次塗層。

註：重複上述步驟（一）至步驟（六）兩次，可得到模擬烏賊卵的包膜水晶寶寶。

將水晶寶寶放置於撞擊機構上，使用馬達推動尖頭和平頭撞針撞擊依序將包膜與沒有包膜的水晶寶寶。一旦撞擊過後的水晶寶寶表面產生裂痕、破損，我們會立即更換，以確保每次實驗時水晶寶寶狀況都相同。為了捕捉撞擊過程的細節，我們使用 Iphone XR 及高速攝影機 (Phantom highspeed camera) 進行以 2000 fps 進行拍攝，將影片透過分析軟體 (Tracker) 進行量化的分析。

## 第四章 結果

### 第一節 生物實驗

#### 螯蝦獵食實驗

在實驗室的環境中，柯氏礁螯蝦在餓過數天之後，不會對健康的烏賊卵進行獵食。然而，若將浸過水的飼料，塗抹在烏賊卵的表面，柯氏礁螯蝦則會如圖 4-4.1 所示進食；若將烏賊卵與飼料一同放進水缸內，科氏礁螯蝦會把它飼料與烏賊卵一起抓到嘴巴前，但幾秒過後，就會把它烏賊卵放開，僅會吃飼料。

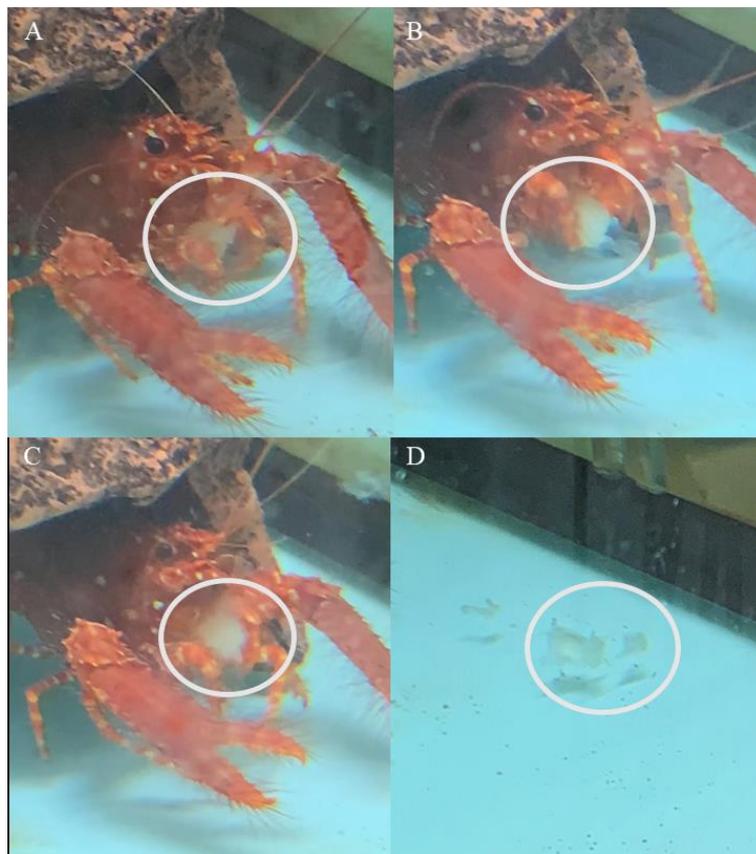


圖 4-1.1 螯蝦進食烏賊卵圖(A)為柯氏礁螯蝦利用步足將烏賊卵固定後用嘴巴進食， $t=0$  秒。(B) 進食過程中，烏賊卵滑離螯蝦的嘴巴， $t=5$  秒。(C)進食過程中，烏賊卵滑離螯蝦的嘴巴， $t=1$  秒。(D)螯蝦吃剩的烏賊卵碎屑， $t=110$  秒。

#### 軟絲野外觀察

龍洞灣內的軟絲復育場透過在水下放置大量的竹叢礁，吸引軟絲產卵，如圖

4-1.2 所示。剛產下來新鮮的軟絲卵會呈現透明白色的狀態，而已經產在竹叢礁一陣子的軟絲卵則會呈現土黃色，與不健康烏賊卵顏色相似。軟絲卵的外觀與健康烏賊卵相似呈白透明色橢圓形狀，觸感與健康烏賊卵相比則是稍微柔軟，同樣具有彈性；然而，存在如此大量軟絲卵的環境中，我沒有觀察到任何魚類或是海中生物去獵食軟絲卵，或是遭到獵食過後的軟絲卵殘骸。



圖 4-1.2 竹叢礁上的軟絲卵。版權所有 2023：52 龍洞潛水中心，經許可再版。

## 第二節 撞擊試驗機構設計

為了檢驗開關做為控制器的撞擊機構能達成定速定力輸出的狀況，我們使用高速攝影機拍攝開關開啟後，撞擊機構空轉影片，將撞針位置對時間關係做成圖 4-2.1。

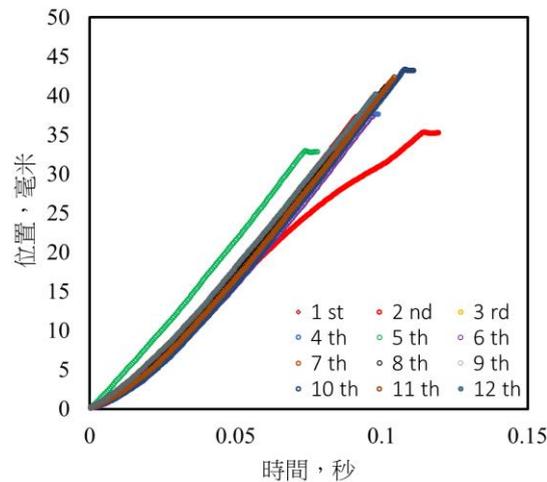


圖 4-2.1 撞擊機構空轉撞針位置對時間關係圖，撞針總共空轉 12 次，速度為  $398.7 \pm 21.4$  毫米/秒，不隨撞擊次數而有所改變。其中第二次試驗，當時間超過 0.05 秒後，斜率突然明顯往下是因為人為按壓固定套件的力道忽然變大所造成。

由圖 4-2.1 可知每一次試驗曲線都為斜直線，表示原本設計的 Arduino 替換成開關後，撞針能在馬達定力輸出下進行定速的移動，且撞針速度不隨撞擊次數增加而改變。

## 第三節 烏賊卵撞擊模擬實驗

透過一系列的撞擊試驗搭配不同健康程度的烏賊卵，本研究發現健康烏賊卵具有以下三個特點，能夠保護烏賊幼體在遭受撞擊時成功活下來。第一，烏賊卵在遭受撞擊的時候會滑動，與層狀結構脫離，讓烏賊卵不會受到外物繼續撞擊壓縮；第二，層狀結構的存在能讓烏賊卵在遭受尖頭撞針撞擊時不會破掉；最後，撞針撞擊烏賊卵後的速度並沒有比撞擊前還要慢，代表層狀結構可能會在撞擊中彈性地回彈，一部分能

量因此返回給撞針，從而減少速度減慢的程度。

圖 4-3.1 展示了烏賊卵在受到外力撞擊時形狀的變化。可以發現烏賊卵具有良好的彈性，且當壓縮量到一定的程度，部分烏賊卵的層狀結構會和卵脫離如圖 4-3.1(D) 與圖 4-3.2(D) 所示。

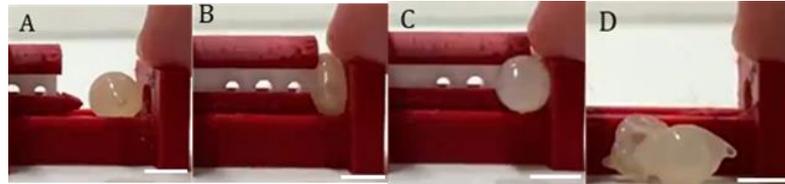


圖 4-3.1 烏賊卵在受到尖頭撞針撞擊的幾何外型變化圖。(A) 尚未刺到烏賊卵。(B) 烏賊卵的最大壓縮量。(C) 當烏賊卵被壓縮到最大壓縮量後，層狀結構會分離。(D) 烏賊卵層狀結構脫離。將撞針移開之後。由於這個實驗進行時機構尚未設計完整，外力來源是手，無法確定外力的大小為多少。比例尺：6.9 毫米。

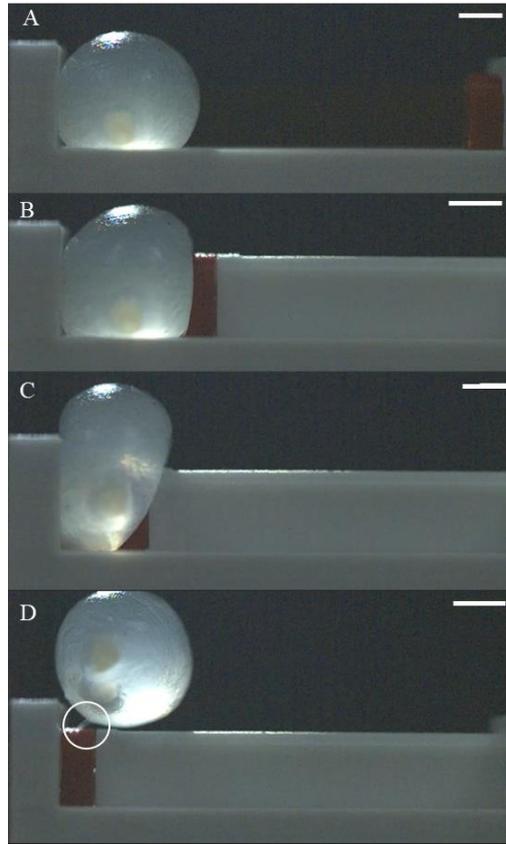


圖 4-3. 2 高速攝影機拍攝烏賊卵在平頭撞針撞擊下形狀變化圖。(A)  $t=0$  秒，機台尚未啟動。(B)  $t = 0.0795$  秒，撞針接觸到虎斑烏賊的卵的瞬間。(C)  $t=0.1895$  秒，虎斑烏賊的卵準備要從撞擊機構台滑開瞬間。(D)  $t = 0.2180$  秒，虎斑烏賊的卵從機台上滑開，白色圓圈部分為層狀結構分離。比例尺：6 毫米。

進行健康烏賊卵撞擊試驗，撞針頭為平頭時，如表 4-3.1 所示，滑動現象產生的機率約為 53.3% (8/15)，層狀結構分離的機率約為 26.6% (4/15)；若將撞針改為尖頭撞針，滑動與層狀結構分離現象皆不會發生，撞擊五到六次之後，受到撞擊的地方會如圖 4-3.3 所示出現一個小洞，但內部的卵黃周液沒有流出來，烏賊卵維持原本的形狀。

表 4-3.1 撞擊試驗中滑動現象與層狀結構脫落統計表。

第幾次撞擊	健康卵-平頭撞擊試驗										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
滑開 (一)	Y	Y	N	N	Y	Y	N	Y	Y	N	Y
分離 (一)	N	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	Y
滑開 (二)	N	N	N	Y							
分離 (二)	N	N	N	Y							



圖 4-3.3 烏賊卵經過尖頭撞針重複撞擊後表面出現的小洞。

為了使撞針撞擊前後速度的定義一致，我們取撞針接觸到待撞物前 0.005 秒，到待撞物與撞針之間的關係如圖 4-3.4 時停止，將這段期的撞針的位移與時間關係作圖；且統一撞擊前速度為撞針接觸到待撞物前 0.005 秒的直線斜率，撞擊後速度為接觸到待撞物的 0.0125 秒的直線斜率。

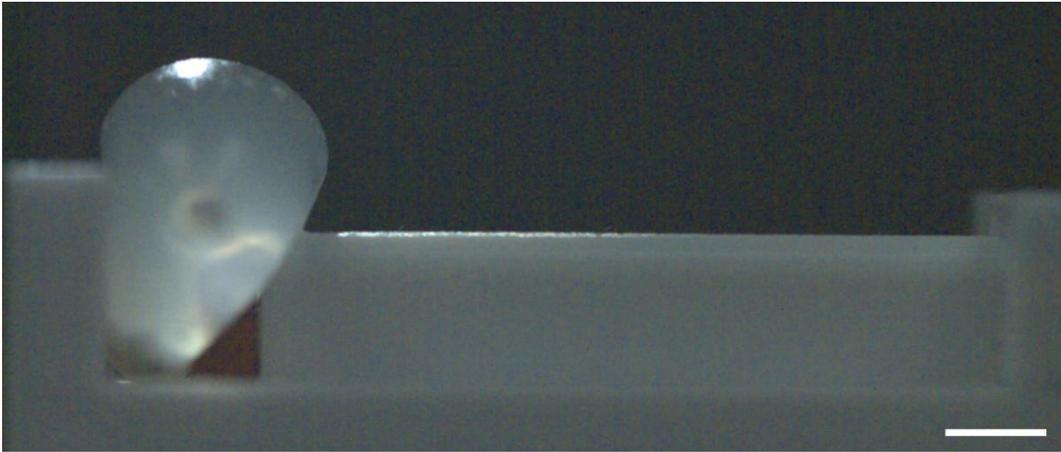


圖 4-3.4 停止記錄撞針位置時，健康烏賊卵與軌道關係圖，比例尺 6 毫米。

圖 4-3.5 為平頭—健康烏賊卵撞擊試驗（一）與（二）結果。表 4-3.2 為平頭—健康烏賊卵撞擊試驗（一）與（二），撞針撞擊前後速度及兩者差值，其中試驗（一）與（二）使用的是兩顆不同，但同為發育末期的健康烏賊卵。

撞擊試驗一( N=11)中撞針在接觸到烏賊卵前平均速度為  $433.8 \pm 66.6$  毫米/秒，接觸後平均速度為  $409.8 \pm 61.8$  毫米/秒，接觸前後速度差值為  $23.9 \pm 28.4$  毫米/秒；撞擊試驗二( N=4)中撞針在接觸到烏賊卵前平均速度為  $448.4 \pm 45.5$  毫米/秒，接觸後平均速度為  $452.1 \pm 32.4$  毫米/秒，接觸前後速度差值為負  $3.8 \pm 17.2$  毫米/秒。

觀察圖 4-3.5 (B)發現隨者撞擊次數的增加，直線的斜率逐漸下降；下降趨勢直到第十次與第十一次撞擊較為明顯（圖例第十次和第十一次），才可觀察到斜率有明顯的下降。其中前九次接觸烏賊卵後的撞針速度為  $436.6 \pm 23.3$  毫米/秒，第十與第十一次的撞針速度為 289.5 毫米/秒。

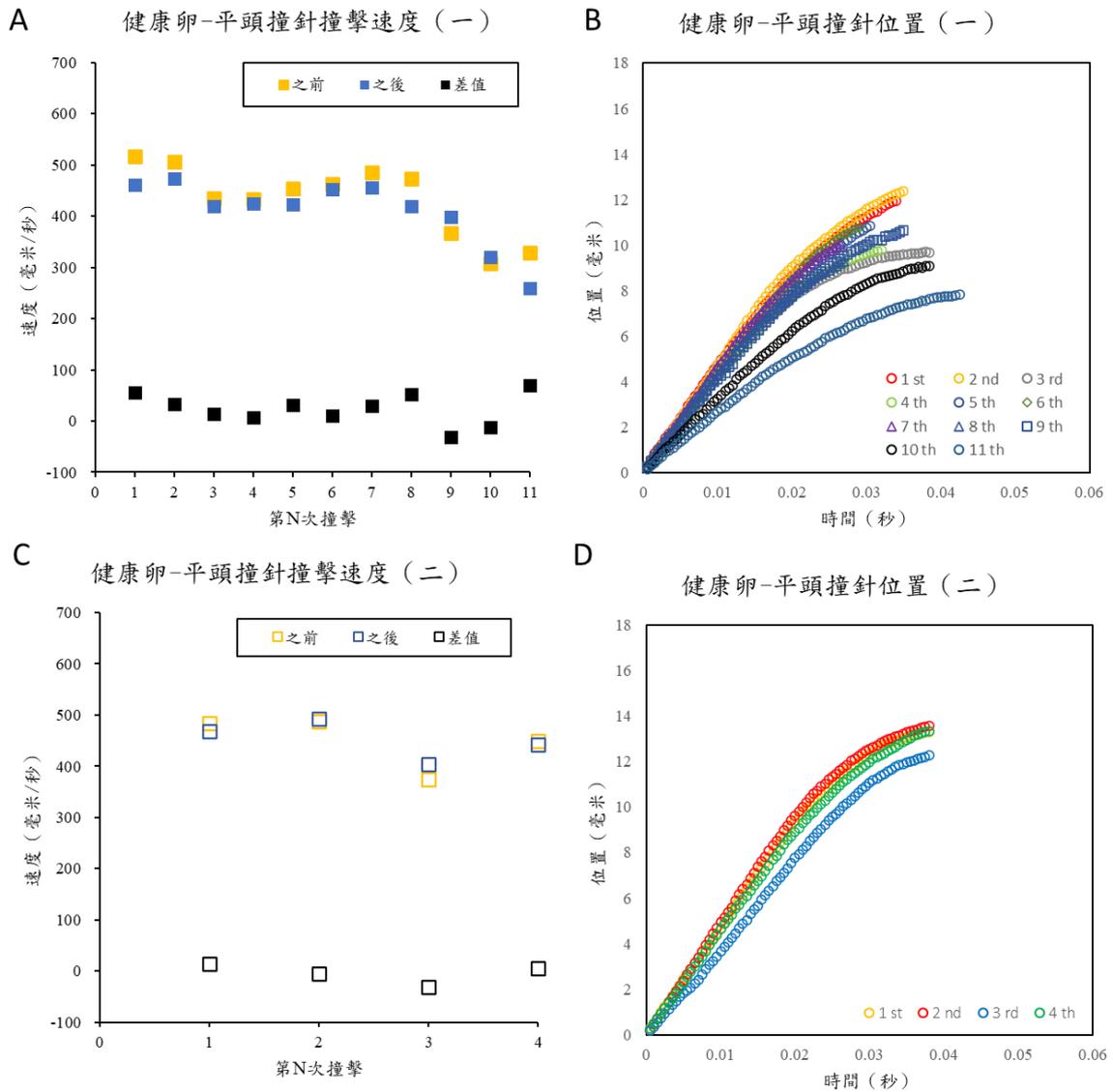


圖 4-3.5 健康烏賊卵-平頭撞擊試驗 (一)、(二) 結果。(A) 平頭撞擊試驗 (一) 撞針撞擊速度分布圖。(B) 平頭撞擊試驗 (一) 撞針位置對時間關係圖。(C) 平頭撞擊試驗 (二) 撞針撞擊速度分布圖。(D) 平頭撞擊試驗 (二) 撞針位置對時間關係圖。

表 4-3.2 平頭—健康烏賊卵撞擊試驗一、二，撞針撞擊前後速度及兩者差值表

速度（毫米/秒）	健康卵-平頭撞擊試驗										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
之前（一）	516.3	507.3	434.7	432.9	454.7	463.3	485.7	472.8	368.0	307.4	328.3
之後（一）	460.5	473.9	420.1	425.3	422.8	452.1	456.0	420.0	398.6	319.7	259.3
差值（一）	55.8	33.3	14.5	7.6	31.9	11.3	29.8	52.8	-30.7	-12.3	69.1
之前（二）	483.9	486.9	374.0	448.7							
之後（二）	468.7	492.1	404.8	442.9							
差值（二）	15.2	-5.2	-30.8	5.8							

圖 4-3.6 為不健康烏賊卵—平頭撞擊試驗結果(N=3)。表 4-3.3 為不健康烏賊卵撞擊試驗，撞針撞擊前後速度及兩者差值。不健康的烏賊卵在受到平頭形撞針撞擊後，層狀結構與絨毛膜會立即破裂，使內部卵黃周液噴濺出來。

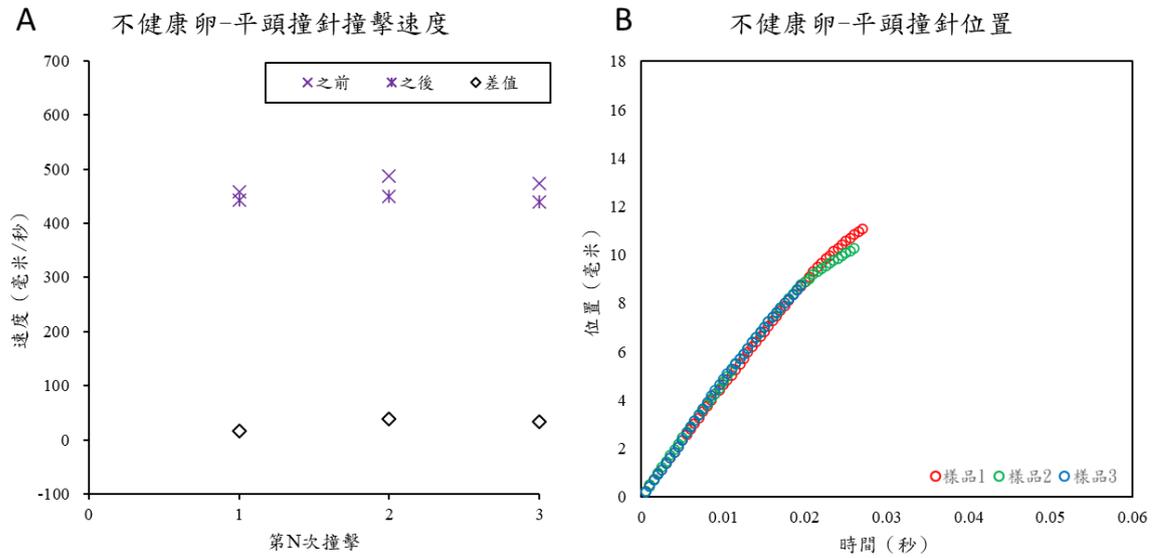


圖 4-3.6 不健康烏賊卵樣品 1、樣品 2 與樣品 3 的撞擊試驗圖。(A)撞針撞擊速度分布圖，(B)撞針位置對時間關係圖。

表 4-3.3 平頭—不健康烏賊卵撞擊試驗，撞針撞擊前後速度及兩者差值表。

平頭—不健康烏賊卵撞擊試驗			
速度 (毫米/秒)	樣品1	樣品2	樣品3
之前	458.8	486.6	473.5
之後	441.9	448.7	439.3
差值	16.9	37.9	34.2

圖 4-3.7 尖頭—健康烏賊卵撞擊試驗（一）與（二）結果。表 4.3-4 為健康烏賊卵撞擊試驗一、二，撞針接觸烏賊卵前後速度及兩者差值。觀察圖 4-3.7 (B)與圖 4-3.7 (D)發現隨著撞擊次數的增加，曲線斜率逐漸趨緩的位置從約 0.02 秒改變至約 0.025 秒。

撞擊試驗一(N=6)中撞針在接觸到烏賊卵前平均速度為  $572.0 \pm 23.7$  毫米/秒，接觸後平均速度為  $554.0 \pm 28.5$  毫米/秒，接觸前後速度差值為： $17.9 \pm 20.1$  毫米/秒；撞擊試驗二(N=6)中撞針在接觸到烏賊卵前平均速度為  $476.3 \pm 22.4$  毫米/秒，接觸後平均速度為  $490.1 \pm 18.7$  毫米/秒，接觸前後速度差值為負  $13.7 \pm 25.9$  毫米/秒。

觀察圖 4-3.7 (B)中，同一顆烏賊卵第一次撞擊試驗曲線斜率趨緩的時間點約在 0.02 秒，第六次撞擊撞擊試驗曲線斜率趨緩的時間點約在 0.025 秒；圖 4-3.7 (D)中同一顆烏賊卵第一次撞擊試驗曲線斜率趨緩的時間點同樣約為 0.02 秒，第六次撞擊撞擊試直到 0.04 秒，烏賊卵與軌道達到停止紀錄時的關係，仍未見明顯曲線斜率趨緩。也就是說隨著撞擊次數的增加，撞針能夠以接觸到烏賊卵前的速度移動更遠距離。

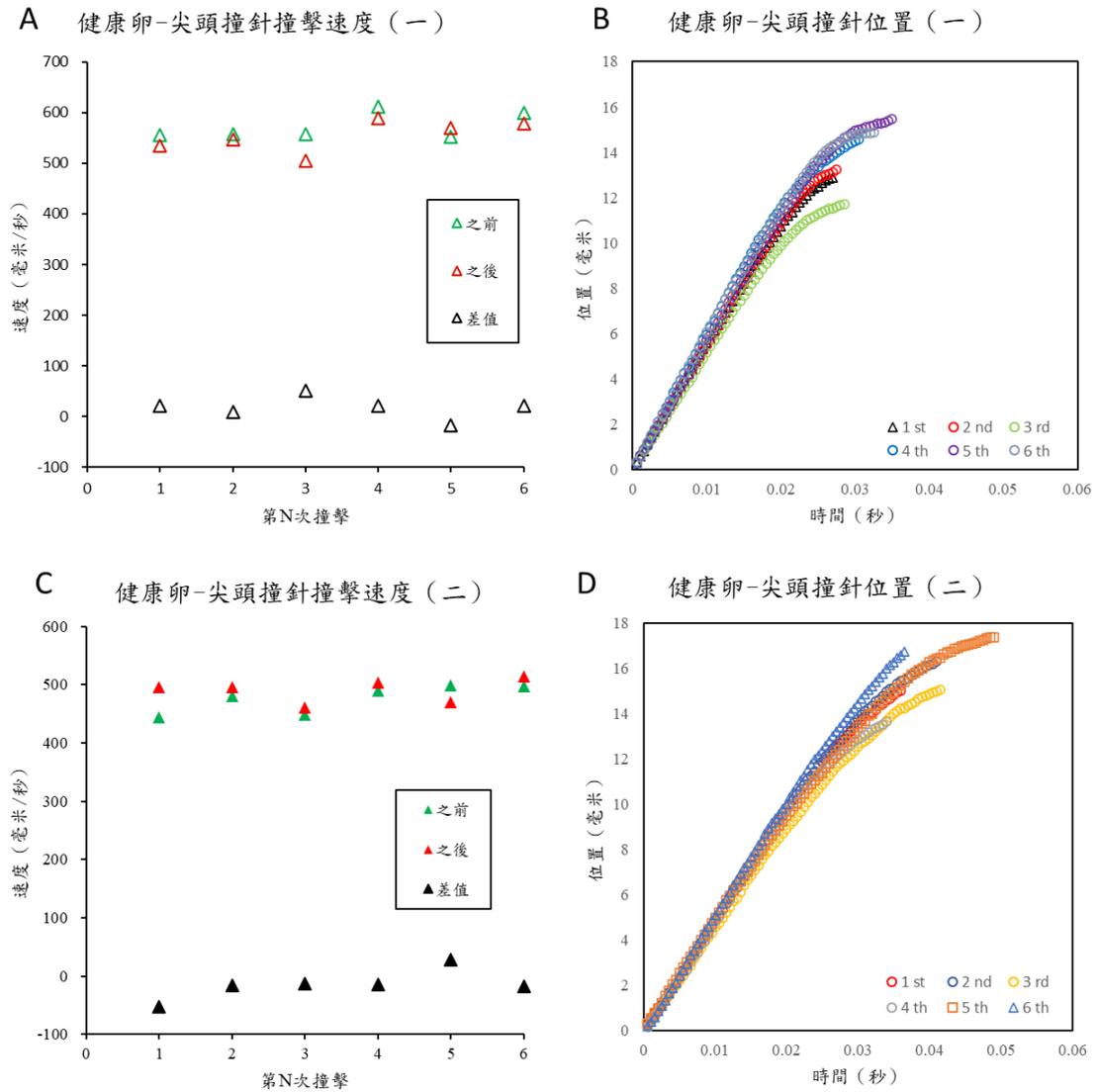


圖 4-3.7 健康烏賊卵-尖頭撞擊試驗 (一)、(二) 結果。(A) 尖頭撞擊試驗 (一) 撞針撞擊速度分布圖。(B) 尖頭撞擊試驗 (一) 撞針位置對時間關係圖。(C) 尖頭撞擊試驗 (二) 撞針撞擊速度分布圖。(D) 尖頭撞擊試驗 (二) 撞針位置對時間關係圖。

表 4-3.4 尖頭—健康烏賊卵撞擊試驗一、二，撞針撞擊前後速度值及兩者差值表。

速度 (毫米/秒)	尖頭—健康烏賊卵撞擊試驗					
	1	2	3	4	5	6
之前 (一)	555.4	556.6	556.6	611.1	553.0	599.1
之後 (一)	534.3	546.5	505.8	589.5	570.4	577.7
差值 (一)	21.1	10.1	50.8	21.6	-17.4	21.4
之前 (二)	443.4	480.0	448.7	489.3	498.8	497.9
之後 (二)	496.0	496.0	461.0	502.8	469.8	514.7
差值 (二)	-52.6	-16.1	-12.3	-13.6	28.9	-16.8

#### 第四節 水晶寶寶撞擊模擬試驗

觀察圖 4-4.1 可以發現，水晶寶寶在水中浸泡約 200 分鐘之後，其直徑固定在 12-14 毫米，不會再增加。

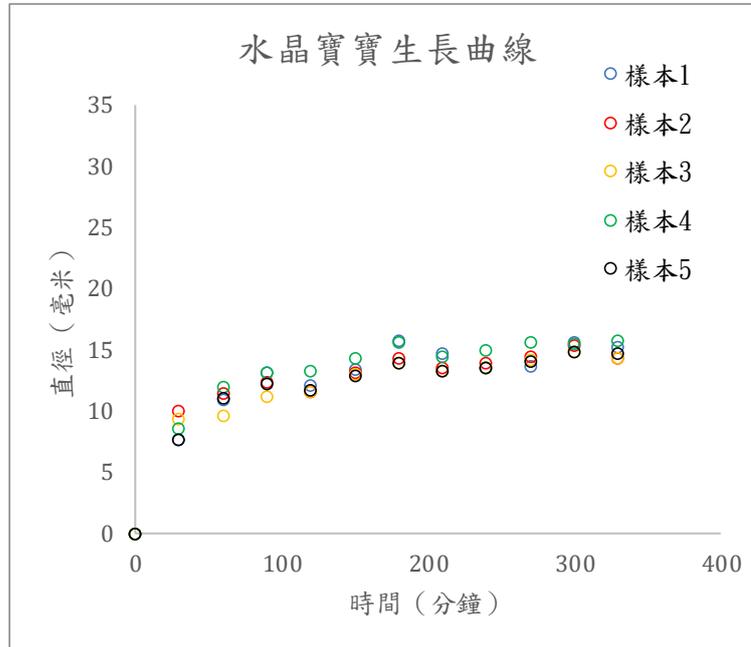


圖 4-4.1 水晶寶寶生長曲線圖。

健康烏賊卵在撞擊試驗時產生層狀結構分離與滑開的現象；使用海藻酸鈉水溶液與碳酸鈣水溶液所製成的包膜水晶晶寶寶，也能在撞擊試驗時重現出層狀結構分離及滑開的現象，如圖 4-4.2(D)所示。因此，我們認為包膜水晶寶寶與健康烏賊卵具有一定程度的相似性。

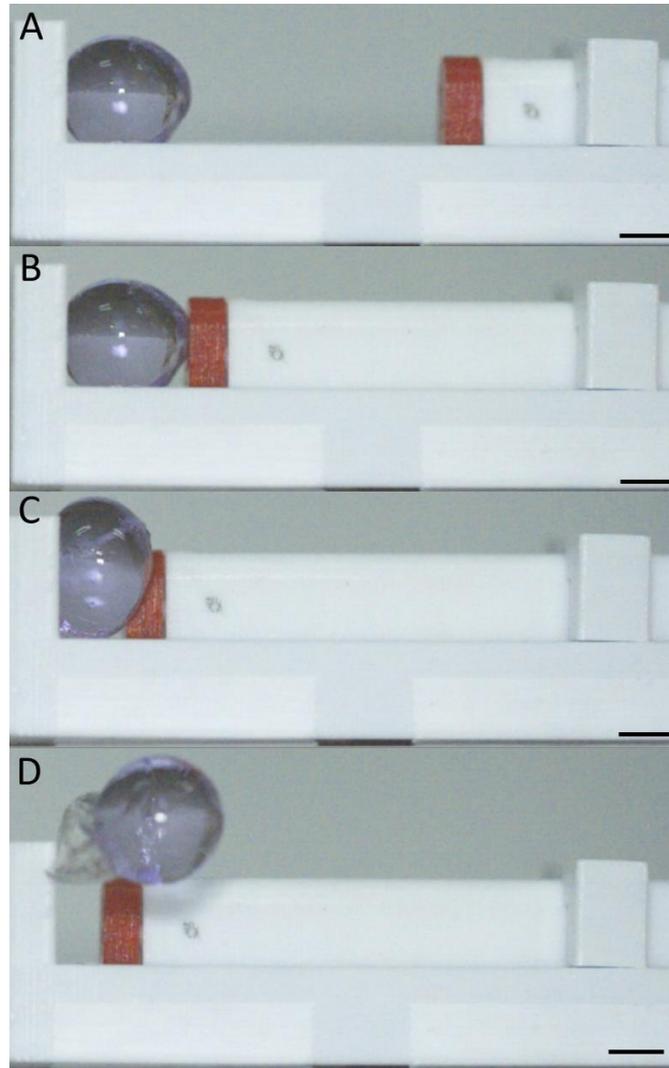


圖 4-4.2 高速攝影機拍攝包膜水晶寶寶在撞針撞擊下形狀變化圖。(A)  $t=0.000$  秒，機台尚未啟動。(B)  $t=0.081$  秒，撞針接觸到包膜水晶寶寶的瞬間。(C)  $t=0.100$  秒，包膜水晶寶寶準備要從撞擊機構台滑開瞬間。(D)  $t=0.110$  秒，包膜水晶寶寶從機台上滑開，紅色圓圈部分為膜脫落。比例尺：6 毫米。

圖 4-4.3 為包膜水晶寶寶撞擊撞針形狀為尖頭中，第一次試驗的撞針位置對時間關係圖。撞針在  $t=0.079$  秒時接觸到包膜水晶寶寶，同圖 4-2.1 所示曲線為一條斜直線，代表撞針在出發至接觸水晶寶寶前為等速度運動； $t=0.098$  秒時達成圖 3-3.1 所示停止紀錄條件後，曲線斜率逐漸趨緩，為了使線性擬合出來的斜率，能夠忠實呈現撞針在接觸到烏賊卵瞬間的速度，我們取接觸到包膜水晶寶寶後的 0.013 秒的直線斜率，做為撞針接觸到包膜水晶寶寶後的速度。

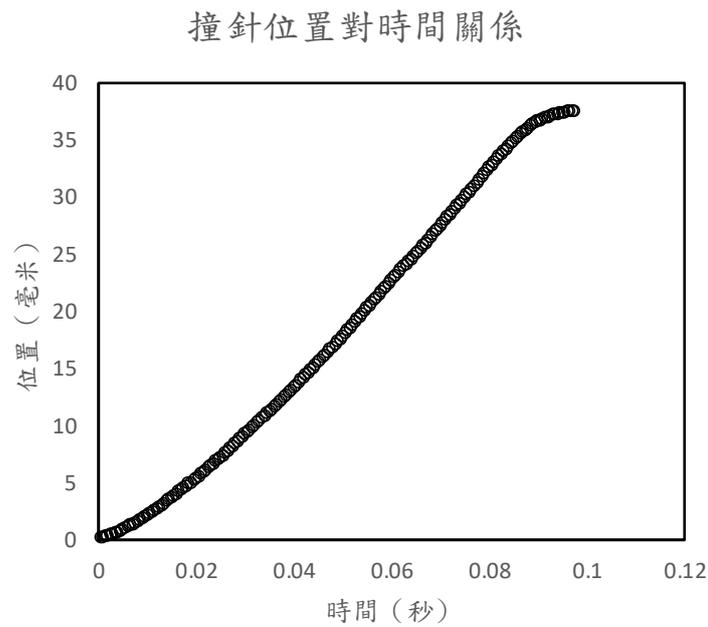


圖 4-4.3 包膜水晶寶寶撞擊試驗撞針位置對時間關係圖。

為了使撞擊試驗撞針位置對時間關係圖與撞針撞擊前後速度的定義一致，取撞針接觸到待撞物前 0.005 秒，到水晶寶寶與撞針之間的關係如圖 4-4.4 時停止，將這段的撞針的位置對時間關係作圖；且統一撞擊前速度為撞針接觸到待撞物前 0.005 秒的直線斜率，撞擊後速度為接觸到待撞物的 0.0125 秒的直線斜率。

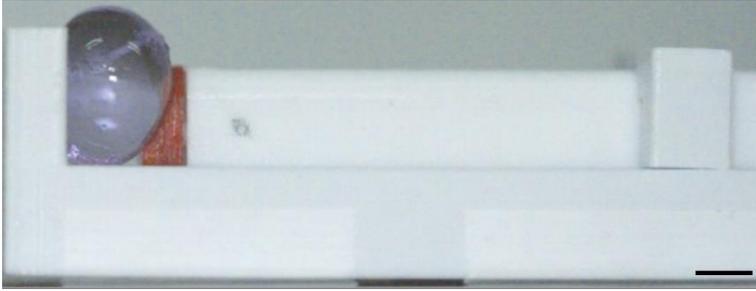


圖 4-4.4 停止記錄撞針位置時，包膜水晶寶寶與軌道關係圖，比例尺 6 毫米。

撞針頭的形狀為平頭撞擊到無包膜水晶寶寶時，水晶寶寶會滑動，表面出現一道淺淺的裂痕，但是不會破裂；撞針頭的形狀為尖頭撞擊到無包膜水晶寶寶時，水晶寶寶滑動後破裂成兩半。撞針頭的形狀為平頭撞擊到包膜水晶寶寶時，水晶寶寶能夠重現在健康烏賊卵中觀察到的滑開與層狀結構分離的現象；撞針頭的形狀為尖頭撞擊到包膜水晶寶寶時，因為有自製層狀結構，包膜水晶寶寶會滑開不會直接破裂成兩半，不論是哪一種撞針，若無滑開現象的產生，則水晶寶寶會被平頭撞針擠壓至破裂或是被尖頭撞針刺穿，若滑開現象有產生則水晶寶寶儘管被撞擊至產生裂痕，但因為自製層狀結構的存在而不會破裂。

進行無包膜水晶寶寶撞擊試驗，撞針形狀為平頭時候，我們使用三顆不同的水晶寶寶。發現撞針在接觸到無包膜水晶寶寶後，水晶寶寶會立刻滑開，平頭撞針在水晶寶寶表面產生一道淺淺的裂痕；但若撞針形狀的為尖頭的時候，我們使用五顆不同的水晶寶寶，有四顆會裂成兩半，一顆在尖頭撞針刺入產生足夠深的裂痕之前就先滑開，而沒有裂成兩半。

表 4-4.1 烏賊卵與水晶寶寶撞擊試驗，不同撞針撞擊現象描述表。

撞針	健康烏賊卵	不康烏賊卵	包膜 水晶寶寶	無包膜 水晶寶寶
平頭	有滑動 無裂痕 無破裂	無滑動 無裂痕 有破裂	有滑動 無裂痕 無破裂	有滑動 無裂痕 無破裂
尖頭	無滑動 有裂痕 無破裂		有滑動 有裂痕 無破裂	有滑動 無裂痕 有破裂

圖 4-4.5 與表 4-4.2 (A)分別為無包膜水晶寶寶－平頭撞擊試驗結果，與撞針撞擊前的速度，撞擊後的速度，前後速度的差異表；圖 4-4.6 與表 4-4.2 (B) 分別為無包膜水晶寶寶－尖頭撞擊試驗結果，與撞針撞擊前的速度，撞擊後的速度，前後速度的差異表。

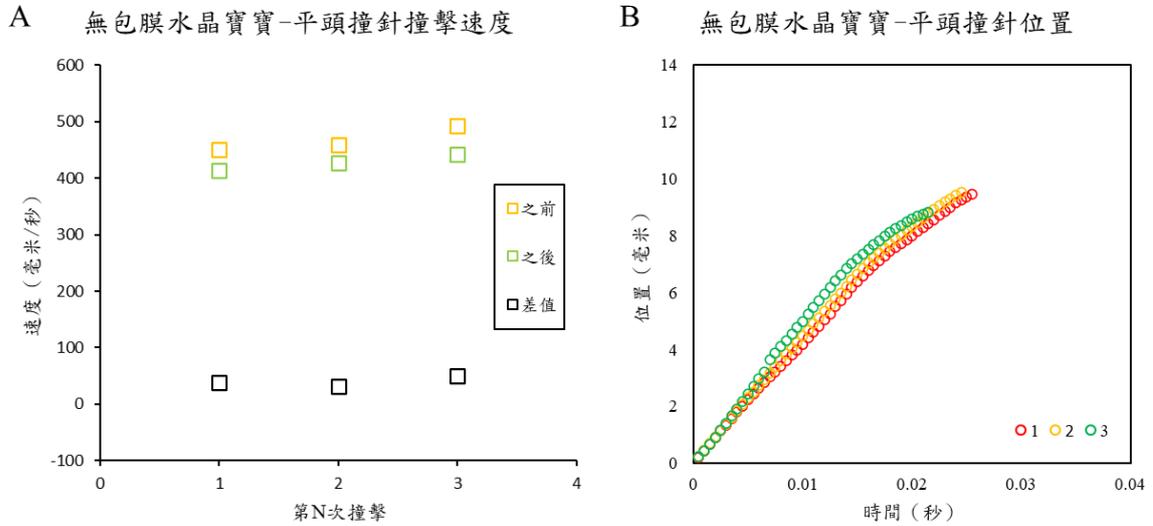


圖 4-4.5 無包膜水晶寶寶－平頭撞擊試驗結果。(A)為撞針撞擊速度分布圖，(B)為撞針位置對時間關係圖。

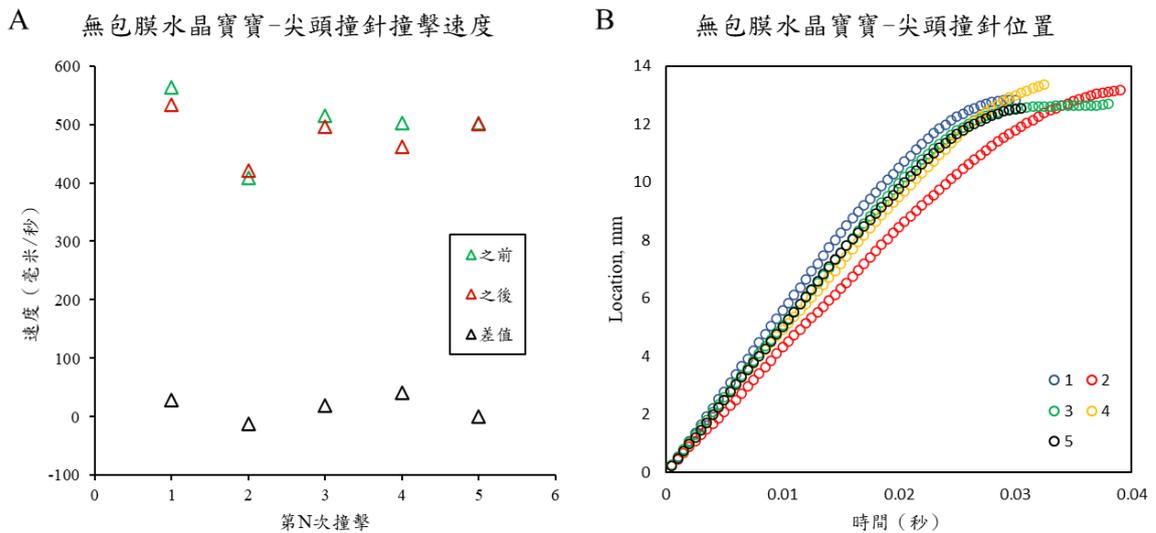


圖 4-4.6 無包膜水晶寶寶－尖頭撞擊試驗結果。(A)撞針撞擊速度分布圖，(B)撞針位置對時間關係圖。

表 4-4.2 無包膜水晶寶寶撞擊試驗數據表。(A)撞針形狀為平頭，(B)撞針形狀為尖頭。

A				B					
無包膜水晶寶寶—平頭撞擊試驗				無包膜水晶寶寶—尖頭撞擊試驗					
速度 (毫米/秒)	1	2	3	速度 (毫米/秒)	1	2	3	4	5
之前	451.2	458.3	493.1	之前	562.8	408.0	515.5	502.9	502.1
之後	412.8	426.8	442.4	之後	534.4	420.7	496.1	462.2	501.4
差值	38.38	31.44	50.7	差值	28.4	-12.7	19.4	40.7	0.7
直徑 (毫米)	16.3	16.2	15.5	直徑 (毫米)	14.8	15.7	15.9	16.5	15.6

圖 4-4.7 與表 4-4.3 (A)分別為包膜水晶寶寶－平頭撞擊試驗結果，與撞針撞擊前的速度，撞擊後的速度，前後速度的差異表；圖 4-4.8 與表 4-4.3 (B) 分別為包膜水晶寶寶－尖頭撞擊試驗結果，與撞針撞擊前的速度，撞擊後的速度，前後速度的差異表。

進行包膜水晶寶寶－平頭撞擊試驗時，我們總共使用 6 顆不同的水晶寶寶。發現平頭撞針在接觸到水晶寶寶後有 8/10 (80%)的機率會滑開，水晶寶寶若沒有滑開，則會被平頭撞針給撞成兩半，反之則可以透過層狀結構，使水晶寶寶維持原狀；進行尖頭撞針撞擊包膜水晶寶寶時，我們總共使用 3 顆不同的水晶寶寶，三顆皆產生滑動現象。其中的兩顆水晶寶寶遭到撞針刺入後表面產生裂痕，但因為層狀結構的存在，仍然能維持圓形的外觀。另一顆則在撞針刺入後，碎成兩半。

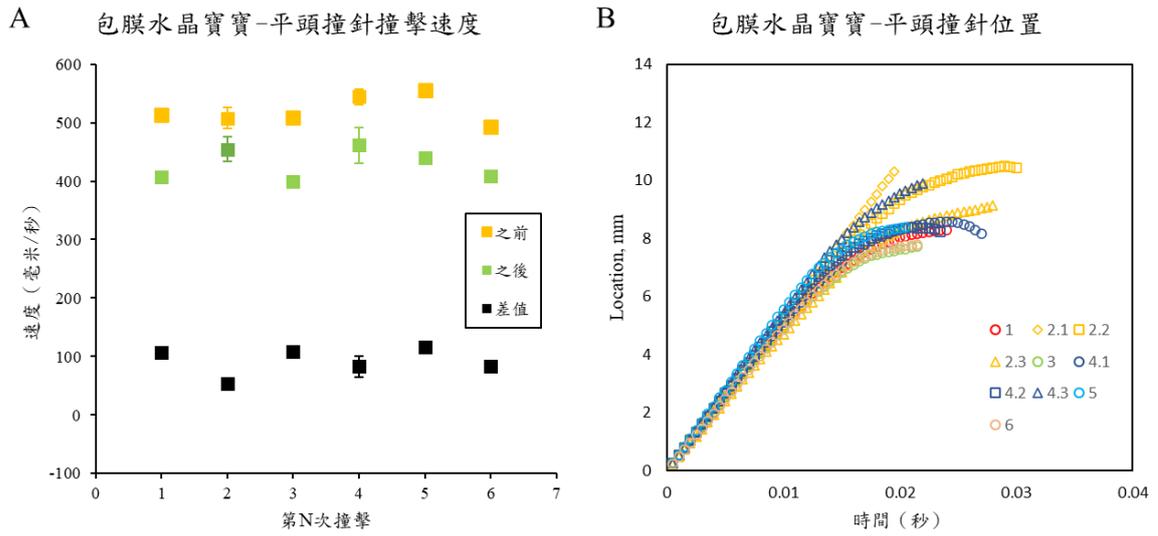


圖 4-4.7 包膜水晶寶寶—平頭撞擊試驗結果。(A)為撞針撞擊速度分布圖，(B)為撞針位置對時間關係圖。

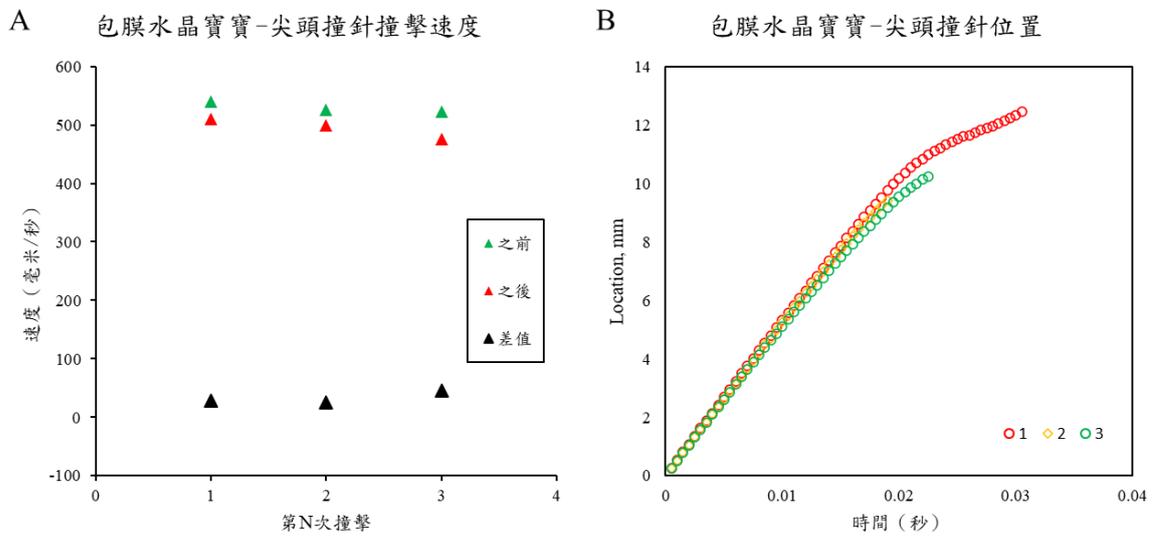


圖 4-4.8 包膜水晶寶寶—尖頭撞擊試驗結果。(A)為撞針撞擊速度分布圖，(B)為撞針位置對時間關係圖。

表 4-4.3 包膜水晶寶寶撞擊試驗數據表。(A)撞針形狀為平頭，(B)撞針形狀為尖頭。

A

包膜水晶寶寶—平頭撞擊試驗										
速度 (毫米/秒)	1	2.1	2.2	2.3	3	4.1	4.2	4.3	5	6
之前	513.7	514.1	526.4	483	508.1	532.8	536.5	562.8	555.4	493.3
之後	407.5	464.6	473.6	425.2	399.8	432.6	446.3	504.4	439.1	409.1
差值	106.2	49.5	52.9	57.8	108.3	100.2	90.2	58.4	116.3	84.1
半徑 (毫米)	13.1			14.2	12.9			12.6	12.8	12.8

B

包膜水晶寶寶—尖頭撞擊試驗			
速度 (毫米/秒)	1	2	3
之前	539.3	525.7	522.3
之後	510.8	499.5	475.7
差值	28.5	26.1	46.6
半徑 (毫米)	12.5	12.7	12.0

註：1、3、5 與 6 次撞擊試驗中，包膜水晶寶寶在撞擊在撞擊一次後，表面就有裂痕或是直接裂成兩半，故撞擊試驗次數只有一次；2 與 4 次撞擊試驗時，包膜水晶寶寶在撞擊三次之後，表面才出現裂痕，或是裂成兩半，故表中以 x.1、x.2 與 x.3 表示。

## 第五章 討論

### 第一節 動物實驗

#### 螯蝦獵食實驗

在實驗室的环境中下，本研究發現飢餓狀態的科氏礁螯蝦僅會對沾抹飼料氣味的烏賊卵進行獵食行為，若不對烏賊卵進行處理，科氏礁螯蝦就算在飢餓狀態也不會捕時烏賊卵。這是因為螯蝦靠嗅覺尋找食物，因為乳白色接近透明的烏賊卵不帶腥味，螯蝦不會將其視為潛在食物。

#### 軟絲野外觀察

龍洞灣的軟絲產房是直接暴露在暴露的海水中，沒有礁石做為隱蔽物，但在觀察過程中卻沒有看到任何的海中生物去獵食軟絲卵，推測是因為軟絲卵與烏賊卵相同，呈白色透明無味，海洋中的獵食者難以透過氣味或是顏色去找到軟絲卵。然而，此推論仍需要更多的觀察及量化做以佐證。

### 第二節 抗壓試驗機構設計

塑膠擠出的原理是透過將塑膠線材(PLA、PETG)加熱至特定溫度後，在由噴頭擠出至底板上一層一層的堆疊成型，在堆疊的過程中可能會因為階梯效應導致成品的表面粗糙，或是最後的尺寸與實際設計上有 0.10 毫米至 0.01 毫米的誤差產生。儘管上述的狀況是使用 3D 列印必定會遇到，透過事先預留間隙的大小或是由銼刀打磨進行後處理，可以有效的解決。

在第一版的機構中由於滑塊的長度不夠長，圖 5-2.1(A)中紅色圓圈的部分，齒輪帶動齒條往前進，進入到圖 5-2.1(A)中綠色圓圈時，因為齒條已經沒有被滑塊所包覆住，機構運行過程會有額外的阻力產生，不符合一開始設計出的定力裝置。

在第二版的機構中為了解決上述的問題，將原本分為上下兩半的滑塊，改成一整個滑塊，將齒條塞入中間預留的孔隙內，前端設計一個卡榫機構，方便更換平頭或是

尖頭撞針。

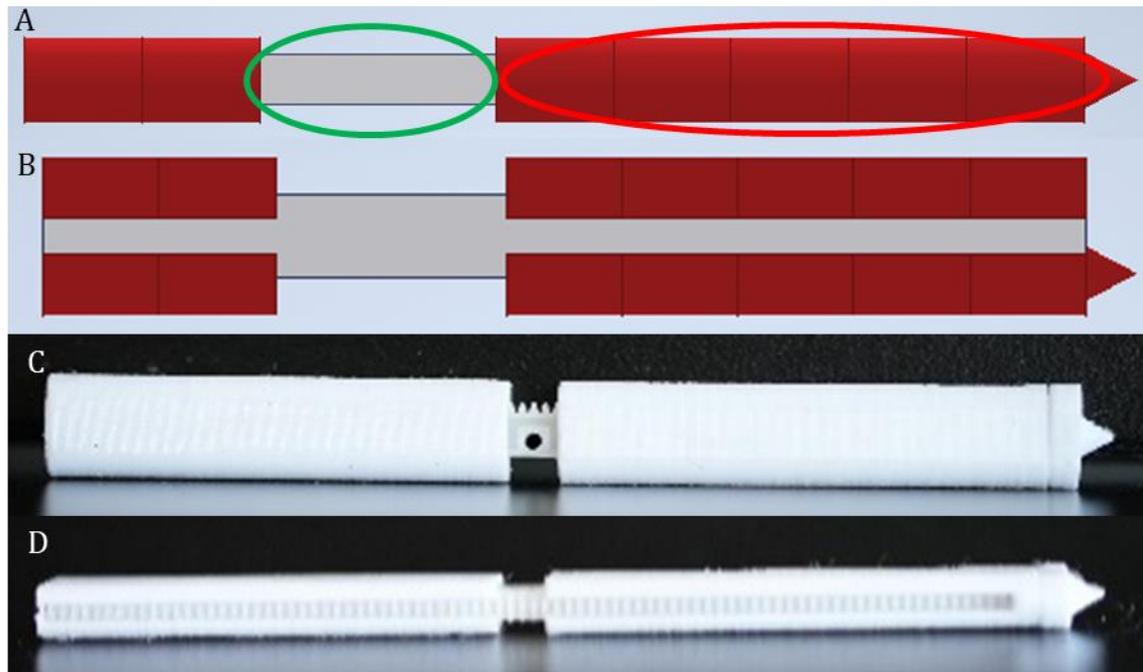


圖 5-2.1 前後兩版撞針比較圖。(A)第一版撞針左視圖。(B)第一版撞針上視圖。  
(C)第二版撞針左視圖。(D)第二版撞針上視圖。

由於撞擊裝置中固定馬達的套件由 3D 列印製作而成，列印出來的成品都會存在些許公差，當馬達無法穩定的固定在撞擊機構時，撞針撞擊到水晶寶寶或是烏賊卵時，撞擊所產生的反作用力與馬達運轉過程中的震動，會使馬達固定套件脫落，進而造成齒輪無法咬到齒條。因此只好人工按壓的方式進行固定，使撞擊試驗撞針的速度不同。

### 第三節 烏賊卵撞擊模擬實驗

健康或不健康甚至死掉的烏賊卵，在顏色及尺寸上不同，健康的烏賊卵相對起來會比較透明及乳白色，把健康的卵拿起來對者光源看的時候，清楚可見層狀結構及卵膜。

使用不同形狀的撞針進行撞擊試驗時，發現只有當撞針頭為平頭，烏賊卵遭到撞

擊之後才會滑開及分離層狀結構，如圖 5-3.1 所示。層狀結構分離現象若要發生必定伴隨滑動現象，反之則不一定；若撞針頭為尖頭時，烏賊卵遭到撞擊之後不會滑開，層狀結構維持在表面，但在重複撞擊五至六次之後，烏賊卵會被撞出一個小洞，但層狀結構沒有裂開，內部的卵黃周液沒有流出。也就是說烏賊卵層狀結構的保護效果會因為撞針為平頭或是尖頭而有差異。然而，滑動現象產生的原因、分離的層狀結構層數及厚度為何，層狀結構分離後對於生存率的影響等相關因素，仍須進一步的研究。



圖 5-3.1 烏賊卵層狀結構。紅色圓圈內較小深色的區塊，為分離後的層狀結構堆疊在一起。

健康卵－平頭撞擊試驗（一）第十次和第十一次的曲線斜率下降，是因為撞針移動的速度有明顯下降所造成，烏賊卵本身並沒有發生了明顯性質改變。

本研究觀察到對於同一顆健康烏賊卵，使用尖頭的撞針進行撞擊，隨著撞擊的次數增加，烏賊卵的觸感會變得柔軟且更容易壓縮，與健康卵－尖頭撞擊試驗曲線和緩的部分較晚才出現的結果相符。

烏賊卵表面在尖頭撞針撞擊多次後，層狀結構出現了小洞，所以在健康卵－尖頭撞擊試驗第六次撞擊時，撞針會先進入到一小段空心的區域，才碰到層狀結構或是卵黃周液，進而造成斜率趨緩，撞針能夠以接觸到烏賊卵前的速度移動更遠距離。

#### 第四節 水晶寶寶模擬撞擊實驗

包膜水晶寶寶—尖頭撞擊試驗中第一顆水晶寶寶在受到尖頭撞針撞擊後，破裂成兩半，然而第二及第三顆水晶寶寶在高速攝影的影片中還是會出現一道裂痕，但是因為自製層狀結構的存在，可以使裂痕不會繼續擴大。在包膜水晶寶寶—平頭撞擊試驗撞針撞擊到水晶寶寶出現裂痕之前，若滑動與層狀結構分離的現象已經先發生，當撞擊結束之後水晶寶寶仍能夠維持原本狀態，則不會破裂。

使用平頭撞針時撞擊包膜水晶寶寶前後的速度差異，都較無包膜水晶寶寶的高，水晶寶寶可能因為包了層狀結構而變硬，讓撞針在撞擊速度上從 40.2 毫米/秒上升至 80.4 毫米/秒；對於相同處理的水晶寶寶，平頭撞針撞擊水晶寶寶前後速度差異較尖頭撞針較大。這可能是因為，平頭撞針是對一個平面施加應力，由於接觸面積較大，單位面積受到的外力較小。而尖頭撞針的面積極小，在接觸面形成非常高的應力集中，使局部受力變高，進而導致破裂。

烏賊卵與包膜水晶寶寶相比最大的差異是在於內部物質，烏賊卵內部大多由卵黃周液與海水所組成，水晶寶寶則為具有彈性的固體，相比之下烏賊卵較包膜水晶寶寶沒那麼硬，這可能是造成兩者在撞針接觸到待撞物前後速度差異不同的原因。

除此之外，每次撞擊試驗撞針速度的影響、層狀結構厚度的影響與不同撞針外型的影響，仍需要進一步的實驗進行驗證。

## 第六章 結論

在實驗室的環境下中，虎斑烏賊的卵若不進行任何的處理，例如：塗抹飼料使其帶有腥味，科氏礁螯蝦不會獵食烏賊卵，與軟絲野外觀察中的現象相似，卵若呈白色透明無味，獵食者較難發現進行獵食。在烏賊卵撞擊模擬實驗中發現虎斑烏賊的卵在具有很大的可壓縮性，當施加的外力及壓縮量大到一定程度時，烏賊卵的層狀結構會和其卵分離。從實驗結果可以發現，受到固定外力的時候，烏賊卵會有滑動及層狀結構分離的現象，其中層狀結構的分離必定伴隨滑動現象的產生，但是確切的誘發機制仍然不清楚。

透過水晶寶寶模擬撞擊實驗中，我們發現層狀結構的存在有三個好處。首先，能夠提高水晶寶寶的抗撞擊能力，讓他在遭受撞擊時不會直接裂成兩半；再者，現實生活中撞針若分別撞一個比較硬與比較軟的物品，比較撞擊前後的速度差異，未發現撞擊應的物品前後速度會差異較大，而平頭撞針撞擊包膜的水晶寶寶前後的速度差異較無包膜水晶寶寶大，代表水晶寶寶的可能在層狀結構的出現後有變硬；最後，撞擊物的形狀對於水晶寶寶是否破裂也有所影響。若撞擊物的幾何外型為平頭，則水晶寶寶僅會受到壓縮，較不容易破。若撞擊物的幾何外型為尖頭，水晶寶寶則容易被刺穿導致破裂。

文獻回顧的過程中，發現關於彈性體楊氏係數的現有測量方法主要以拉伸試驗 (Akhtar et al., 2011; Miserez et al., 2015) 為主，通常用於測量機械性質的試驗使用圓柱體或立方體的待測物 (Fincan, 2015)。缺乏關於球型彈性體機械性質的測量方式，或是球性彈性體受到撞擊時的運動描述，尚無法使用數學模型來進行描述。

儘管本研究尚未將此概念透過纜線、錨與自製層狀結構來做驗證，但成功在實驗室透過自製層狀結構與水晶寶寶，重現烏賊卵撞擊試驗中觀察到的層狀結構脫落特性，驗證可分離的層狀結構確實在提升抗撞擊能力上有所提升，此概念確實能夠保護海底纜線免於錨的破壞。

## 參考資料

### (一) 中文註釋或參考資料

中時新聞網，〈海底電纜 維修費用〉，(民109年10月13日)。〈馬祖海底電纜又斷 千萬元飛了 - 地方新聞 - 中國時報 (chinatimes.com)〉 (20 Oct. 2022).

iThome，〈海底電纜 損壞〉，(民95年12月9日)。〈亞洲海底電纜全面修復還要幾個星期 | iThome〉 (20 Oct. 2022).

廖吉義，〈輸電海底電纜預防維護管理、故障監測與檢測、纜線接續等技術與運用於智慧電網運行模式研習出國報告〉，(民106年1月)：18-20。

Google，〈臺灣海域船舶動態資訊〉。〈臺灣海域船舶即時資訊系統 (motcmpb.gov.tw)〉 (20 Oct. 2022).

黃玉鈴、蔡豐富、張修銘、王文良、江伯源，〈海藻酸-“鈣鹽”-微膠囊成型性及粒子品質比較〉，《農林學報》61(2) (民國101年)：185-202。

邵廣昭、楊瑞森、陳康青、李源鑫 (2001)。台灣海域魚卵圖鑑。台北市：中央研究院。

### (二) 外文註釋或參考資料

Akhtar, R., Sherratt, M. J., Cruickshank, J. K., & Derby, B. (2011). Characterizing the elastic properties of tissues. *Mater Today (Kidlington)*, 14(3), 96-105.  
[https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70059-1](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70059-1)

Barbieri, E., Barry, K., Child, A., & Wainwright, N. (1997). Antimicrobial Activity in the Microbial Community of the Accessory Nidamental Gland and Egg Cases of *Loligo pealei* (Cephalopoda: Loliginidae). *The Biological Bulletin*, 193(2), 275-276. <https://doi.org/10.1086/BBLv193n2p275>

Boletzky, S. v. (2003). Biology of early life stages in cephalopod molluscs. *Advances in Marine Biology*, 44, 144-204.

Bonnaud, L., Franko, D., Vouillot, L., & Bouteau, F. (2013). A study of the electrical polarization of *Sepia officinalis* yolk envelope, a role for Na(+)/K(+)-ATPases in osmoregulation? *Commun Integr Biol*, 6(6), e26035.  
<https://doi.org/10.4161/cib.26035>

Clark, B. (2016). Undersea cables and the future of submarine competition. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 72(4), 234-237.

- <https://doi.org/10.1080/00963402.2016.1195636>
- Cronin, E. R., & Seymour, R. S. (2000). Respiration of the eggs of the giant cuttlefish *Sepia apama*. *Marine Biology*, 136(5), 863-870.  
<https://doi.org/10.1007/s002270000274>
- Eleftherakis, D., & Vicen, R. (2020). Sensors to Increase the Security of Underwater Communication Cables: A Review of Underwater Monitoring Sensors. *Sensors (Basel)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030737>
- Fincan, M. (2015). *Assessing viscoelastic properties of polydimethylsiloxane (PDMS) using loading and unloading of the macroscopic compression test*. University of South Florida.
- Forsythe, J., DeRusha, R., & Hanlon, R. (1994). Growth, reproduction and life span of *Sepia officinalis* (Cephalopoda: Mollusca) cultured through seven consecutive generations. *Journal of Zoology*, 233(2), 175-192.
- Iglesias, J., Fuentes, L., & Villanueva, R. (2014). *Cephalopod culture*. Springer Science & Business Media.
- Jereb, P., Allcock, L. A., Lefkaditou, E., Piatkowski, U., Hastie, L. C., & Pierce, G. J. (2015). Cephalopod biology and fisheries in Europe: II. Species Accounts.
- Kvalstad, T. J., Nadim, F., & Arbitz, C. B. (2001). *Deepwater Geohazards: Geotechnical Concerns and Solutions* All Days,
- Lee, M. F., Lin, C. Y., Chiao, C. C., & Lu, C. C. (2016). Reproductive Behavior and Embryonic Development of the Pharaoh Cuttlefish, *Sepia pharaonis* (Cephalopoda: Sepiidae). *Zool Stud*, 55, e41.  
<https://doi.org/10.6620/ZS.2016.55-41>
- Martins, C. P. P., Fernández-Álvarez, F. Á., & Villanueva, R. (2018). Invertebrate predation on egg masses of the European cuttlefish, *Sepia officinalis*: An experimental approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 200, 437-448.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.11.016>
- Miserez, A., Weaver, J. C., & Chaudhuri, O. (2015). Biological materials and molecular biomimetics - filling up the empty soft materials space for tissue engineering applications. *J Mater Chem B*, 3(1), 13-24.  
<https://doi.org/10.1039/c4tb01267d>
- Nabhitabhata, J., & Ikeda, Y. (2014). *Sepioteuthis lessoniana*. *Cephalopod culture*, 315-347.
- Osthoff, D., Heins, E., & Grabe, J. (2017). Impact on submarine cables due to ship anchor - soil interaction. *geotechnik*, 40(4), 265-270.  
<https://doi.org/10.1002/gete.201600027>
- Sauer, W. H., McCarthy, C., Smale, M. J., & Koorts, A. S. (1993). An investigation of the egg distribution of the chokka squid, *Loligo vulgaris reynaudii*, in Krom Bay,

- South Africa. *Bulletin of marine science*, 53(3), 1066-1077.
- Tongtherm, K., Nabhitabhata, J., Srisuk, P., Nutadhira, T., & Tonnayopas, D. (2016). New records of nautiloid and ammonoid cephalopod fossils in peninsular Thailand. *Swiss Journal of Palaeontology*, 135(1), 153-168.
- Wang, C., Fan, X., Jiang, X., Song, W., & Xu, Y. (2010). Characteristics of the tertiary egg membrane of cuttlefish *Sepiella maindroni* de Rochebrune. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 28(6), 1206-1212.  
<https://doi.org/10.1007/s00343-010-9024-3>
- Wang, F., Dai, Z., Nakahara, Y., & Sonoyama, T. (2018). Experimental study on impact behavior of submarine landslides on undersea communication cables. *Ocean Engineering*, 148, 530-537. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.050>
- Worms, J., & PR, B. (1983). Cephalopod life cycles. In: Academic Press London.
- Zatylny-Gaudin, C., & Henry, J. (2018). Egg-Laying in the Cuttlefish *Sepia officinalis*. In *Biological Resources of Water*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71915>