

行政院國家科學委員會補助  
大專學生研究計畫研究成果報告

\* \*\*\*\*\* \*  
\* 計 畫 \*  
\* : 台灣常見潮間帶海膽的棘刺生物力學研究 \*  
\* 名 稱 \*  
\* \*\*\*\*\* \*

執行計畫學生： 王惟聖  
學生計畫編號： NSC 101-2815-C-005-058-B  
研究期間： 101 年 07 月 01 日至 102 年 02 月 28 日止，計 8 個月  
指導教授： 紀凱容

處理方式： 本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1 年後可公開查詢

執行單位： 國立中興大學物理學系（所）

中華民國 102 年 03 月 31 日

## (一) 摘要

海流為潮間帶生態的重要物理限制因子之一；如何不被海流沖走，是潮間帶生物所要解決的問題。梅氏長海膽 (*Echinometra mathaei*) 常見於台灣岩岸潮間帶，野外觀測發現掘穴而居的梅氏長海膽在靠近壁邊的大棘會損壞變短。本研究藉由材料力學觀點，量測海膽棘刺的形狀與材料結構力學特性，以探討梅氏長海膽的大棘可能如何助其適應穴居生活；此外，本研究亦比較潮間帶的梅氏長海膽與分布較近亞潮帶的口鰓海膽 (*Stomopneustes variolaris*)，探討海膽棘刺材料特性對環境的適應。結果顯示，棘刺形態生長比例在個體內大致相同，而在棘刺的不同位置量得的楊氏系數不同，表示海膽棘刺為不均質材料，且尖端的材料較基部硬。斷過變短的刺之斷裂力與荷重-位移斜率高於完整無損的刺，因此用磨短刺來支撐岩壁，可在較小位移中獲得較高的支撐力。雖然梅氏長海膽的楊氏系數與口鰓海膽無顯著差異，但因梅氏長海膽棘刺較口鰓海膽粗短（刺長-刺徑回歸斜率較低），梅氏長海膽棘刺斷裂力高於口鰓海膽，此可能造成梅氏長海膽在海浪作用力較強潮間帶的生存優勢。

## (二) 前言

海膽為潮間帶常見的底棲固著生物，棘刺形態多樣為其的重要特徵，並有有空心與實心之分。海膽的棘刺具有防禦、移動、或挖掘等功能，較鈍粗者可能有助於身體固定在洞穴中 (Cavey & Märkel, 1994)。海流為潮間帶生態的重要物理限制因子之一，如何不被海流沖走是潮間帶生物所要解決的重要問題，過去曾有研究從流體力學的角度，來探討海膽棘刺形態與抵抗海浪衝擊的關係。

銅盞海膽 (*Colobocentrotus atratus*) 生長在海流作用力強的碎浪區，其扁平的棘刺使自己有著較為流線、平滑的外觀。Gallien 在 1986 提出銅盞海膽相較於生存在相同地帶的梅氏長海膽 (*Echinometra mathaei*) 擁有較低的阻力係數。Gallien 推論銅盞海膽光滑的外型有助於降低水的作用力，可降低被海流沖走的風險。但 Denny 與 Gaylord (1996) 卻提出不同的意見，他們發現雖然銅盞海膽的阻力係數降低了，但升力係數的增加卻不成比例。換句話說，銅盞海膽特殊的外型雖然讓他減低了水的壓力阻力，但卻造成了更高的升力作用，因此流體對其作用的總力不減反增。因此，Denny 與 Gaylord 認為在高加速的海流當中，銅盞海膽的阻力、升力係數同時低於梅氏長海膽，而能生長在海流作用力較強的碎浪區。

在 2011 年 Moureaux 與 Dubios 的研究中比較分布於潮間帶與亞潮帶兩地的同種歪型海膽 (*Echinocardium cordatum*)，來探討海浪衝擊與海膽棘刺材料特性的關聯。分布於潮間帶的個體，棘刺的楊氏係數 (Young's modulus，數值較高代表材料較硬)、彎曲硬度 (bending stiffness，數值較高代表不易彎曲)、斷裂力皆高於分布於亞潮帶的個體。由於海浪作用在潮間帶較強，作者推測生活在潮間帶的物種因此需要較堅固的棘刺避免斷裂，並能保護身體。

海膽的棘刺由 stereom 組成，其主要成分為碳酸鈣，光學特性似單晶方解石 (Weiner S. et al., 2000)。在 1983 年，Burkhardt 等人以冠海膽科 (Diadematoid) 物種為材料來研究空心海膽棘刺的彎曲特性，他們提出海膽棘刺為一等應變樑 (constant strain beam) 設計，並且以較少材料達到高壓力承載能力。由內部結構來看，實心海膽棘刺中心為髓質 (medulla)，其硬度與楊氏系數皆低於皮質 (cortex) (Fig. 1)；且在皮質縱切面上測得的楊氏系數高於

橫截面，此力學上的非均質性可能與生物適應有關 (Moureaux et.al, 2010)。

梅氏長海膽常見於台灣岩岸潮間帶，前人指出其大棘相對體長過於粗短，不足以嚇阻掠食者。我在野外觀測發現掘穴而居的梅氏長海膽在靠近壁邊的大棘會磨損變短(Fig. 2)。口鰓海膽與梅氏長海膽經常一起出現於礁岩海岸，具有不同的離岸距離：梅氏長海膽經常分佈於近岸的潮間帶中，而口鰓海膽則分佈於離岸較遠的潮間帶與亞潮帶的交界區。此兩種海膽有一共同特徵為會利用刺掘穴而居。生活在潮間帶環境中的生物隨時都面臨可能被海流帶走的危機，而在我野外採集海膽的過程中，發現海膽可以利用棘刺抵抗外來的作用力。本研究藉由材料結構力學觀點，來探討梅氏長海膽的大棘如何助其適應穴居生活並討論梅氏長海膽與口鰓海膽棘刺的材料特性是否具有生態適應上的意義。而此，本研究探討的問題如下：

1. 梅氏長海膽棘刺種內形態與力學特性差異
2. 梅氏長海膽正常刺與損壞刺的力學特性差異
3. 海膽種間力學差異與環境的關係

### (三) 材料方法

#### 1. 材料準備

由台灣宜蘭石城、台東伽路蘭、花蓮石梯坪採得五隻體長介於 2.5~3 公分梅氏長海膽 (*Echinometra mathaei*) 樣本。於石梯坪採得一體長約 2.7 公分口鰓海膽 (*Stomopneustes variolaris*) 活體標本。

將活體海膽置於人工海水的海水缸中飼養，自然死亡後，棘刺自然掉落，選擇較長較粗之棘刺來進行材料力學測試實驗 (Fig. 2、Fig. 3)。但由於其中一隻梅氏長海膽棘刺幾乎都有斷裂，而另隻個體的刺與其他個體混雜，故只使用另外三個樣本進行實驗。其一個體棘刺尚未掉落，用手術刀將棘刺取下。

#### 2. 形態數據分析

以游標卡尺量測棘刺的全長、環直徑、以及環上方的棘直徑做為棘直徑的代表 (Fig. 4)。顧及棘刺原處於海水環境而非酒精，我在形態量測完畢後將樣本置於人工海水中保存。為比較各形態量測值在種內與種間是否有差異，我將棘刺全長與棘直徑、棘直徑與環直徑進行線性回歸分析，並經由多對斜率檢定，來比較梅氏長海膽棘刺形態變化，並與口鰓海膽比較形態比例的關係趨勢是否相同。

### 3. 材料力學測試

#### (1) 單點固定彎曲測試

為模擬觀察海膽棘刺在真實狀況下的彎曲表現，我取三隻梅氏長海膽棘刺以及口鰓海膽棘刺樣本各 5 支，用材料測試機對棘刺進行單點固定彎曲測試 (cantilever beam bending test) (Fig. 5a)。我將樣本基部 2~3 mm 夾於自製夾具中，再將自製夾具固定於拉伸測試用的客製夾具，使樣本與刀具垂直。以 1 mm/min 的荷重速度，於樣本尖端約略全長 85~95 % 位置施加負荷。使用兩種不同的荷重方式進行測試。

為觀察相同刺改變長度的力學表現，需避免棘刺斷裂以進行重複試驗。設定刀具荷重至為最大值 (0.5 N) 後開始返回位移原點，過程中不壓斷刺，完成一次測試後，接著在不同的位置重複荷重測試，以模擬同支刺在不同長度時的力學表現。最後，為測得棘刺斷裂力，則荷重直至棘刺斷裂為止，並記錄棘刺的斷裂力 ( $F_{\max}$ )。斷裂樣本取下後，用游標卡尺量測斷裂截面半徑，以計算出截面面積。此結構的強度 (strength; 單位為  $\text{Nmm}^{-2}$ )，即最大承載的應力，為  $F_{\max}$  除以斷裂面截面積。若棘刺斷裂於尖端處，則將自製夾具向刀具處移動，使刀具荷重於斷裂後的尖端，再進行一次實驗，直到棘刺長度低於刀具寬度不足以進行實驗 (刀具會撞到夾具)，其各次的斷長將用 Image J 軟體讀入實驗照片進行計算。

開始實驗前，用 Nikon D90 紀錄實驗擺設狀態。紀錄施加外力  $F$  (單位為 N) 與樣本受力形變的移動距離  $y$  (單位為 mm)，將棘刺承受外力  $F$  與其端點移動距離  $y$  做圖。反覆測驗以取荷重 0.1~0.4 N 的數據點進行回歸得回歸斜率 ( $F/y$ )；壓至斷裂測試則取最後 20 個數據點 (斷裂前 0.333 mm 位移) 經迴歸分析。將  $F/y$  帶入下列楊氏系數計算式中：

$$\text{Young's modulus} = E = \frac{1}{I} \frac{FL^3}{3y} \quad (\text{式一})$$

$E$  為楊氏係數 (單位為 GPa)， $I$  為截面二次軸矩 (second axial moment of area, 單位為  $10^{-15} \text{m}^4$ )， $L$  為物體 (棘刺) 長度 (單位為 mm)。 $I$  的部分將假設棘刺為一圓柱體，將實驗實用拍攝的照片讀入 Image J 軟體，以照片中的方格紙為比例尺記計算出懸空部分的棘刺面積及長度，兩者相除得懸空部分的平均半徑  $R$ 。將平均半徑帶入下列公式算出  $I$  值：

$$I = \pi R^4 / 4 \quad (\text{式二})$$

將  $E$  與  $I$  相乘，則可得彎曲硬度 ( $EI$ , bending stiffness, 單位為  $10^{-6} \text{Nm}^2$ )

將梅氏長海膽、口鰓海膽測量所得之  $E$ 、 $F_{\max}$  值進行 ANOVA 統計分析，以比較種間、種內是否有顯著差異。

#### (2) 三點彎曲測試

為進一步探討梅氏長海膽棘刺的材料特性，我採用三點彎曲測試 (three point bending

test)(Fig. 5b)，來量測 32 支梅氏長海膽的棘刺。將樣本水平置於拉伸測試用的客製夾具，以 1 mm/min 的荷重速度，於樣本約略中間位置施加負荷。開始實驗前，用 Nikon D90 紀錄實驗擺設狀態。紀錄施加外力  $F$ （單位為 N）與樣本受力形變的移動距離  $y$ （單位為 mm），直至刺斷裂為止。

將棘刺承受外力  $F$  與其端點移動距離  $y$  做圖，取最後 20 個數據點（斷裂前 0.333 mm 位移）經迴歸分析，將迴歸斜率（ $F/y$ ）帶入下列楊氏係數式中：

$$\text{Young's modulus} = E = \frac{1}{I} \frac{FL^3}{48y}$$

（式三）

式中  $I$  的計算與單點測試相同。

## （四） 結果

### 形態測量

三隻梅氏長海膽採集到的 93 支完整棘刺樣本的棘全長為  $11.043 \pm 1.555$  mm，棘直徑為  $1.744 \pm 0.280$  mm，環直徑為  $1.965 \pm 0.280$  mm。經 ANOVA 統計分析，棘直徑與環直徑在個體間沒有顯著差異（ANOVA，棘直徑： $P = 0.31$ 、環直徑： $P = 0.16$ ）；但在長度卻有顯著差異（ANOVA， $P < 0.0001$ ）（Table 1a）。由一隻梅氏長海膽個體採集的 11 支斷刺樣本，棘全長為  $7.750 \pm 1.694$  mm，與完整刺有顯著差異（ $t$ -test， $P < 0.0001$ ）；棘直徑為  $1.727 \pm 0.320$  mm，環直徑為  $1.932 \pm 0.322$  mm，與完整刺沒有顯著差異（ $t$ -test， $P = 0.85$ 、 $0.74$ ）。由一隻口鰐海膽個體採集的 20 支完整刺，棘全長為  $28.010 \pm 7.616$  mm，與梅氏長海膽完整刺有顯著差異（ $t$ -test， $P < 0.0001$ ）；棘直徑為  $2.125 \pm 0.503$  mm，環直徑為  $1.900 \pm 0.490$  mm，與梅氏長海膽完整刺沒有顯著差異（ $t$ -test， $P = 0.18$ 、 $0.19$ ）（Table 1b）。

Table 1b 亦顯示體型相似的梅氏長海膽，棘刺粗細無顯著差別，但長度不盡相同。磨短刺與完整刺無粗細的不同，表示棘刺可能是無差別選擇得被磨短。與梅氏長海膽體型相似的口鰐海膽，棘刺粗細與梅氏長海膽無顯著差別，但長度長於梅氏長海膽。

為確認海膽棘刺的長度、粗細在生長過程中是否依循固定模式，我將環直徑對棘直徑、棘直徑對刺全長進行線性迴歸分析（ $y=ax+b$ ），來比較同一個體不同棘刺的粗細、長度的特徵形態是否具有相關性，並比較種內、種間的相關趨勢（即迴歸方程式）是否一致。梅氏長海膽與口鰐海膽棘刺的棘直徑與環直徑皆呈現直線迴歸關係（ $P < 0.0001$ ）（Fig. 6）。經斜率相等性檢定，三隻梅氏長海膽個體間的回歸方程式相互平行，斜率（ $a$ ）為 0.835，但截距（ $b$ ）互不相等。口鰐海膽的回歸方程式斜率為 0.969，經斜率相等性檢定與梅氏長海膽之迴歸方程不平行。棘直徑與棘全長也都呈現直線迴歸關係（ $P < 0.0001$ ）（Fig. 7）。經斜率相等性檢定，三隻梅氏長海膽個體間的回歸方程式相互平行，斜率為 3.351，但截距互不相等。口鰐海膽的回歸方程斜率為 13.980，經斜率相等性檢定與梅氏長海膽之迴歸方程不平行。

為估計梅氏長海膽自行磨短棘刺後，棘刺長度的縮減比例，用其中一具斷刺個體之回歸方程式，估算磨短棘原長，得出磨短刺長度為磨短前長度的 50 ~ 95 % (Fig. 8)。磨短刺棘全長與基部直徑無回歸性。

## 力學測量

為模擬在真實情況下，海膽棘刺磨短前與磨短後的彎曲特性差異，用 1 支梅氏長海膽完整刺，在不同長度位置進行單點固定彎曲測試，採用反覆測試方法使棘刺不因單次測試而斷裂。隨著荷重處由基部向尖端移動，計算出的楊氏係數 ( $E$ )、彎曲硬度 ( $EI$ ) 遞增，且  $EI$  於長度 95 % 出現最大值；荷重-位移斜率 ( $F/y$ )、面二次軸矩 ( $I$ ) 則呈現遞減趨勢 (Fig. 9、Fig. 10)。 $E$ 、 $EI$  由基部向尖端遞增，呈現出棘刺材料的非均質性，尖端的材料可能較基部硬，且在單位長度、厚度下尖端材料較不易彎折。 $F/y$  由基部向尖端遞減，表示棘刺磨短後能在較小的形變中獲得較大的支撐力。 $I$  由基部向尖端遞減，則是因為棘刺末端漸細，導致棘刺平均厚度向尖端逐漸下降所造成。

為得知海膽棘刺在真實斷裂及變短情況下的力學表現，由三隻梅氏長海膽各取 5 支完整棘刺樣本，進行壓至斷裂的單點固定彎曲測試。測得的斷裂力 ( $F_{\max}$ ) 為  $5.290 \pm 2.247$  N，最高可承受 9.093 N 的荷重 (Table 2a)。有 4 隻樣本由於斷裂在尖端位置，得以再次進行材料測試。發現第一次斷裂大約位於 85 ~ 90 % 原長；棘刺斷裂後，再斷裂的斷裂力高於斷裂前，測得已斷裂棘刺最高可承受 16.216 N 荷重 (Fig. 11、Fig. 12)。已斷刺能承受較完整刺高的力，因此若先將棘刺磨短，則棘刺可承受更大的力。將斷裂力除以斷裂面積進行標準化可得斷裂應力(又稱強度, strength)，發現棘刺斷裂後，再斷裂的斷裂應力低於斷裂前 (Fig. 12)。此表示在單位長度、厚度下，棘刺尖端的材料能承受更高的力，再次顯示棘刺材料的非均質性。

5 支完整的口鰓海膽棘刺的  $F_{\max}$  為  $2.368 \pm 0.973$  N，可承受 3.604 N 的荷重，已斷裂的最高可承受至 4.048 N (Table 2b)。口鰓海膽與梅氏長海膽的經 student  $t$ -test，兩者有顯著差異 ( $P=0.014$ )，表示口鰓海膽棘刺能承受的力較梅氏長海膽低。

壓至斷裂的單點固定彎曲測試計算出  $E$  分別為  $5.838 \pm 4.134$  GPa、 $6.878 \pm 3.372$  GPa、 $9.987 \pm 2.066$  GPa，經 ANOVA 分析，三者無顯著差異 ( $P = 0.161$ ) (Table 2a)。由一梅氏長海膽個體取 28 支棘刺進行三點彎曲材料測試，計算出楊氏係數為  $5.697 \pm 3.031$  GPa。與兩測試之結果進行 student  $t$ -test，並無顯著差異 ( $P=0.097$ )。

口鰓海膽的楊氏係數為  $8.233 \pm 2.499$  GPa，與梅氏長海膽數據進行 student  $t$ -test，兩者無顯著差異 ( $P = 0.705$ ) (Table 2b)。表示口鰓海膽與梅氏長海膽棘刺的材料力學特性相似。

在第一次斷裂於尖端、多次進行壓至斷裂測試的 4 支梅氏長海膽樣本與 3 支口鰓海膽樣本中， $E$ 、 $EI$ 、 $F/y$ 、 $I$  隨不同長度位置的變化趨勢與梅氏長海膽棘刺進行的反覆測試結果相仿：， $E$ 、 $EI$  由基部向尖端遞增； $F/y$ 、 $I$  則呈現遞減趨勢 (Fig. 12、Fig. 13)。

## (五) 討論

本研究結果顯示，體型相似的梅氏長海膽，棘刺粗細無顯著差別，但長度不盡相同 (Table 1a)。梅氏長海膽個體間的形態特徵呈線性回歸關係 (Fig. 6、Fig. 7)。梅氏長海膽個體間的形態特徵回歸方程式不相等，表示種內的生長模式有變異。回歸方程式不相等是由截距不同所造成，代表個體間生長的初始值不同，初始值不同的來源為何在本研究尚無法解釋。由斜率相同的結果，推測種內棘刺的形態在生長過程中，增加比例為一定值，此表示同種同體型（相同生長階段）的海膽可能具有相同粗細的棘刺，長度雖在個體間變異較大，但在個體內仍會隨棘刺粗細的增加而變長，因此海膽可能無法使粗細或長度單獨增加，若海膽想生成粗且短的棘刺，只能依靠外界的磨損。梅氏長海膽磨短刺與完整刺無粗細的不同，表示棘刺可能是無差別選擇得被磨短，且磨短刺棘全長與基部直徑無回歸性，顯示磨短程度可能是隨機的，與棘刺粗細沒有關聯。

海膽棘刺的生長過程及機制目前尚未有定論，而根據 Tomas 在 1986 年提出的假說，由海膽本體的生長，造成骨骼乳突與棘刺基部間的張力變化至閾值，觸發棘刺表皮在短時間內堆疊材料，進行生長。棘刺表皮在棘刺上堆疊材料進行生長，可能使棘刺的長度、粗細同時增加，使個體內無法靠生長生成同粗但不同長的棘刺。

與梅氏長海膽體型相似的口鰓海膽，棘刺粗細與梅氏長海膽無顯著差別，長度長於梅氏長海膽 (Table 1b)。梅氏長海膽與口鰓海膽的形態特徵回歸方程式不相等，且斜率也不相等，表示種間的棘刺生長模式完全不同 (Fig. 6、Fig. 7)。

在反覆測試中，隨著荷重處由基部向尖端移動，計算出的楊氏係數 ( $E$ )、彎曲硬度 ( $EI$ ) 遞增，荷重-位移斜率 ( $F/y$ )、面二次軸矩 ( $I$ ) 則呈現遞減趨勢 (Fig. 10)；在壓至斷裂的測試中出現相同趨勢 (Fig. 12)，表示反覆測試的結果可代表棘刺縮短的真实狀況。 $EI$  於長度 95% 出現最大值， $I$  隨長度增加而遞減，可見在 95 % 長度之前， $EI$  主要受楊氏係數影響。95% 長度以後  $EI$  隨  $I$  值下降而降低， $E$  變化趨緩，表示 95% 長度以後的材料大致相同。由尖端測得的  $E$ 、斷裂壓力 (Strength) 較高知尖端的材料較基部硬，而從 Fig. 11 可知多次斷裂的棘刺第一次斷裂位置大約在原長的 85 ~ 90 %。尖端的材料較硬，有利於在防禦時刺穿掠食者，也有利於在挖洞時加強對岩壁的磨耗；因結構（尖端半徑較細）使尖端能承受最大力小於基部，此設計可使第一次斷裂發生在尖端而非整支斷裂。。

關於棘刺材料的不均質性已在 2010 年 Moureaux 等人的研究中探討，他們測得棘刺的髓質 (medulla) 與皮質 (cortex) 的楊氏係數不同，且皮質各層的楊氏係數也不同。可能是因各部位髓質與皮質的比例不同，以及不同層皮質的材料不同，造成了棘刺各部位材料特性的不同。

由 Fig. 11、Fig. 12 可知已斷裂刺的斷裂力 ( $F_{\max}$ )、 $F/y$  高於未斷裂刺，因此梅氏長海膽用預先磨短的刺來支撐身體，在遇海浪沖擊時可在較小位移獲得更大的支撐力，減少個體的移動，並降低遇衝擊時棘刺斷裂的風險。

梅氏長海膽與口鰓海膽的  $E$  並沒有顯著差異；但兩者的  $E$  與文獻中報導的冠海膽科

(Diadematoid) 海膽棘刺相比，低了約一個數量級 (Table 2b)，這表示海膽的棘刺材料在物種間可能不同，且梅氏長海膽與口鰓海膽的棘刺材料或許相似。數據的標準差相當大，可能是樣本不新鮮或是夾具設計造成的誤差。完整梅氏長海膽棘刺的斷裂力大於口鰓海膽，且斷裂後所能承受的最大力也高於口鰓海膽，這或許是梅氏長海膽在潮間帶較口鰓海膽優勢的原因之一。此結果可能是口鰓海膽棘刺較梅氏長海膽細長（刺長-刺徑回歸斜率較高）的設計所造成。

## (六) 結論

- (1) 海膽棘刺形態生長比例在個體內大致相同，棘刺材料分布不均勻，尖端的材料較基部硬。
- (2) 梅氏長海膽斷過變短的刺之斷裂力與 $F/y$ 值高於完整的刺，用損壞刺來支撐岩壁，可在較小位移中獲得較高的支撐力，並降低遇衝擊時棘刺斷裂的風險。
- (3) 梅氏長海膽與口鰓海膽的棘刺材料無顯著差異，但梅氏長海膽棘刺斷裂力高於口鰓海膽，此可能造成梅氏長海膽在潮間帶的生存優勢。

## (七) 致謝

感謝中興大學物理系生物力學實驗室所有成員給我的技術指導與建議。謝謝紀凱容老師耐心的指導，謝謝蔡峰岳學長在討論中給我諸多的建議，謝謝蔡餘慶學姐在我對實驗迷惘時給與解惑，謝謝洪語澤學長幫我製作實驗夾具，謝謝陳瑩學姐教我顯微鏡接像機的使用方法，謝謝曾宏焙學長幫我重新運轉海水缸，謝謝張桓僕學長陪我打球舒壓。感謝中興大學物理系施明智老師提供夾具改良的建議。也感謝中興大學生命科學系海洋生物研究室的曾宥維學長及李彥輝學長協助採集。感謝科博館的李坤瑄老師提供專業的海膽知識，讓我有更多的想法才能寫出這篇故事。感謝所有讓我喜歡上海洋生物的人，讓我找到研究方向並認識我感興趣的生物。感謝曾在這段研究期間，我遇到挫折、對未來感到迷惘，甚至失去自信時，為我指點迷津、拉我一把的人，謝謝你們讓我能走到現在。最後更要感謝為這個研究犧牲的海膽們，謝謝你們的付出，也感謝你們帶給我一段充實的研究回憶。



## (八) 參考文獻

- Burkhardt, A., Hansmann, W., Märkel, K., Niemann, H.** (1983). Mechanical Design in Spines of Diadematoïd Echinoids (Echinodermata, Echinoidea). *Zoomorphology* **102**, 189–203.
- Cavey, M. J., Märkel, K.** (1994). **Echinoidea**. In Harrison, F. W. and Chia, F. S. (eds.). *Microscopic Anatomy of Invertebrates. Vol. 14: Echinodermata*. Wiley-Liss, New York.
- Denny, M. W., Gaylord, B.** (1996). Why the sea urchin lost spines: hydrodynamic forces and survivorship in three echinoids. *J. Exp. Biol.* **199**, 717–726.
- Gallien, B.** (1986). A comparison of hydrodynamic forces on two sympatric sea urchins: implications of morphology and habitat. MSc thesis, University of Hawaii, Honolulu.
- Lawrence, J.** (1987). *A Functional Biology of Echinoderms*. The Johns Hopkins University Press Baltimore.
- Moureaux, C., Dubois, P.** (2012). Plasticity of biometrical and mechanical properties of *Echinocardium cordatum* spines according to environment. *Mar. Biol.* **159**, 471–479.
- Moureaux, C., Pérez-Huerta, A., Compe`re, P., Zhu, W., Leloup, T., Cusack, M., Dubois, P.** (2010). Structure, composition and mechanical relations to function in sea urchin spine. *J. Struct. Biol.* **170** (1), 41–49.
- Smith, A. B.** (1978). A functional classification of the coronal pores of echinoids. *Palaeontology*. **21**, 759–789.
- 李坤瑄、陳章波 (1994) 台灣常見的棘皮動物。國立海洋生物博物館籌備處。
- 任淑仙 (1995) 無脊椎動物學 下冊。淑馨出版社。

Table 1a 梅氏長海膽完整刺棘長、棘直徑、環直徑數據（平均值±標準差）。

| 個體（n=樣本數）         | 棘全長（mm）           | 棘直徑（mm）       | 環直徑（mm）       |
|-------------------|-------------------|---------------|---------------|
| 梅氏長海膽 1<br>（n=53） | 10.277 ± 1.451*** | 1.775 ± 0.307 | 2.019 ± 0.353 |
| 梅氏長海膽 2<br>（n=20） | 11.896 ± 0.814    | 1.744 ± 0.206 | 1.883 ± 0.216 |
| 梅氏長海膽 3<br>（n=20） | 12.220 ± 1.193    | 1.663 ± 0.264 | 1.903 ± 0.305 |
| ANOVA             | P < 0.0001        | P = 0.31      | P = 0.31      |

\*\*\*表示該數據有顯著差異（*t*-test，P < 0.0001）

Table 1b 梅氏長海膽完整刺與磨短刺，以及口鰓海膽完整刺的棘長、棘直徑、環直徑數據（平均值±標準差）。數據下方為與梅氏長海膽完整刺數據進行 *t*-test 統計的結果。

| 個體（n=樣本數）            | 棘全長（mm）                        | 棘直徑（mm）                     | 環直徑（mm）                     |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 梅氏長海膽完整刺<br>（n = 93） | 11.043 ± 1.555                 | 1.744 ± 0.208               | 1.965 ± 0.321               |
| 梅氏長海膽磨短刺<br>（n=11）   | 7.750 ± 1.694<br>(P < 0.0001)  | 1.727 ± 0.320<br>(P = 0.85) | 1.932 ± 0.322<br>(P = 0.74) |
| 口鰓海膽<br>（n=20）       | 28.010 ± 7.616<br>(P < 0.0001) | 2.125 ± 0.503<br>(P = 0.18) | 1.900 ± 0.490<br>(P = 0.19) |

Table 2a 梅氏長海膽與口鰓海膽棘刺的材料力學數據

| 個體<br>(n=樣本數)    | 楊氏系數, E<br>(GPa)  | 平均斷裂力, $F_{\max}$<br>(N) | 最大斷裂力 $F_{\max}$<br>(N) |
|------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| 梅氏長海膽 1<br>(n=5) | $5.838 \pm 4.134$ | $3.856 \pm 1.123$        | 5.437                   |
| 梅氏長海膽 2<br>(n=5) | $6.878 \pm 3.372$ | $4.380 \pm 2.765$        | 9.093                   |
| 梅氏長海膽 3<br>(n=5) | $9.987 \pm 2.066$ | $7.069 \pm 1.158$        | 8.784                   |
| ANOVA            | P = 0.161         |                          |                         |

Table 2b 梅氏長海膽與口鰓海膽材料力學數據。數據下方為與梅氏長海膽完整刺數據進行 *t*-test 統計的結果。

| 個體<br>(n=樣本數)        | 楊氏系數, E<br>(GPa)                 | 平均斷裂力, $F_{\max}$<br>(N)         | 最大斷裂力 $F_{\max}$<br>(N) |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 梅氏長海膽 (平均)<br>(n=15) | $7.568 \pm 3.561$                | $5.102 \pm 2.247$                | 9.093                   |
| 口鰓海膽<br>(n=5)        | $8.233 \pm 2.499$<br>(P = 0.705) | $2.368 \pm 0.973$<br>(P = 0.014) | 3.604                   |
| Diadema setosum*     | $52.1 \pm 9.5$                   |                                  |                         |
| Diadema antillarum*  | $45.7 \pm 13.7$                  |                                  |                         |

\*數據來源來自 Burkhardt A. *et al.*, 1983

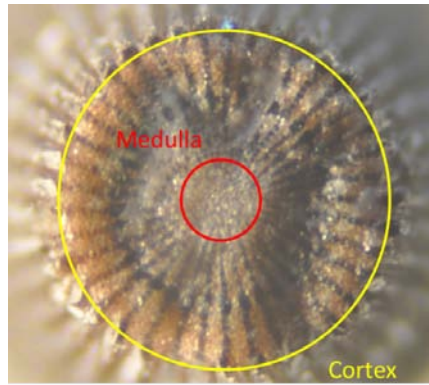


Fig. 1 梅氏長海膽棘刺橫截圖。紅色區域為髓質 (medulla)、黃色區域為皮質 (cortex)。

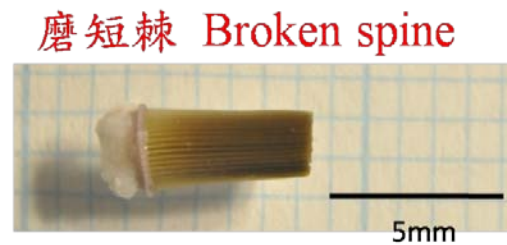
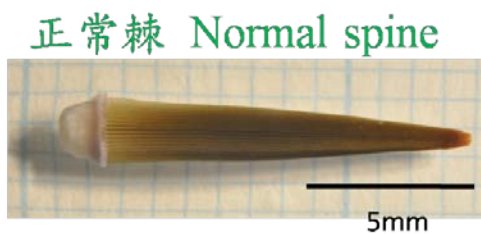


Fig. 2 梅氏長海膽的正常棘與磨短棘



Fig. 3 口鰓海膽的棘刺

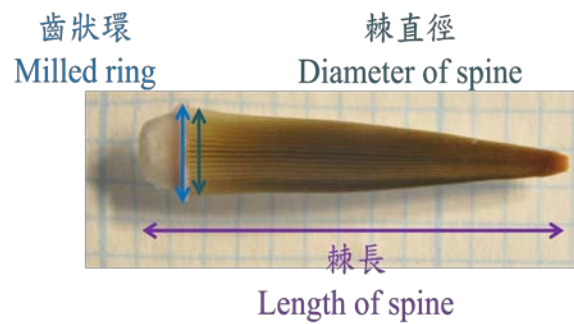


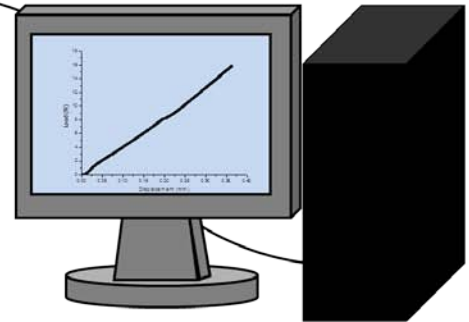
Fig. 4 海膽棘刺形態量測特徵。以環上方的棘直徑做為棘直徑的代表。

材料測試機

單向或往復測試  
測試速度：1 mm/min



紀錄各下壓位移點的Load，  
並計算其斜率 ( $F/y$ )



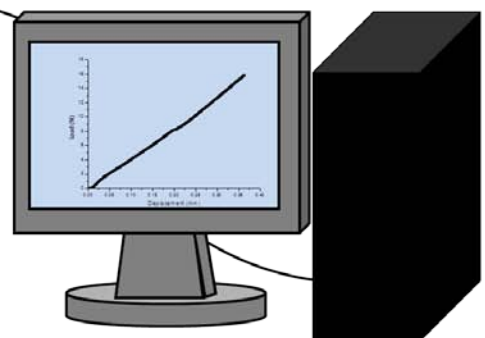
(a)

材料測試機

測試速度：1 mm/min



紀錄各下壓位移點的Load，  
並計算其斜率 ( $F/y$ )



(b)

Fig. 5 材料測試實驗示意圖： (a)單點測試，(b)三點測試

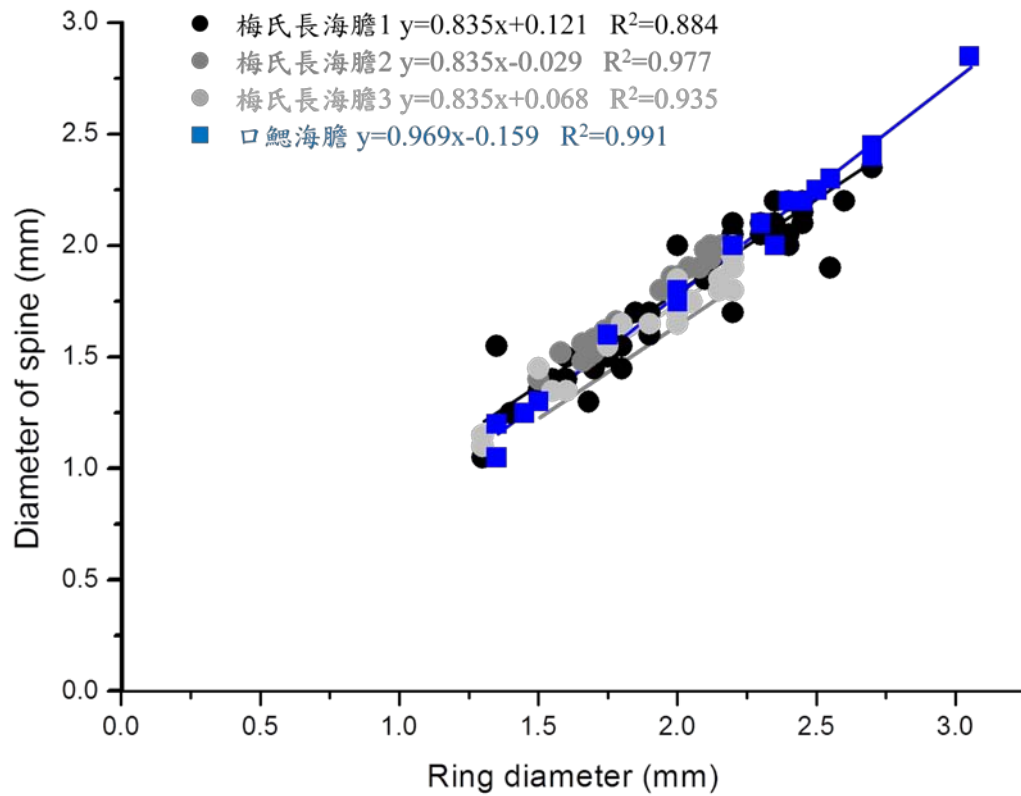


Fig. 6 梅氏長海膽與口鰓海膽棘刺直徑-環直徑散布圖。棘直徑與環直徑皆呈現直線回歸關係 ( $P < 0.0001$ )。三隻梅氏長海膽個體間的回歸方程式相互平行，但截距互不相等。口鰓海膽的回歸方程式經斜率相等性檢定與梅氏長海膽之回歸方程不平行。

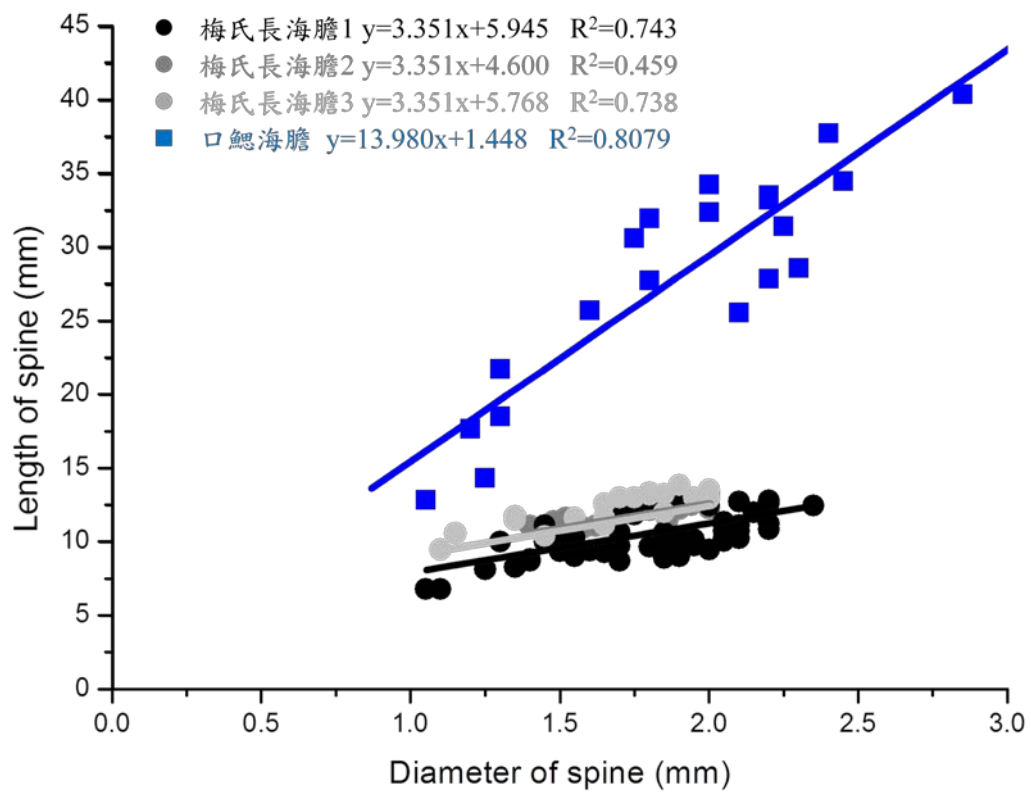


Fig. 7 梅氏長海膽與口鰓海膽棘刺刺長-刺直徑散布圖。棘直徑與棘全長呈現直線回歸關係 ( $P < 0.0001$ )。經斜率相等性檢定，三隻梅氏長海膽個體間的回歸方程式相互平行，但截距互不相等。口鰓海膽的回歸方程式經斜率相等性檢定與梅氏長海膽之回歸方程不平行。

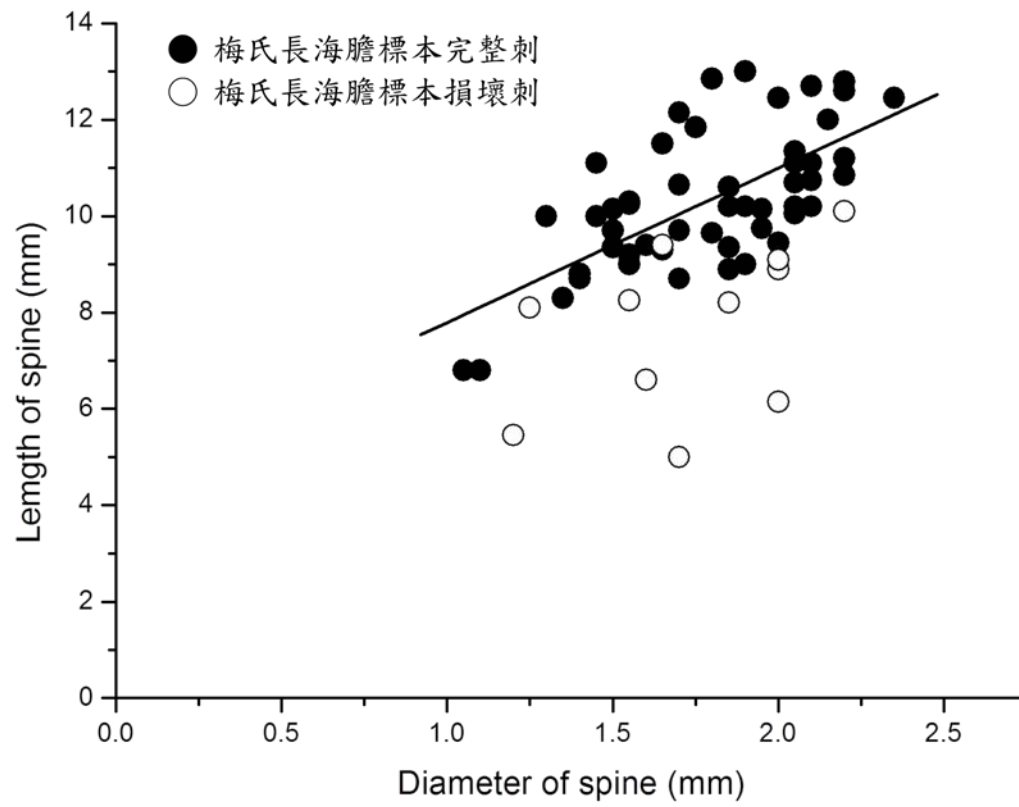


Fig. 8 梅氏長海膽 1 正常刺與損壞刺刺長-刺直徑散布圖。斷刺長度估計為斷前長度的 50~95 %。



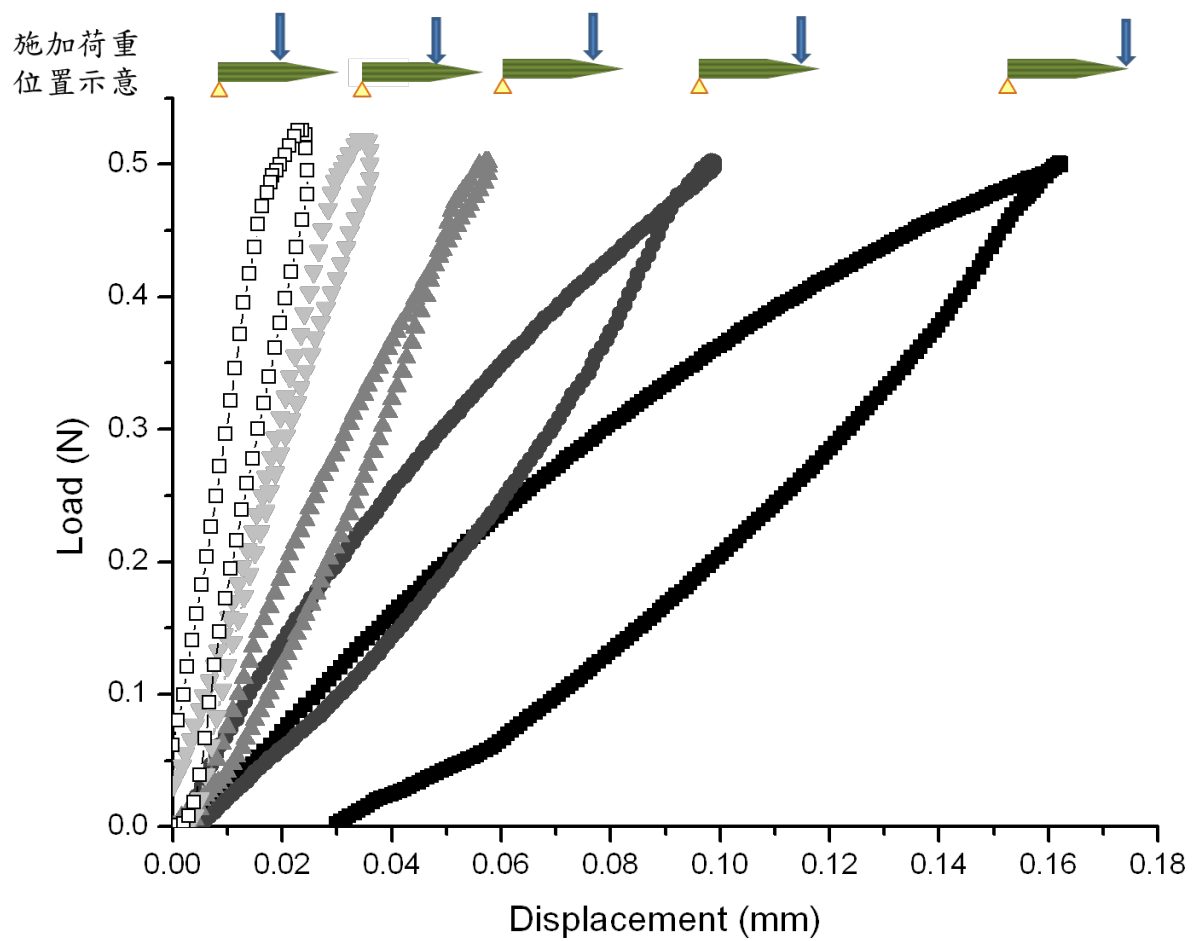


Fig. 9 在不同長度點進行反覆測試的荷重-位移圖。荷重點越接近刺基部，達到相同力所花的位移越小。

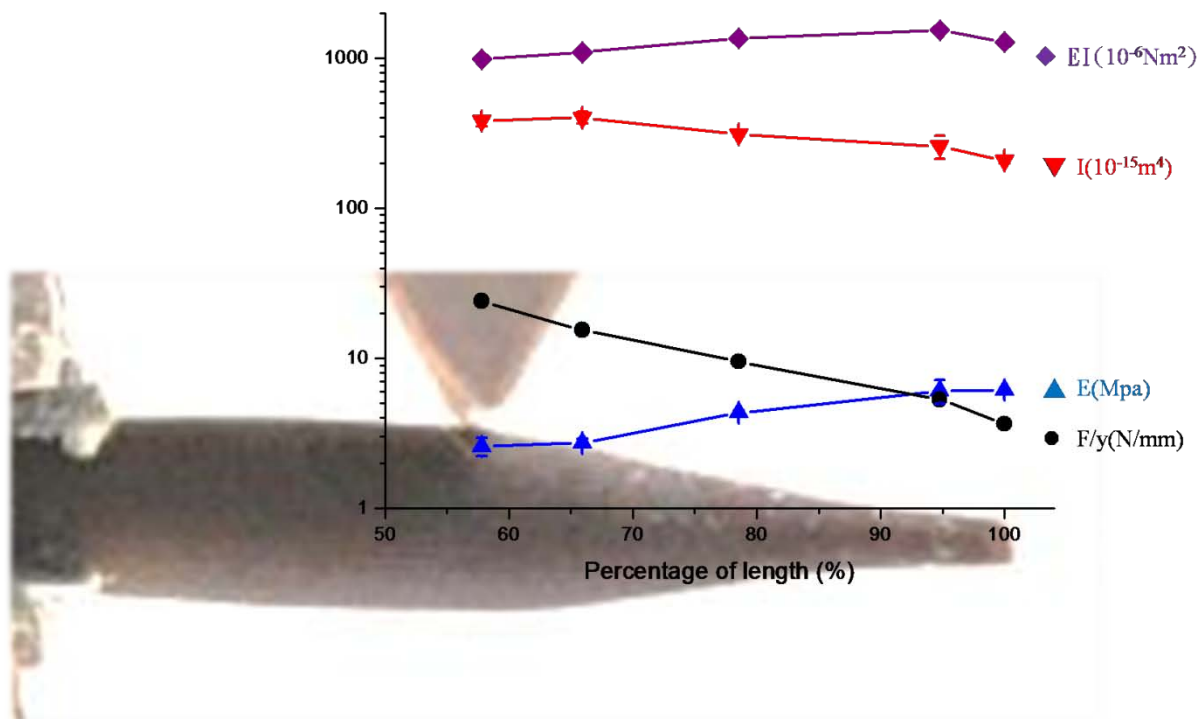


Fig. 10 在不同長度點進行反覆測試刺得的楊氏係數( $E$ )、截面二次軸矩( $I$ )、彎曲硬度( $EI$ )與荷重-位移斜率( $F/y$ )。楊氏係數由基部向尖端遞增，呈現出棘刺材料的非均質性，尖端的材料可能較基部硬。截面二次軸矩與荷重-位移斜率隨著長度增加而下降。彎曲硬度在 95 % 長度時測得最大值。

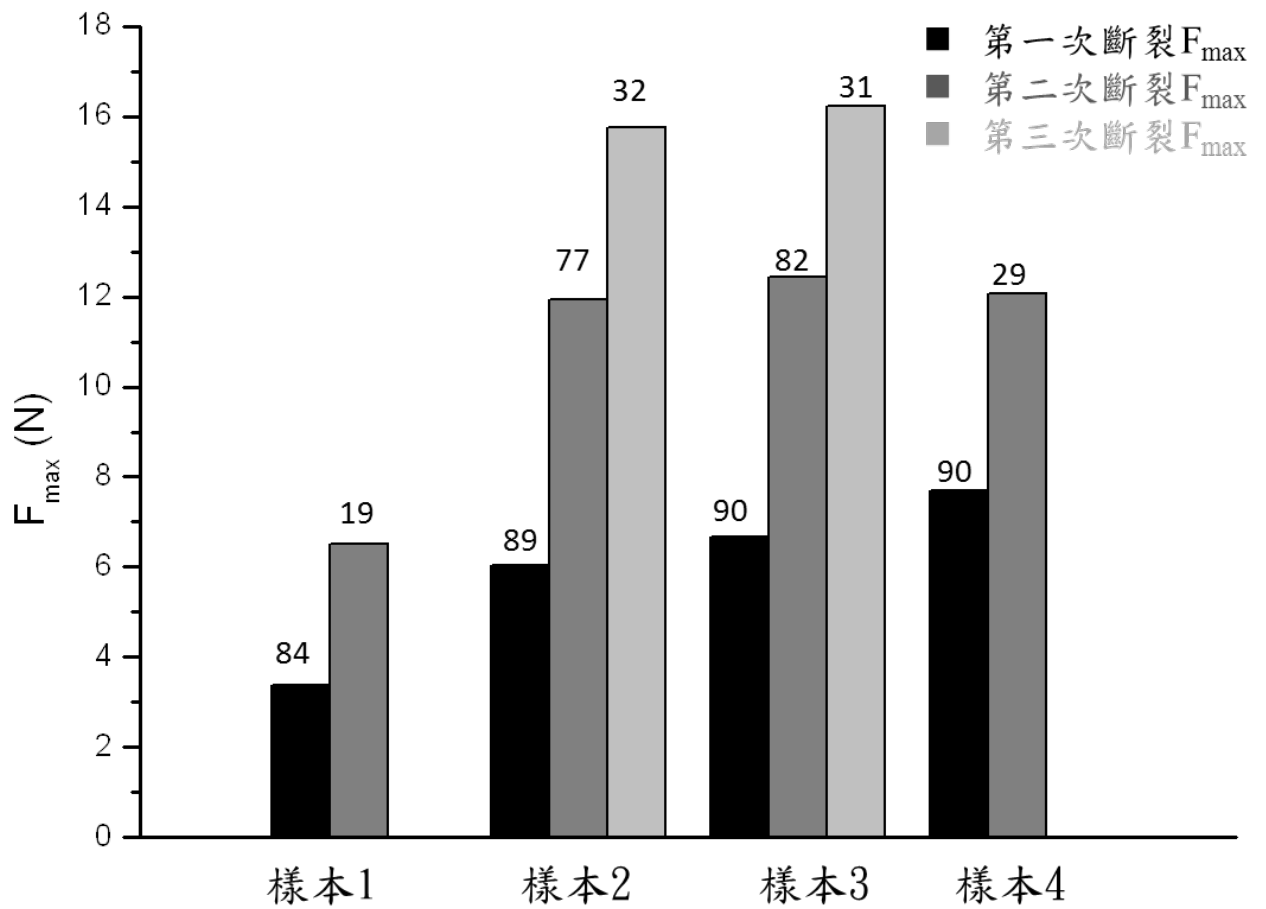


Fig. 11 同樣本多次斷裂的斷裂力 ( $F_{\max}$ )。斷裂後棘刺長度縮短， $F_{\max}$  增加。上方數字為斷裂後，棘刺剩餘長度原長的百分比。分多次斷裂的棘刺第一次斷裂大約位於 85~90 % 原長。

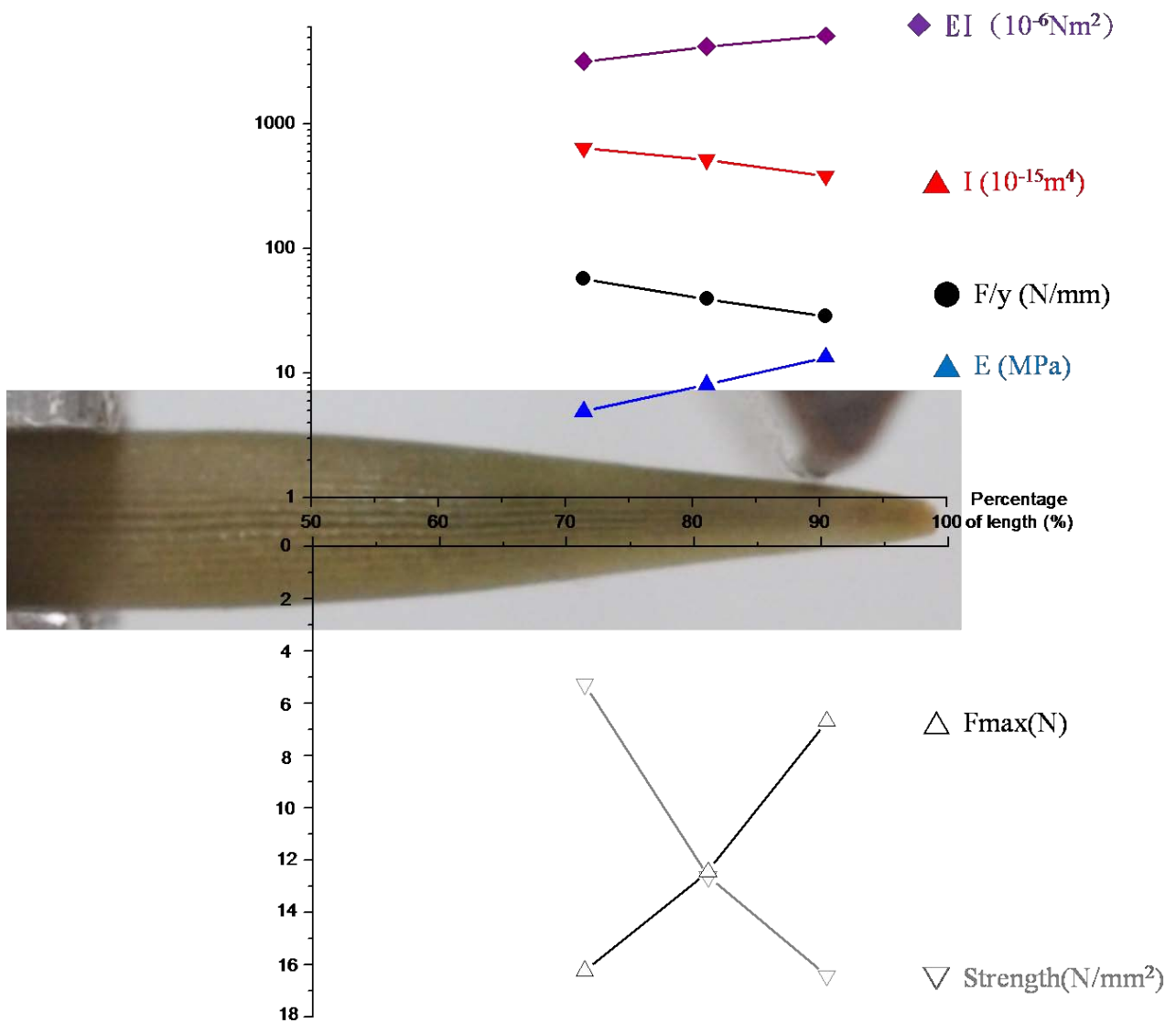


Fig. 12 多次斷裂樣本 3 在不同長度點荷重壓至斷裂所得楊氏係數( $E$ )、截面二次軸矩( $I$ )、彎曲硬度( $EI$ )、荷重-位移斜率( $F/y$ )、斷裂力( $F_{max}$ )、斷裂壓力(strength)。楊氏係數、彎曲硬度由基部向尖端遞增。截面二次軸矩與荷重-位移斜率隨著長度增加而下降。斷裂力雖隨長度下降而上升，但經斷裂面面積標準化(strength)後隨長度下降而下降。

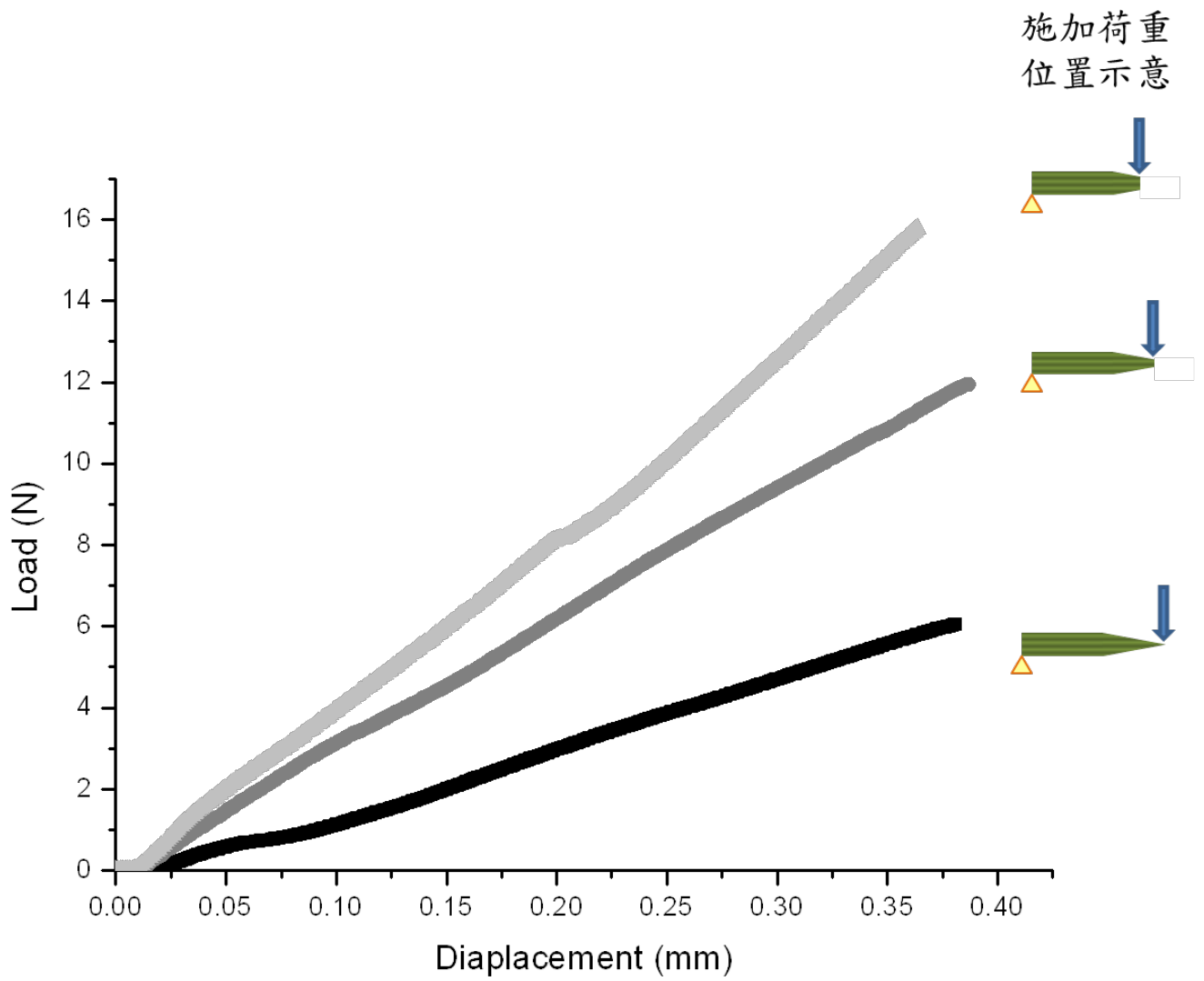


Fig. 13 多次斷裂樣本 2 在不同長度點荷重壓至斷裂的荷重-位移圖。荷重點越接近刺基部，達到相同力所花的位移越小，且斷裂過的刺的斷裂力高於斷裂前。