

紙吸管戳封膜之分析與應用

賴昭蓉¹、陳宣仔²

¹國立臺灣大學機械工程學系

²國立臺灣大學生物機電工程學系

E-mail: b07502165@ntu.edu.tw, b07608050@ntu.edu.tw

摘要

在社會開始重視塑膠製品對海洋產生的汙染後，紙吸管一度成為替代的方案。然而實際使用常會發現相較於一般吸管，紙吸管難以順利地戳破封膜，非常考驗使用者的耐性與技術。

紙吸管之所以難以戳破封膜最主要是因為相較於塑膠吸管尖端是圓弧尖尾，紙吸管的橢圓形切面使得接觸面積較大，因此戳封膜的時候產生的壓力比較小，難以戳破。而這兩種切面的差異是來自於材料及製程的限制，因為紙材不像塑膠具有彈性，無法使用傳統刀具的切割方式，必須使用雷射切割斜角。

本研究透過有限元素法的工具，分析使用紙吸管戳破封膜時本身管體的壓力分佈，藉此推測在哪個位置容易發生形變，造成吸管彎折；以及吸管需以什麼角度插入，能夠對封膜產生最大的應力破壞、同時讓吸管的形變量最小。

關鍵字：紙吸管、切口、插入角度、有限元素法

1. 前言

吸管是常見的餐具，由於其構造較不易徹底清洗消毒，因此即使在近年來政府與民眾日漸對環保議題重視的條件下，一次性吸管仍然廣泛流通於市面上。

本研究希望探討與分析替代塑膠吸管而出現的紙吸管，在戳封膜時的相關表現，以期更了解與掌握此項產品的優劣與特性。

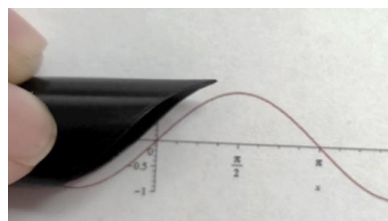
2. 研究設計

我們設計了以下兩個實驗來探討紙吸管的表現。首先第一部份，針對兩種不同材質的吸管，改變施力大小，觀察戳破封膜的臨界力道是多少，並進一步觀察分析結果。第二部分，分析使用不同角度戳紙吸管，是否能找到一個最佳的角度可以輕易戳破封膜。

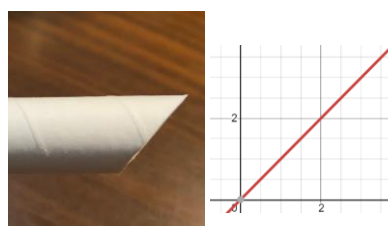
3. 材料與分析方法

材料部份，使用 SOLIDWORKS 繪製塑膠吸管與紙吸管的幾何，二者的幾何差異源自於製造過程，斜口幾何的參考圖 3.1。

本研究使用有限元素分析軟體，Abaqus/Explicit，考量材料參數本身(Young's Modulus、應力應變曲線等)，並導入 Abaqus 破壞模型(Ductile Damage)，分析吸管在定速度場下對 LDPE 封膜造成的破壞。



$$y = \sin x$$



$$y = x$$



(a) 紙吸管



(b) 塑膠吸管

圖 3.1 實際繪製的吸管斜口截面

3.1 Abaqus 設定

本次分析模型中共有兩個零件，即吸管與封膜之幾何。考量吸管的幾何模型較為複雜，因此採事先繪製再轉為.sat 檔導入 Abaqus 的作法。

材料參數部分，詳如 3.2 所述。

Step 的設定選用 Dynamic, Explicit，設置 Time period = 0.015 sec，Nlgeom: ON。

Interaction 使用 General contact (Explicit)；Included surface pairs: All with Self。

網格設定上，使用 C3D8R，Element Library: Explicit；另，考量封膜會產生失效的變形破壞，因此在厚度方向上特別加密為 4 層。在 global mesh size = 0.002 時，封膜總網格數為 39696。

3.2 材料參數取用

以下介紹飲料封膜、紙吸管兩個元件的材料參數及幾何參數選用，兩者皆有密度、彈性、塑性參數，封膜則另有破壞模型。幾何外型則大多依據實際量測結果估計。

(1) 封膜幾何及材料參數

一般封膜的材質為低密度聚乙烯 (LDPE, Low Density Polyethylene)，為求得更詳細的材料係數，由 LDPE 拉伸實驗[6]結果，重新繪製 stress-strain curve 如圖 3.2，標記的橘色三角形為 Ultimate point，斜直線斜率為 Young's modulus，其與曲線的最後一個交點之後皆為 LDPE 塑性變化，取該點至 Ultimate point 之間的點作為 Plastic 參數，由 Abaqus Calibration 導入各項參數。破壞模型使用 Ductile Damage，Fracture strain 原先取圖中 Ultimate point 的 strain = 0.43，後微調至 0.34 使結果收斂，Stress Triaxiality 則假設三軸方向均佈 = 0.33。幾何外形則量測一般市售飲料封膜取得。

(2) 紙吸管幾何及材料參數

紙吸管大多是使用純木漿（原生漿）抄造的，其材料數據參考[5]中紙吸管拉伸實驗結果，重新繪製 stress-strain curve 如圖 3.3，同封膜取參數的方式得到參數表如表 2。幾何外型則由量測紙吸管而得。

| LDPE 封膜 | | | |
|----------------|--------------------|-------------------|---------|
| 項目 | | 單位 | 數值 |
| 幾何外型 | 封膜直徑 | mm | 90 |
| | 封膜厚度 | mm | 0.2 |
| Density | | kg/m ³ | 920 |
| Elastic | Young's Modulus | Mpa | 971.041 |
| | Poisson's Ratio | - | 0.33 |
| Plastic | | (由圖3.2取點輸入) | |
| Ductile Damage | Fracture Strain | - | 0.34 |
| | Stress Triaxiality | - | 0.33 |
| | Strain Rate | 1/s | 1500 |

表 1 LDPE 封膜材料係數

| 紙吸管 | | | |
|---------|-----------------|-------------------|---------|
| 項目 | | 單位 | 數值 |
| 幾何外型 | 吸管長度 | mm | 220 |
| | 吸管直徑 | mm | 60 |
| | 吸管厚度 | mm | 0.21 |
| | 吸管切口角度 | deg | 45 |
| Density | | kg/m ³ | 569.2 |
| Elastic | Young's Modulus | Mpa | 599.451 |
| | Poisson's Ratio | - | 0.33 |
| Plastic | | (由圖3.3取點輸入) | |

表 2 LDPE 封膜材料係數

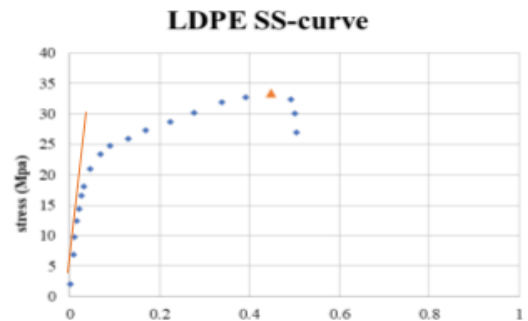


圖 3.2 LDPE stress-strain curve sample point

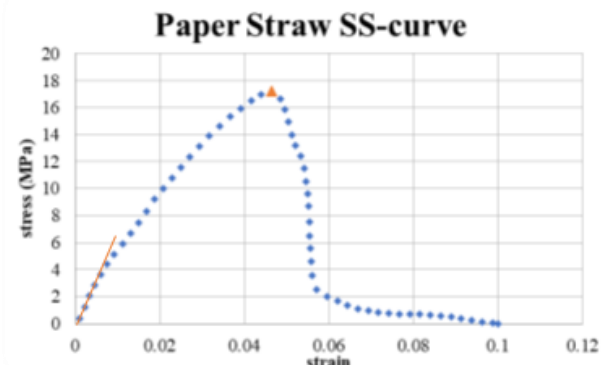


圖 3.3 紙吸管 stress-strain curve sample point

3.3 邊界及施力定義

封膜固定膠黏外邊 6 DOF。吸管則假設上部被握住，施以向下的均佈力(由圖中 RP 點施以及集中力，並和吸管截面 coupling)，實驗所使用的力量區間為 15N~40N。手握的範圍為 8 公分，經驗告訴我要把大拇指頂在吸管上面，比較好戳，或許是因為手腕比較好施力，能控制吸管是在戳破過程中能維持向下，不會被阻力影響施力方向(圖 3.4)。因此我們將該區域 boundary condition 設定為只有 1 DOF 的位移。此外，吸管和封膜之間有摩擦係數 0.9 的 contact property，設值較高避免吸管和封膜之間滑動太多，影響結果判讀。(圖 3.5)



圖 3.4 戳吸管示意圖

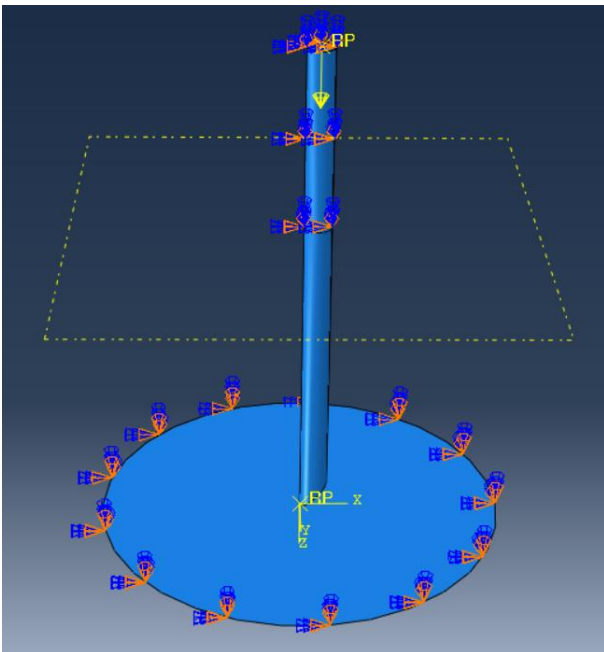


圖 3.5 施力與邊界設定

4. 網格敏感度分析

以剛體吸管&可變形實體封膜的模型為例，取相同時間間隔，設置field-output 每0.0001秒輸出一一次。在剛體吸管前進 9E-4 sec 後，進行抓點，結果如下：

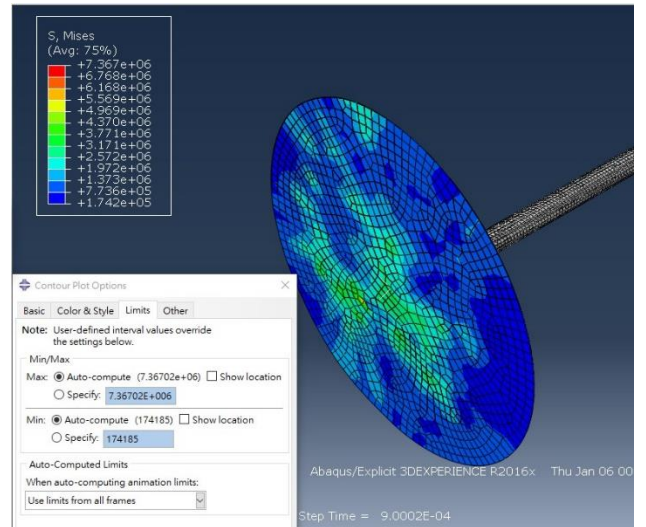


圖 4.1 Global mesh size = 0.005

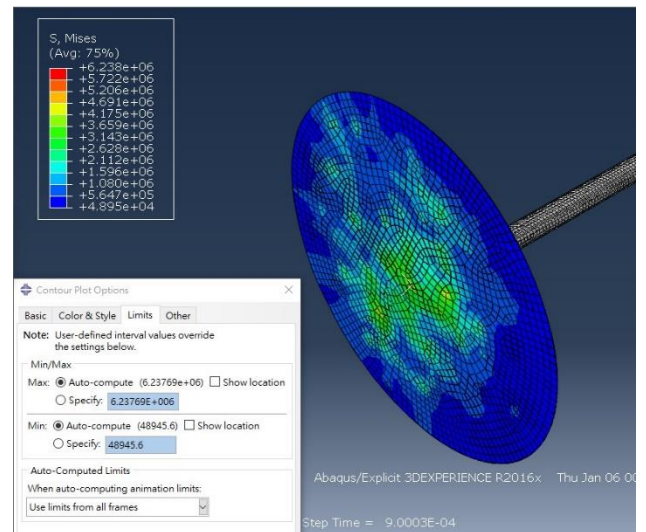


圖 4.2 Global mesh size = 0.004

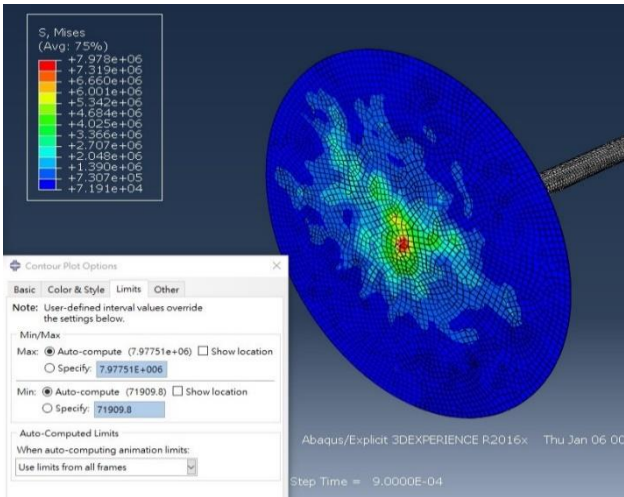


圖 4.3 Global mesh size = 0.003

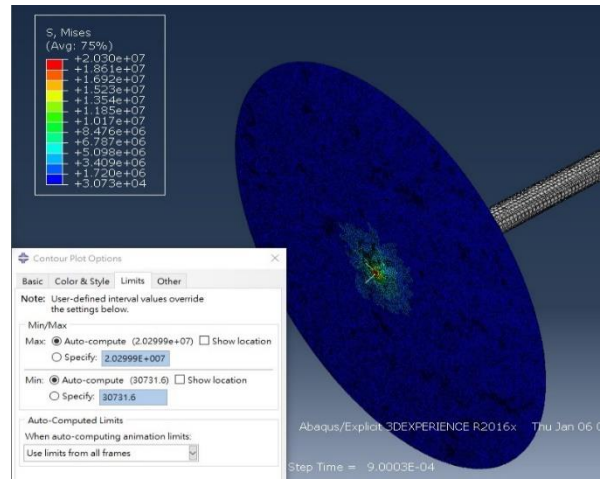


圖 4.6 Global mesh size = 0.001

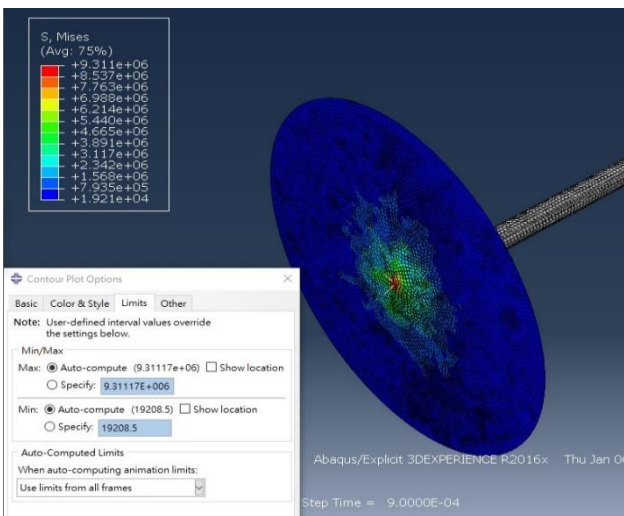


圖 4.4 Global mesh size = 0.002

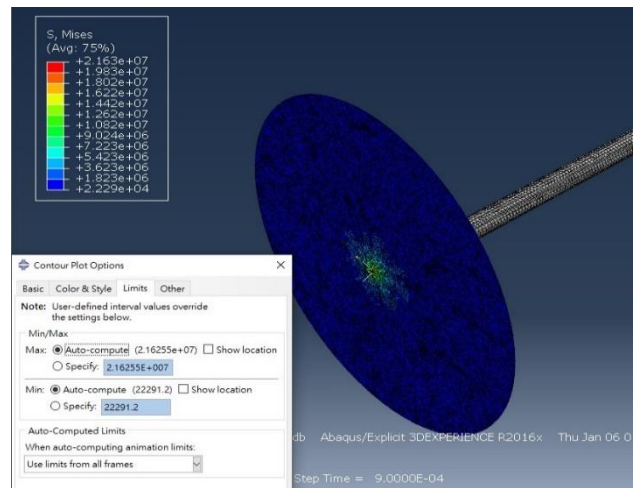


圖 4.7 Global mesh size = 0.00075

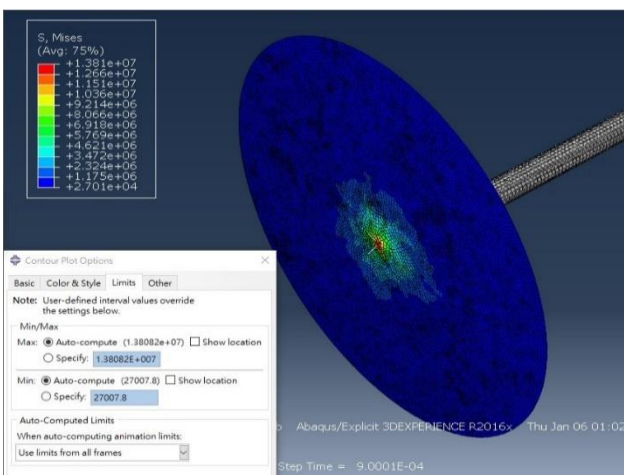


圖 4.5 Global mesh size = 0.0015

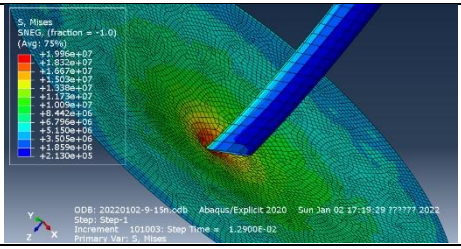
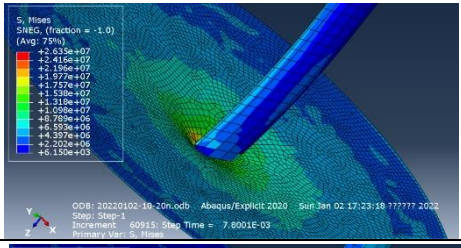
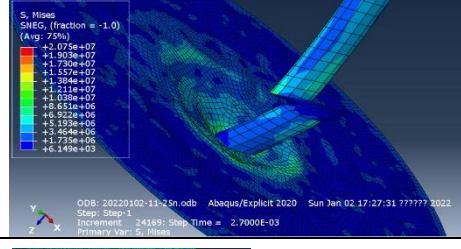
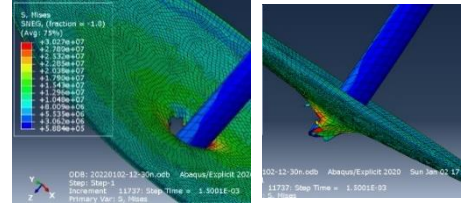
| Global mesh size | Number of element | Mises stress (Pa) | Error rate (%) |
|------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| 0.005 | 5144 | 7.3670E6 | 65.93% |
| 0.004 | 8204 | 6.2377E6 | 71.16% |
| 0.003 | 14304 | 7.9775E6 | 63.11% |
| 0.002 | 32252 | 9.3112E6 | 56.94% |
| 0.0015 | 56192 | 1.3808E7 | 36.15% |
| 0.001 | 127124 | 2.0300E7 | 6.13% |
| 0.00075 | 224176 | 2.16255E7 | - |

從結果可以看到，實際測試直到網格大小為 0.00075 時才收斂，然而這樣的網格鋪設非常吃電腦資源，且我們並不肯定動態分析下以此方法測試網格敏感度是否有疏漏未考慮到的部分，因此此部分結果僅整理放上作為參考，並未套用至一概實驗設定。

5. 研究結果與觀察

5.1 紙吸管不同施力結果觀察

由下表 Abaqus 輸出結果中，可以觀察到當吸管無封膜時，吸管前端會應力集中凹陷的現象 (20N、25N)，在我們的實驗範圍內，發現戳吸管的力道要達到 30N 才能戳破。後續在 25N~30N 之間找戳破封膜離界點，結果為 28.75N 時恰能戳破封膜。

| 施力 | 結果 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 15N |  |
| 20N |  |
| 25N |  |
| 30N |  |

5.2 紙吸管戳破封膜結果分析與觀察

以下我們以 5.1 小節找到的臨界破壞力道 28.75N 作為外力輸出結果觀察。

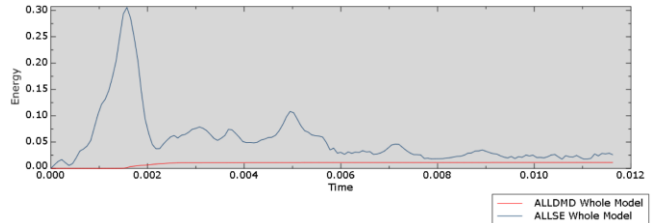


圖 5.1 Damage dissipation energy(紅)及 strain energy(藍)

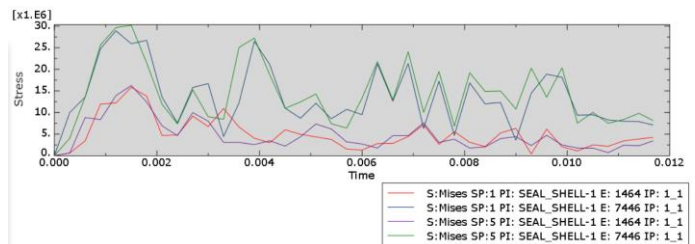


圖 5.2 中心點破壞點(藍綠) 及外緣(紅紫) Mises stress

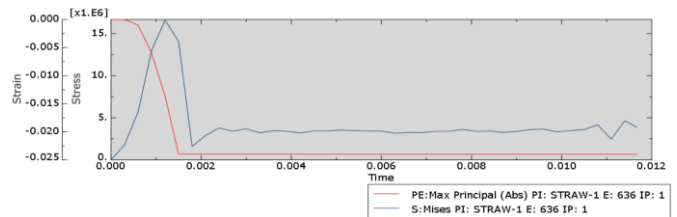


圖 5.3 紙吸管尖端 Mises stress(藍) 及 principal strain(紅)

觀察 28.75N 的結果中，由 Damage dissipation energy(圖 5.1)判斷破壞發生在 0.002 秒左右，封膜在戳破之前，應力、應變會升至一個極值後稍微下降，才發生破壞，戳破之後各處應力、應變分佈會呈現來回震盪 damping，最後趨近於平緩(圖 5.1、圖 5.2)，這個現象在我們用手機慢動作攝影拍攝戳吸管的過程中也有觀察到(圖 3.4)。

至於紙吸管 max principal strain 隨時間增加至最大量值 0.025，發生永久變形，由於該量值是紙吸管的 plastic region，由紙吸管 stress-strain curve(圖 3.2)得知 strain 大約超過 0.01 時位在 plastic region。strain 到達 0.025 左右時吸管恰好戳破封膜所以不再受外力形變。在前 0.002 秒內，內應力變化和封膜有

類似的狀況，都是增加到一個臨界值後逐漸下降，戳破後則趨於穩定。

5.3 紙吸管以不同角度戳入結果

使用 27.5N 作為戳吸管力道，調整吸管插入角度，角度定義如下示意圖(圖 9)，觀察插入角度對戳破吸管的影響，發現在 $\theta = 0 \sim -10$ 度時以及 $\theta > 50$ 度，都無法戳破封膜，但當插入角度在 $\theta = 5 \sim 40$ 之間皆能戳破封膜。

觀察紙吸管尖端處受到最小的應力最大值，在 30~40 度左右，應力最大值為 9MPa 左右。因此判斷這個角度戳封膜不僅能順利戳破封膜，還能讓吸管尖端變形的機會最低。

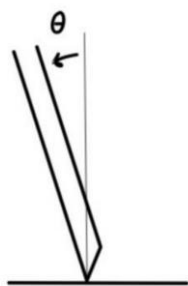


圖 5.4 角度示意圖

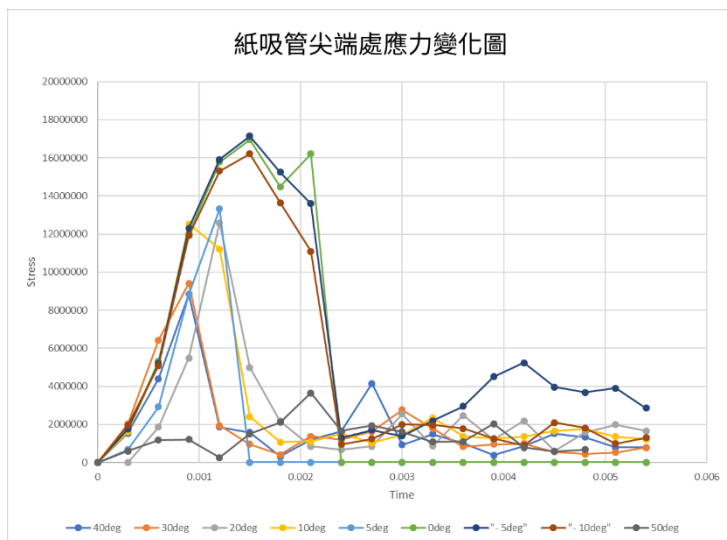


圖 5.5 不同插入角度下紙吸管尖端處應力變化圖

6. 結論

- (1) 此次模型的網格敏感度分析，結果在網格大小為 0.00075 時收斂，當時的網格數量為 224176 個。
- (2) 紙吸管施力的研究中，可以觀察到當吸管無法戳破封膜時，吸管前端會應力集中凹陷的現象。
- (3) 此次實驗中紙吸管戳破封膜的臨界力道為 28.75N；封膜在戳破之前，應力、應變會升至一個極值後稍微下降，才發生破壞，吸管的內應力亦有類似結果。
- (4) 紙吸管以 30~40 度左右戳破封膜可以使尖端應力集中的情形最小。

7. 致謝

感謝黃育熙教授對研究設計的建議，以及提供我們嘗試使用破壞模型的方向。

8. 參考文獻

- [1] W. Baojian, L. Wanli, Y. Ke, *Study on Damage Factor of ABAQUS Concrete Plastic Damage Model*. International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering (ICACMVE), (2019).
- [2] M. GZAIEL, E. TRIKI, A. BARKAOU, *Finite element modeling of the puncture-cutting response of soft material by a pointed blade*, Mechanics of Materials, (2019).
- [3] A. K. Gupta, S. K. Runa, B. L. Deopura, *Mechanical properties and morphology of high-density polyethylene*, J of Applied Polymer Sci, (1992).
- [4] D. A. Şerban, L. Marşavina, N. Modler, *Finite Element Modelling of the Progressive Damage*

and Failure of Thermoplastic Polymers in Puncture Impact, Procedia Engineering 109: 97-104, (2015).

- [5] Gutierrez et al. “Paper vs. plastic straws,” BioResources 14(4), 8345-8363, (2019).
- [6] Jordan, J. L., Casem, D. T., Bradley, J. M., Dwivedi, A. K., Brown, E. N., & Jordan, C. W. *Mechanical properties of low density polyethylene*. Journal of dynamic behavior of materials, 2(4), 411-420,(2016).
- [7] 為什麼紙吸管總是插不進去，但塑膠吸管可以？
- UniMath (google.com)
<https://sites.google.com/a/g2.nctu.edu.tw/unimat/h/2020-08/straw>
- [8] Puncture Test of Paper Straw | IMADA Co.,Ltd. (forcegauge.net)
<https://www.forcegauge.net/en/knowhow/62117.html>
- [9] #Abaqus #Explicit : impact bullet – YouTube
https://www.youtube.com/watch?v=sLZEua-PPFU&ab_channel=abaquistutorials
- [10] Low-Density Polyethylene (LDPE) Properties
<http://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/LDPE.html>
- [11] 華郁塑膠 產品材料特性
http://www.hwayu.com.tw/material.php?index_id=12

