# 國立交通大學

機械工程學系 碩士論文

封閉式泡沫鋁之受壓力學行為

Compressive Response of Closed-cell Aluminum Foams

1896

研 究 生: 顏裕璋

指導教授:鄭文雅 博士

中華民國一百零一年十月

## 封閉式泡沫鋁之受壓力學行為

## Compressive Response of Closed-cell Aluminum Foams

研究生: 顔裕璋 Student: Yu-Chang Yen

指導教授:鄭文雅 Advisor: Wen-Yea Jang



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master

in

Mechanical Engineering

October 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年十月

## 封閉式泡沫鋁之受壓力學行為

研究生: 顏裕璋 指導教授: 鄭文雅 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本研究主要目的在探討封閉式泡沫材料之受壓力學行為,內容包含微觀結構觀察、力學實驗以及數值模擬。微觀結構觀察工作包括試樣相對密度之量測、表面細胞狀結構之觀察與相關重要幾何參數之測量統計。實驗方面,從一系列壓力實驗中記錄了泡沫材料之受壓力學反應及機械性質參數,並嘗試從微觀結構的角度解釋實驗數據。從實驗結果發現,影響泡沫材料力學行為的重要因素包含試樣相對密度及施力方向等。數值模擬方面,根據微觀結構幾何統計結果建立具代表性之簡化數值模型,模擬結果並與實驗結果進行比較。

**Compressive Response of Closed-cell Aluminum Foams** 

Student: Yu-Chang Yen

Advisor: Dr. Wen-Yea Jang

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

**Abstract** 

This study aims to investigate the mechanical response of closed-cell

aluminum foam by means of experiments and numerical simulations. The

characterization of foam microstructural geometry is first performed. Among

others the geometric parameters of interest include the relative density, the cell

anisotropy and the thickness variation of the cell walls etc. Foam specimens

originated from different regions of the foam block are then compressed under

displacement-controlled loadings through which the crushing response and the

evolution of deformation are recorded. A simplified numerical model based on

the measured microstructural geometry is developed. Numerical results on the

mechanical parameters such as the elastic modulus, the stress plateau and its

extent are compared with the experimental ones.

ii

## 致謝

碩士班的生活即將進入尾聲,在此感謝提供協助的各位,使我能順利 完成碩士學位。

首先感謝指導教授鄭文雅老師,提供良好的研究環境,以及淵博的知識和對研究的熱誠,解決我在研究上各式的疑難雜症,引導我在研究上能走得更加順利。在論文撰寫上,承蒙老師的細心指導,讓全文的表達更加流暢,特此感謝。感謝口試委員蕭國模老師及蔡佳霖老師,以及論文計畫書審查委員金大仁老師,在論文上給予建議。在實驗方面,感謝金大仁老師實驗室提供 MTS 材料試驗機,以及宏明學長的操作協助,讓實驗能順利進行。在數值模擬上,感謝國家高速網路與計算機中心提供計算硬體資源以及軟體。整體研究上感謝國科會計畫所提供之經費,讓研究能順利進行。

感謝實驗室的學弟靖謙與政南,在論文初稿上幫忙閱讀挑出錯字以及 提供敘述不清楚之處,以及今年實驗室的新成員智偉、詠竣、明丞、玟燕 與元誌,增添實驗室的活力,讓碩士生活中最後幾個月增加不少美好回憶。 感謝大學的同窗與室友柏先、彥豪、嘉偉以及許多朋友們,給予加油與打 氣。

最後特此感謝我的父母,感謝他們的努力栽培,讓我在求學階段上沒 有經濟壓力,使我能專心完成各個學位,由衷感謝他們的付出與努力。

## 目錄

摘要		. 1
Abstrac		ii
致謝	i	ii
目錄	i	V
表目錄	V	ii
	vi	ii
第一章	緒論	1
1.1	封閉式泡沫材料製造方法	2
	1.1.1 熔融態金屬加入發泡劑	2
	1.1.2 粉末冶金法	3
	1.1.3 熔融態金屬通氣法	
1.2	泡沫材料之應用	3
1.3	文獻回顧	
1.4	研究目的	8
第二章	封閉式泡沫鋁之微觀結構1	0
2.1	試樣準備1	0
2.2	試樣微觀結構觀察1	1
	2.2.1 試樣表面微觀結構量測與統計1	1

	2.2.2	不同區域試樣之相對密度比較	12
	2.2.3	不同區域之試樣表面微觀結構比較	13
	2.2.4	非等向性測量	14
2.3	1	討論	15
第三章	j	封閉式泡沫鋁壓力實驗	17
3.1	J	壓力實驗	17
	3.1.1	相對密度之影響 受壓方向之影響 2.42 計議發展與影響 2.42 計議	18
	3.1.2	受壓方向之影響	19
3.2	J.	記錄試樣變形狀態之壓力實驗	22
	3.2.1	BOT 及 MID 區域之變形狀態	23
	3	3.2.1.1 D <sub>1</sub> 方向實驗	23
	3	3.2.1.2 D <sub>2</sub> 與 D <sub>3</sub> 方向實驗	25
	3.2.2	TOP 區域受壓實驗	26
	3	3.2.2.1 D <sub>1</sub> 方向實驗	26
	3	3.2.2.2 D <sub>2</sub> 與 D <sub>3</sub> 方向實驗	27
3.3	T.	討論	28
第四章	+	數值模型建立與分析	31
4.1	١	二維蜂巢狀模型	31
	411	<b>模刑條件說明</b>	32

	4.1.1.1	邊之幾何	. 32
	4.1.1.2	特徵單元	.32
	4.1.1.3	結點處重複材料修正	. 33
	4.1.1.4	剪力與軸向變形之影響	. 34
4.	.1.2 相對	對彈性模數解析解之推導	. 34
4.	.1.3 數(	值模型值	. 36
4.	.1.4 結身	果	.37
4.2	Voronoi	果i 幾何數值模型	. 38
4.	.2.1 模型	型建立 ES S	39
4.	.2.2 結		.40
4.3	討論	1806	.41
		<b>1896</b> 未來研究工作	.42
5.1	封閉式	泡沫鋁之微觀結構	. 42
5.2		泡沫鋁壓力實驗	.42
5.3	數值模	型建立與分析	.43
5.4	未來研	究工作	. 44
參考文獻	••••		.45
附錄	二維蜂	巢狀模型幾何參數產生流程圖	105

## 表目錄

表 2.1	各區域試樣之相對密度	48
表 2.2	沿著方向3各區域之相對密度比較	50
表 2.3	表面細胞寬高比	51
表 3.1	D <sub>1</sub> 實驗材料機械性質	52
表 3.2	D <sub>2</sub> 實驗材料機械性質	53
表 3.3	D <sub>3</sub> 實驗材料機械性質	54
•		55
表 3.5	試樣寬高比	58
<b>麦</b> 4 1	二维蜂巢狀模刑解析解與數值模刑之彈性模數比較	61

1896

## 圖目錄

圖	1.1	不同形式的細胞狀材料	. 62
圖	1.2	ALPORAS <sup>™</sup> 封閉式泡沫鋁之受壓力學行為	. 63
圖	1.3	泡沫鋁三明治結構應用	. 64
圖	1.4	空心管內填滿泡沫鋁之能量吸收裝置	. 65
圖	1.5	西門子 COMBINO 列車之能量吸收裝置	. 65
圖	1.6	BMW 引擎支撐座之樣品	. 66
圖	1.7	Kelvin cell 十四面體	. 66
圖	2.1	封閉式泡沫鋁之表面及表面局部放大	. 67
圖	2.2	母材切割示意	. 68
圖	2.3	封閉式泡沫鋁表面896	. 69
圖	2.4	表面細胞壁量測	. 70
圖	2.5	壁面厚度變化	. 71
圖	2.6	表面細胞狀結構以多邊形近似示意圖	. 71
圖	2.7	表面多邊形出現頻率	. 72
圖	2.8	沿方向3分組示意圖	. 72
圖	2.9	試樣切面比較	. 73
圖	2.10	寬高比量測示意	. 74
圖	3.1	壓力實驗之受壓方向定義	. 75

圖	3.2	封閉式泡沫鋁之受壓力學行為7	5
圖	3.3	D <sub>1</sub> 實驗之受壓應力—位移關係圖7	'7
圖	3.4	D <sub>1</sub> 實驗之機械性質	'8
圖	3.5	D <sub>2</sub> 實驗之受壓應力—位移關係圖8	30
圖	3.6	D <sub>3</sub> 實驗之受壓應力—位移關係圖8	32
圖	3.7	D <sub>2</sub> 實驗之機械性質	3
圖	3.8	D <sub>3</sub> 實驗之機械性質	34
圖	3.9	BOT 區域試樣以不同施力方向之受壓應力—位移關係圖 8	
圖	3.10	MID 區域試樣以不同施力方向之受壓應力—位移關係圖 8	6
圖	3.11	TOP 區域試樣以不同施力方向之受壓應力—位移關係圖 8	;7
圖	3.12	試樣 BOT_L05 受壓應力—位移關係圖 (D <sub>1</sub> 實驗)	88
圖	3.13	對應於圖 3.12 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況	39
圖	3.14	試樣 BOT_L08 受壓應力—位移關係圖(D2實驗)9	0
圖	3.15	對應於圖 3.14 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況9	1
圖	3.16	試樣 TOP_L08 受壓應力—位移關係圖(D <sub>1</sub> 實驗)9	2
圖	3.17	對應於圖 3.16 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況9	13
圖	3.18	試樣 TOP_L06 受壓應力—位移關係圖(D2實驗)9	)4
圖	3.19	對應於圖 3.18 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況9	)5
圖	4.1	二維蜂巢狀結構9	96

圖 4.2	邊之幾何定義96
圖 4.3	二維蜂巢狀結構之特徵單元97
圖 4.4	<b>結點修正</b>
圖 4.5	二維蜂巢狀結構自由體圖99
圖 4.6	使用平面應力元素建立之二維蜂巢狀模型100
圖 4.7	實驗與蜂巢狀數值模型之相對彈性模數比較101
圖 4.8	Voronoi 幾何產生方式       102         Voronoi 數值模型之幾何       103
圖 4.9	Voronoi 數值模型之幾何
圖 4.10	蜂巢狀數值模型與 Voronoi 數值模型之彈性模數比較104

## 第一章 緒論

細胞狀材料(cellular materials)大致可分為天然的(natural)與人造的(artificial)兩種。天然細胞狀材料如木頭(圖 1.1a 為巴爾莎木 [1])、珊瑚、骨頭、植物莖幹、海綿等等。常見的人造細胞狀材料則包含二維的蜂巢狀材料(honeycombs)以及三維的泡沫材料(foams)。蜂巢狀材料是由六邊形或圓形的細胞(cells)所組成的二維結構,其中圖 1.1 (b) 為鋁製的蜂巢狀材料 [2]。泡沫材料則是由許多可填滿空間(space-filling)的多面體所構成的三維結構—其中一類泡沫材料(open-cell foams)的面是開放的,各細胞之間互向連通,如圖 1.1 (c) 所示 [3]。另一類(closed-cell foams)的面會有薄膜包圍住,此時細胞與相鄰細胞們是被分隔開的,如圖 1.1 (d) 所示。

圖 1.2 為一典型細胞狀材料的受壓應力(σ=力量/未變形面積)—位移 (δ/H)關係圖,許多細胞狀材料都會有類似之受壓力學行為。此種應力—位移力學行為關係圖大致可分成三個階段。第一階段:實驗剛開始反應會有一段趨近於線彈性的區域,而由於材料非線性及結構之幾何非線性,結構勁度逐漸下降,應力增加值隨之遞減,最終到達一個局部極大應力。第二階段:在局部極大應力之後,材料中會出現局部變形集中(deformation localization),此時應力值大致維持不變,此一應力一般稱之為平台應力

(plateau stress)。第三階段:隨著實驗之進行,最後結構完全被壓密 (densification),材料與材料之間互相碰觸,造成應力快速上升。

本章主要的目的在提供本研究相關的背景知識,如各式泡沫材料之製造方法、泡沫材料之工程應用以及相關研究文獻回顧等。

#### 1.1 封閉式泡沫材料製造方法

人造的泡沫材料有許多種製造方法,下列將介紹三種常見且已有商業產品之泡沫材料的製造方法。

## 1.1.1 熔融態金屬加入發泡劑

將純鋁加熱成熔融態。為了增加熔融鋁的黏度及穩定其泡沫,在 680  $^{\circ}$  C 的熔融鋁中添加 1.5 wt.-%的鈣 (Ca) 並且攪拌六分鐘。Ca 在高溫下會快速氧化為 CaO 及  $CaAl_2O_4$ 氧化物,並均勻地分佈在熔融鋁中,進而增加其黏稠度。此時將增稠過後的熔融鋁倒入鑄模內,在  $680^{\circ}$ C 的環境下加入 1.6 wt.-%的氫化鈦(titanium hydride,化學式為  $TiH_2$ )並攪拌均勻。 $TiH_2$ 扮演的角色為發泡劑,在高溫下  $TiH_2$ 會分解出  $H_2$ 氣體,使熔融鋁中充滿氣泡,經過約略十五分鐘的固化,熔融鋁會膨脹並且填滿整個鑄模。接著利用氣槍使泡沫鋁在鑄模內冷卻,脫模後切割為需要的尺寸。本文所研究之  $ALPORAS^{\text{TM}}$ 封閉式泡沫鋁即採用此一製造程序,生產之製造商稱此方法為 batch casting process [4]。

#### 1.1.2 粉末冶金法

發泡劑如氫化鈦或氫化錯(zirconium hydride)加入熔融態金屬後因高溫產生氣體,而讓熔融金屬充滿氣泡。另一種製造方法為金屬粉末與發泡劑均勻混和後,再將此混合物擠壓為條狀或板狀,放入模子裡並加熱。在加熱時,金屬粉末會融化,且發泡劑會釋放出氫氣而讓熔融態金屬充滿氣泡 [5]。採用此種製造方法的泡沫材料如 IFAM(the Fraunhofer Institute for Manufacturing and Advanced Materials)所製造的 FOAMINAL®及 Alulight International GmbH 製造之 Alulight®。

## 1.1.3 熔融態金屬通氣法

此種方法為將氣體(如空氣、二氧化碳、氮氣或惰性氣體)通入熔融態金屬中,使熔融態金屬充滿氣泡。但直接將氣體通入純的液態金屬,氣泡並無法維持很久,因此通常會配合加入矽氧化物或陶瓷顆粒以增加液態金屬的黏性,讓氣泡穩定 [6]。使用這類製造方法來製作泡沫材料如加拿大CYMAT 的 Stabilized Aluminum Foam (SAF),以及 Metcomb®等。

#### 1.2 泡沫材料之應用

由於獨特的物理及力學性質,包含重量輕且低熱傳導性,因此泡沫材料在諸多工程領域上十分地實用。應用領域包含輕量化結構、能量吸收、吸音及熱能隔離等。

泡沫材料具有絕佳的強度—重量比(strength-to-weight ratio)及勁度—重量比(stiffness-to-weight ratio),因此常被用來當作三明治結構中的芯材,以減輕結構體的重量,如圖 1.3 (a) 所示 [7]。圖 1.3 (b) 為使用泡沫鋁三明治結構製成的起重臂。由於能吊起物品越高的起重臂,結構體也會越大,相對而言重量也會增加不少,需要更大載運能力的卡車才能裝上較重的起重臂。改用泡沫鋁三明治結構,減輕了起重臂結構體的重量,因此在相同的載重下,卡車可安裝能吊起物品較高的起重臂 [8]。

泡沫鋁在受壓時,存在著很長的應力平台,即在大變形期間仍保持趨近於常數的力量。因存在這種特性,泡沫鋁常被用來製作能量吸收裝置。在汽車工業上,泡沫鋁常被當成碰撞衝擊盒的填充物,安裝於防撞梁與車體之間。如此一來當車體受到碰撞時,衝擊盒吸收撞擊時的大部分能量,減少因碰撞而造成車體損傷且減少維修的開支。另一種能量吸收裝置為空心管,車體遭碰撞時因空心管產生皺摺而吸收能量。圖 1.4 為填入泡沫鋁之空心管,研究指出因空心管與泡沫鋁的互相作用,使填入泡沫鋁的空心管所吸收的能量,可大於空心管與泡沫材料吸收能量的總和。在吸收相同的能量下,填入泡沫鋁的空心管的重量可低於空心管 19%左右 [9]。在大眾運輸工具上,西門子的 COMBINO®列車被安裝填入泡沫鋁之碰撞衝擊盒(如圖 1.5),作為吸收衝擊能量的裝置 [8]。

泡沫鋁除了填充於衝擊盒及空心管內來吸收衝擊時能量外,也可以填

充於空心的鑄造鋁件內。此等複合材料比起空心的鑄造鋁件,可有更高的 勁度和吸震效果。圖 1.6 為德國車廠 BMW 與奧地利 LKR 所開發的引擎支 撐座。內部的泡沫鋁可吸收引擎所產生的震動,減少車廂因引擎而產生震 動的情形 [10]。

另外,泡沫材料具有低熱傳導性和吸音的特點,因此也常被用來當作隔熱材與吸音材,或作為航太相關用途。舉例來說,SOLIMIDE®聚醯亞胺(polyimide)泡沫材料具有重量輕且低熱傳導性,廣泛用於鐵路列車產業及航太工業上作為吸音及隔熱用途,如 Airbus、Boeing 等飛機製造商都採用此種泡沫材料。ALPORAS™同樣具有吸音的特性,有被安裝於高架橋下,用來吸收車輛所產生的噪音 [4]。在建築應用上,如 CYMAT 生產之 Alusion™泡沫鋁,被用來當作建築物及展場的裝飾。

## 1.3 文獻回顧

在綜合性的回顧細胞狀材料之文獻上, Gibson 及 Ashby [11]所著作的書提供各類天然與人造細胞狀材料的基礎資訊。Ashby 等人 [6]所著作的書提供許多金屬泡沫材料的製造方法及應用的資訊。Banhart [7]集結各式已經有商業應用的泡沫材料與仍在實驗階段之泡沫材料的製造方法,以及非破壞檢測及破壞性檢測泡沫材料之方法,最後提供許多泡沫材料在工程上的應用範圍。

在金屬製的泡沫材料的研究,Sugimura 等人 [12]使用三種不同的商品 化封閉式泡沫鋁進行實驗研究,探討課題包括泡沫材料型態、變形及破裂 形式等。Miyoshi 等人 [13]研究兩種不同細胞尺寸的 ALPORAS™封閉式泡 沫鋁,發現在相似的密度下,細胞尺寸大小較小的泡沫鋁擁有較高的平台 應力。McCullough 等人 [14]發現泡沫材料的微結構具非等向性且非均質。 Miyoshi 等人 [4]詳細介紹 ALPORAS<sup>™</sup>封閉式泡沫鋁的製造,包含加入不同 濃度的 Ca 造成熔融鋁黏稠度的變化,以及黏稠度與泡沫鋁之孔隙率關係, 同時探討加入不同量的發泡劑所產生的氫氣量與時間的關係。在他們的研 究中提到,泡沫材料的密度在横向上,邊緣的密度最大,而中間的密度最 小。Paul 及 Ramamurty [15]以不同位移速率進行實驗,探討位移速率對於 封閉式泡沫材料力學行為之影響。該研究結果顯示出增加其位移速率,塑 性強度及吸收能量值也增加,此一效應在高密度的泡沫材料尤為明顯。 Mukai 等人 [16]亦同樣有類似發現。Markaki 及 Clyne [17]研究兩種不同製 造方法的封閉式泡沫鋁,發現不同的製造方法下的泡沫鋁微觀結構有差異 存在,破裂形式上亦有所不同。Cady 等人 [18]研究 ALPORAS™封閉式泡 沫鋁在不同溫度下及經過熱處理後力學行為的差異。Banhart 及 Baumeister [5]及Jang 及 Kyriakides [3]分别研究封閉式及開口式泡沫材料的受壓力學行 為,發現受壓方向的不同也會影響到整體力學行為反應。

細胞狀材料理論及數值模型之建立為另一項重要的研究課題。在二維

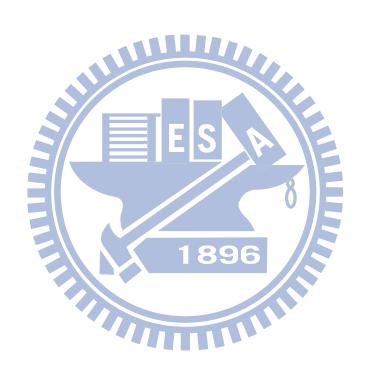
蜂巢狀結構的研究上, Gibson 等人 [19]使用簡單梁理論來推導具均勻斷面 之蜂巢狀結構之彈性性質。Silva 等人 [20]加入了軸向變形與剪力變形,並 考慮二維蜂巢狀結構之幾何非等向性來計算彈性性質,發現在不同施力方 向下彈性模數也有所差異。Papka 及 Kyriakides [21]的研究更進一步的利用 有限元素軟體計算出二維蜂巢狀模型的整體受壓力學行為。在三維泡沫材 料的模型上,最常被使用的規則幾何為 Lord Kelvin 所提出的十四面體(在 許多文獻上稱之為 Kelvin cell),由八個六邊形與六個四邊形所組成,如圖 1.7 所示。例如 Li 等人 [22]、Gong 等人 [23]及 Jang 等人 [24]等研究皆採 用 Kelvin cell 來建立泡沫材料數值模型。近期 Weaire 及 Phelan [25]提出比 Kelvin cell 表面面積小 0.3%的結構,由兩個十二面體及六個十四面體所組 成,形狀較 Kelvin cell 稍不規則。Gong 等人 [23]使用 Kelvin cell 為藍本, 同時考慮幾何非等向性與非均勻斷面,建立具代表性之開口式泡沫材料數 值模型。該模型對各彈性模數之模擬結果,均十分接近實驗數值。Jang 及 Kyriakides [26]更進一步使用 Kelvin cell 以有限元素軟體計算出開口式泡沫 材料之整體力學行為,數值計算結果與實驗十分吻合。在封閉式泡沫材料 的數值模型上,現階段仍屬於百家爭鳴的情形。Santosa 及 Wierzbicki [27] 以截角立方體(truncated cube)作為封閉式泡沫鋁的數值模型,將此模型堆 疊排列受壓後,已出現基本的皺褶機制 (folding mechanism)。Meguid 等人 [28] 進一步把截角立方體的截角處由錐體形改為半圓球狀,成功地模擬出

實驗中觀察到的局部變形。Simone 及 Gibson [29]建立 Kelven cell 十四面體數值模型以估計封閉式泡沫鋁之彈性模數及應力鋒值,並改變材料分布以探討模數與應力峰值之變化情形。Konstantinidis 等人 [30]嘗試以圓球、橢圓球、立方體及長方體四種幾何形狀來建立數值模型,以模擬封閉式泡沫鋁受壓機械性質,其研究發現以橢圓球數值模型所得結果最靠近實驗數據。 Jeon 等人 [31]以電腦斷層掃描 (CT scanning)分析泡沫材料結構,配合影像處理將掃描結果建立成數值模型,在線性區數值模擬的結果與實驗結果十分接近。

### 1.4 研究目的

如今細胞狀材料的運用越來越廣泛,但人們對於此種材料的力學特性 認知仍未臻完善,遑論最佳化設計其機械性質於工程應用上。再者,目前 有關於封閉式泡沫材料的研究多數忽略諸如幾何非等向性、微結構與相對 密度(定義為泡沫材料的密度與基礎材料密度的比值)之空間變異性等重 要的變數。本研究將以大量有系統的仔細觀察輔以實驗量測,希望對封閉 泡沫材料的力學行為有更進一步的認識。並將其微觀結構及其力學性質間 之關聯性建立起來,以期做為未來設計以及使用泡沫材料的參考。

本論文架構大致如下:第一章為緒論,介紹本研究之相關背景知識。 第二章為封閉泡沫鋁之微觀結構,仔細觀察比較泡沫鋁的微觀結構,並加 以量測統計。第三章為封閉式泡沫鋁壓力實驗,探討相對密度與受壓方向 是否影響力學行為。第四章為數值模型之建立與數值分析。第五章為本研 究作總結。



## 第二章 封閉式泡沫鋁之微觀結構

#### 2.1 試樣準備

本研究採用日本神鋼鋼線工業株式會社(Shinko Wire Company)所製造之 ALPORAS<sup>™</sup>封閉式泡沫鋁(closed-cell aluminum foams),其基礎材料(base material)為鋁,製造方法為 batch casting process,此製造方法在前一章已有詳細敘述。原始泡沫材料(as-received foam block)尺寸為 600×600×150 mm³,整體之平均相對密度約為 8.9%。整體材料上標示有 G 方向,推測可能為製造時模具擺放之重力方向。

首先觀察原始泡沫材料之細胞狀微觀結構分佈情形。整體材料以及各區域之表面局部放大外觀如圖 2.1 所示。由圖可見,整體材料的上半部外觀較不規則且存在一條條溝狀的結構(如圖紅色箭頭所示),中間部分的細胞狀結構較大而鬆散,而下半部的細胞狀結構則顯得較小且密實。此外觀上的差異可能暗示此等材料之相對密度會有空間變異性(即不同位置材料之相對密度可能不同)。為釐清此一臆測,在此先選擇三個區域來進行材料切割,以進行後續研究。

為了保持切面平整以及減少微觀結構的破壞,本研究採用線切割線放電加工法(wire electrical discharge machining,亦稱作 wire-cut EDM)來進行材料切割,切割之位置如圖 2.2 (a) 所示。首先於頂部(代號 TOP)、中

間(代號 MID)、底部(代號 BOT)分別切出 50 mm高(圖上垂直方向)的長方體材料,接著在此長方體材料的左側(代號 L)與右側(代號 R)切出 200 mm、150 mm長(圖上水平方向)的長方體材料(注意此長方體的寬為原始母材面外方向尺寸 150 mm)。最後將左側及右側之長方體材料切割成約 50×50×50 mm³的立方體試樣(specimen)。在 Papka 及 Kyriakides [32]和 Andrews 等人 [33]的研究提到,試樣尺寸會影響到整體力學行為與機械性質。當試樣尺寸與平均細胞尺寸之比值達到一定程度時,則差異不大。為了確保試樣大小能代表整體泡沫鋁之力學行為,因此採用 50×50×50 mm³作為試樣之切割尺寸。每區域的左側與右側可分別得到 12 個及 9 個立方體,其編號如圖 2.2 (b)所示。為行文方便,在此定義試樣的三個參考方向,平行於原廠所標示之 6 方向訂為方向 1,而方向 2、3 則與方向 1 兩五相垂直,如圖 2.2 (b) 所示。

## 2.2 試樣微觀結構觀察

## 2.2.1 試樣表面微觀結構量測與統計

在文獻中(例如[34,35])學者廣泛地將細胞壁面之厚度視為常數,然 而圖 2.3 (b)清楚顯示並非如此。一般來說,細胞壁在中間為最薄,往交 點處會逐漸變厚。為探討細胞壁面厚度隨位置變化之情形,選定 BOT 區域 的試樣,以光學顯微鏡拍攝放大倍率為 25 至 45 倍之材料切面,並利用所 得相片來量測壁面長度與厚度變化。如圖 2.4 所示,壁面長度  $\ell$  為每個壁面交點處的直線距離,每一個壁面取七個位置量測厚度,其中編號 4 為壁面正中間厚度  $t_0$ 。圖 2.5 為量測之厚度與位置的關係,其中橫軸為位置 x 除以壁面長度  $\ell$ ,縱軸為厚度  $t(\xi)$  除以中間處厚度  $t_0$ 。這些量測資料可由以下的對稱函數做出曲線擬合:

$$t(\xi) = t_0 f(\xi) = t_0 (a\xi^4 + b\xi^2 + 1), \quad \xi = x/\ell$$
 (2.1)

其中 $a = 22 \cdot b = 6$ 。

在 Tekoğlu 等人 [35]及 Sha 等人 [36]的研究中,他們採用二維化的數值模型來代表封閉式泡沫材料,但他們的幾何皆是不規則的。本研究希望將複雜的三維結構簡化為簡單的二維結構,來建立數值模型。為建立具代表性之數值模型,採用圖 2.6 所示,將表面的細胞壁以直線連接,以統計所形成多邊形之邊數。隨機針對七個表面,共 699 個多邊形加以統計,多邊形邊數與出現頻率整理於圖 2.7。由結果可發現表面多邊形以五邊形與六邊形居多,平均邊數則為 5.67。

#### 2.2.2 不同區域試樣之相對密度比較

相對密度 / 為泡沫材料重要的參數之一,其定義如下:

$$\overline{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \tag{2.2}$$

其中 $\rho^*$ 及 $\rho_s$ 分別為泡沫材料與基礎材料的密度。各區域試樣相對密度的量

測結果整理於表 2.1。如表所示,不同區域所量得的相對密度的確存在頗大的空間變異性。沿著方向 1 而言,相對密度大致以由上往下逐步遞增的趨勢變化。以左半部試樣為例,TOP為 8.44%,MID為 8.57%,BOT為 11.67%。此外,相對密度在方向 3 同樣差異存在,不過差異性相對較小,亦較無規則(分組方式參照圖 2.8,相關結果請參照表 2.2)。

#### 2.2.3 不同區域之試樣表面微觀結構比較

初步觀察結果顯示,泡沫材料之外觀及相對密度,均隨位置不同而不同。本小節將藉由觀察不同區域立方體試樣的各個切面,進一步比較各切面微觀結構的差異。由稍早定義之參考方向,將具有相同水平及垂直方向的切面歸類為同一組作比較。圖 2.9 為各區域試樣的切面,由圖可發現 MID 及 BOT 區域的細胞結構切面大部分較趨近於橢圓形。TOP 區域切面之細胞結構多半呈現不規則的多邊形,且有溝狀結構存在。此外,TOP 區域的細胞大小為三個區域中最大,而 BOT 區域的細胞為三者中最小,MID 區域的細胞次之。由圖 2.9 (b) 及 (c) 左圖可發現,細胞結構整體長軸方向為圖中的垂直方向。而在圖 2.9 (b) 及 (c) 中圖的整體長軸方向為圖中的水平方向。圖 2.9 (b) 及 (c) 右圖並沒有明顯的長軸方向。TOP 區域有別於MID 及 BOT 區域,整體細胞狀結構存在很大的不同。藉由對圖 2.9 (a) 之觀察可得知,左圖的整體長軸方向為來平方向,中圖的整體長軸方向為垂

直方向,而右圖並沒有明顯的長軸方向。

由以上的觀察,可得知封閉式泡沫鋁除了相對密度存在空間變異性外, 微觀結構亦隨位置不同而存在差異。

### 2.2.4 非等向性測量

在前一節的表面觀察發現封閉式泡沫鋁的微觀結構在不同區域取出的試樣及不同的切面,存在很大的差異。為了得到完整的微結構幾何參數,將每個試樣表面拍照,每個試樣可得到六張表面照片。接著在表面相片上分別以水平及垂直方向以 2 mm 為間距繪製測試線,每個表面總共各有 25 條的水平及垂直測試線。使用表面測試線,來量測表面細胞狀結構切面之寬高比(aspect ratio),以釐清此泡沫材料是否存在幾何非等向性(geometric anisotropy)。對每一表面,利用表面測試線,計算出方向i與方向j測試線單位長度所橫越之細胞數量 $N_{C,i}$ 及 $N_{C,j}$ ,以計算方向i與方向j之平均細胞尺寸( $L_i=1.5/N_{C,i}$ 、 $L_j=1.5/N_{C,j}$ ),並定義寬高比 [37,38]:

$$K_{ij} = \frac{L_i}{L_j}, \quad i \neq j, \quad i, j = 1,2,3$$
 (2.3)

如 $K_{ij}$ 大於 1,代表細胞在方向i上的平均尺寸大於方向j上者。如小於 1,則代表方向j上的平均尺寸較大。

以圖 2.10 為例,圖上所示為一個 20×20 mm²的表面,其中水平方向(方向1)藍色測試線所橫越的細胞數量為 3 個(圖中紅色標示),垂直方向(方

向 3)綠色測試線所橫越的細胞數量為 5 個(圖中紅色標示)。將橫越細胞數量除以測試線長可得到  $N_{C,1}=0.15$  及  $N_{C,3}=0.25$  ,從而可計算出  $L_1$  及  $L_3$  :  $L_1=1.5/N_{C,1}=10$  , $L_3=1.5/N_{C,3}=6$  。其他測試線對應之  $L_1$  及  $L_3$  亦可由相似方法求得。將所求出的  $L_1$  及  $L_3$  平均後,代入(2.3)式可算出圖 2.10 的表面細胞寬高比為 1.15 。

三個區域試樣之表面細胞的寬高比測量結果整理記錄於表 2.3 中。在BOT 與 MID 兩區域中, $K_{12}$  及  $K_{13}$  平均值均大於 1 (BOT: $K_{12}$  = 1.144, $K_{13}$  = 1.130),而 $K_{23}$  則很接近 1 (BOT: $K_{23}$  = 0.995)。結果顯示細胞在方向 1 上的平均尺寸大於方向 2 及方向 3,在方向 2 與方向 3 上則相當接近。TOP 區域的結果有別於 MID 及 BOT 兩個區域, $K_{12}$  及  $K_{13}$  平均值均小於 1 (0.891 及 0.856), $K_{23}$  平均值則接近 1 (0.991)。結果顯示大部分細胞在方向 1 上的平均尺寸小於方向 2 及方向 3。而  $K_{23}$  平均值雖接近 1,但變異性較大(最小值及最大值分別為 0.844 及 1.203),無法說明細胞平均尺寸於方向 2 或方向 3 上何者最大。

#### 2.3 討論

沿著原始母材的 G 方向觀察表面微觀結構,結果顯示細胞狀結構在不同的區域呈現不同的樣貌。在相對密度上,不同區域的試樣同樣也存在著變異性,試樣相對密度的範圍可達 7.64%~12.57%, TOP 和 BOT 區域的平

均相對密度差異幾達 50%。在方向 3 同樣有發現相對密度有差異的情形, 但差異性較小且較無規則可言。

從原始泡沫材料的表面細胞狀結構觀察,沿著方向1從頂部往下約100mm的區域,表面上存在溝狀的結構,中間部分的細胞狀結構較大而鬆散,而下半部的細胞狀結構則顯得較小且密實。進一步觀察各區域試樣的切面,發現細胞狀結構在某些表面有明顯的長軸方向。藉由寬高比測量後,結果顯示BOT及MID兩個區域中,方向1的平均細胞尺寸最大,而方向2與方向3的平均細胞尺寸很接近,長軸方向為方向1。而TOP區域方向1的平均細胞尺寸為最小,而方向2與方向3的細胞平均尺寸大小比較不明顯。結果顯示,在BOT及MID區域的細胞狀結構的長軸方向為方向1,和原廠標示之G方向平行。在TOP有別於MID與BOT區域之結果,並沒有明顯的長軸方向。下一章將進一步探討微觀結構之差異是否會對受壓力學行為造成影響。

## 第三章 封閉式泡沫鋁壓力實驗

本章節將探討封閉式泡沫鋁的受壓力學行為,研究對象為第二章所觀察分析的立方體試樣。本研究之實驗包含普通的受壓實驗,以及紀錄其受壓過程中試樣表面變化兩種形式的實驗。本章將比較受壓力學行為及由受壓力學行為可得到封閉式泡沫材料的四個機械性質參數 $(E^* \setminus \sigma_l \setminus \overline{\sigma}_p \setminus \Delta \varepsilon_p)$ ,是否會因為實驗條件不同而有所不同,並且探討微觀結構對於受壓力學行為之影響。

## 3.1 壓力實驗

本研究所採用的試樣標準尺寸為  $50\times50\times50$  mm³,其切割方式在第二章已有詳細說明。本章節將以不同形式之實驗來探討封閉式泡沫材料在製造過程中所造成的幾何非等向性以及試樣取出區域的不同是否會造成力學行為的差異。實驗中受壓方向分別為稍早定義之方向 1 (代號  $D_1$ )、2 (代號  $D_2$ )及方向 3 (代號  $D_3$ ),如圖 3.1 所示。本實驗採用 MTS 810 材料試驗機,試樣在兩個平行的剛性平面之間受壓,採位移控制。在 Paul 及 Ramamurty [15]的研究指出,位移速率的不同會使封閉式泡沫材料的吸能效果及塑性強度改變,因此實驗之位移速率皆採用 $\delta/H=7.5\times10^{-4}S^{-1}$  (H=試樣之高度),以確保實驗在擬靜態 (quasi-static) 的情況下進行。

#### 3.1.1 相對密度之影響

圖 3.2 為封閉式泡沫材料受壓應力( $\sigma$ =力量/未變形面積)—位移( $\delta$ / 原始高度)關係圖(BOT\_L03),典型的細胞狀材料都會有類似之受壓力學行為。由實驗之受壓應力—位移關係圖可得到四個機械性質參數值,分別為泡沫材料軸向彈性模數  $E^*$ 、局部極大應力 $\sigma$ ,、應力平台平均應力值(或稱平台應力) $\overline{\sigma}_p$ 以及應力平台長度  $\Delta \varepsilon_p$ 。其中  $\Delta \varepsilon_p$ 沿用 Jang 及 Kyriakides [3] 之定義,為圖中從 $\sigma$ ,至  $1.4\sigma$ ,區間的長度, $\overline{\sigma}_p$ 為此平台之應力平均值。

由三個區域個別取出三個試樣,九組實驗之受壓方向皆為 D<sub>1</sub>。九組壓力實驗受壓應力—位移關係圖結果如圖 3.3 所示,由實驗所量測出來的機械性質與各試樣的相對密度整理於表 3.1 中。

在BOT及MID區域,整體受壓反應隨相對密度增大而變高(如圖 3.3a, 1896),而TOP(如圖 3.3c)區域則無此趨勢。另外,當試樣相對密度不同時, 達局部極大應力所對應的位移會因相對密度不同而有所不同。BOT及MID區域的相對密度愈小時,局部極大應力所對應之位移量也會愈小。應力平台之應力波動情形亦隨實驗組別略有差異,由有限的實驗結果可觀察出, 大致以相對密度 9.87%為分界,相對密度較大者反應曲線較為平緩,相對密度較小者反應曲線則呈現較大幅度的波動。

軸向相對彈性模數  $(E^*_1/E)$  與試樣相對密度的關係繪製於圖 3.4 (a) 中。在 BOT 與 MID 區域中,試樣相對密度增加時,軸向彈性模數也隨之

增加,而 TOP 區域無此趨勢。局部極大應力( $\sigma_{I1}$ )及平台應力( $\overline{\sigma}_{P1}$ )與相對密度的關係繪製於圖 3.4 (b) 中。BOT 與 MID 區域之試樣中, $\sigma_{I1}$  及  $\overline{\sigma}_{P1}$  與相對密度的關係和彈性模數有相同的趨勢,即相對密度增加時, $\sigma_{I1}$  及  $\overline{\sigma}_{P1}$  也會增加。然而 TOP 區域沒有明顯的關係存在。另外除少數例外,多數試樣之 $\overline{\sigma}_{P1}$  皆大於 $\sigma_{I1}$ 。

接著探討在其他受壓方向下  $(D_2 或 D_3)$ ,相對密度對實驗結果所造成之影響。圖 3.5 及 3.6 分別比較了  $D_2$  及  $D_3$  方向各組實驗,試樣機械性質與相對密度則整理於表 3.2 及 3.3 並繪製於圖 3.7 與 3.8。

就整體反應曲線而言,實驗結果顯示,試樣相對密度越大,整體反應 曲線越高。到達應力平台時,BOT 區域的曲線變化較為平緩,而 MID 與 TOP 區域的曲線上下波動幅度較大。以機械參數而言,多數實驗結果顯示, 機械參數隨相對密度增加而有增大趨勢,其中僅 MID 區域試樣之軸向彈性 模數較不明顯。

## 3.1.2 受壓方向之影響

為探討受壓方向對力學行為的影響,特別於各區域中取出三個密度相似的試樣,分別以  $D_1$ 、 $D_2$  及  $D_3$  方向受壓。各區域分別進行了六組實驗,其中兩組之受壓應力—位移關係圖結果如圖 3.5、3.6 及 3.7 所示,由每組實驗所量測出來的機械性質整理於表 3.4 中,其中四個機械性質參數  $E^*$ 、 $\sigma_1$ 、

 $\overline{\sigma}_{p}$ 及 $\Delta \varepsilon_{p}$ 定義方式與前小節相同。

由圖 3.9 (a) 及圖 3.10 可明顯發現,  $D_1$  之反應曲線高於  $D_2$  及  $D_3$ ,到達局部極大應力後應力下降的幅度亦以  $D_1$  最為明顯,圖 3.9 (a) 的  $D_2$  及  $D_3$  反應曲線則幾乎重合。值得注意的是,由於三組試樣的相對密度相當接近,而  $D_1$  受壓試樣的受壓反應曲線卻明顯高於  $D_2$  及  $D_3$ 。在  $BOT\_Exp.2$  實驗組別中三個方向受壓的曲線幾乎完全重合(見圖 3.9b)。在圖 3.11 (a)中,受壓曲線以  $D_1$  最低, $D_2$  與  $D_3$  的曲線類似。而圖 3.11 (b) 則顯示  $D_1$  與  $D_3$  之受壓曲線並沒有明顯差異存在。

在機械性質參數上,先以相對密度接近的 BOT\_Exp.1 及 MID\_Exp.2 兩組實驗來說明。在 BOT\_Exp.1 與 MID\_Exp.2 中, $D_1$ 實驗的  $E^*$ 、 $\sigma_I$ 、 $\overline{\sigma}_P$  皆為三方向中最大, $D_2$  及  $D_3$  實驗的  $E^*$ 、 $\sigma_I$ 、 $\overline{\sigma}_P$  較為接近,  $\Delta \varepsilon_P$  則沒有明顯差異。以  $D_1$  實驗之機械性質參數做為比較基準,在 BOT\_Exp.1 中,在  $D_2$  及  $D_3$  實驗中, $E^*$ 分別減少 24.3% 及 28.7%, $\sigma_I$  減少 21.7% 及 22.3%, $\overline{\sigma}_P$  減少 20.8% 及 21.6%。在 MID\_Exp.2 中,以  $D_2$  及  $D_3$  受壓, $E^*$  減少 26% 及 26.7%, $\sigma_I$  減少 21.7% 及 22.3%, $\overline{\sigma}_P$  減少 13.8% 及 11.9%。在 MID\_Exp.1 中三試樣的機械參數值也存在類似趨勢(即  $D_1$  實驗的  $E^*$ 、 $\sigma_I$ 、 $\overline{\sigma}_P$  皆為最大,而  $D_2$  及  $D_3$  實驗的  $E^*$ 、 $\sigma_I$ 、 $\overline{\sigma}_P$  輕為接近)。在 BOT\_Exp.2 中因受壓曲線類似,使得  $E^*$ 、 $\sigma_I$ 、 $\overline{\sigma}_P$  三個數值很接近。在 TOP 區域實驗的  $E^*$ 、 $\sigma_I$ 、 $\overline{\sigma}_P$  皆為  $D_1$  實驗 為最小,值得注意的為  $\Delta \varepsilon_P$ ,在實驗結果以  $D_1$  為最小, $D_2$  與  $D_3$  接近, $D_1$ 

與 D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>之Δε<sub>p</sub>存在明顯差異。由於各組中三試樣之相對密度均十分接近, 而實驗曲線間之異同性卻存在極大差異,推測應為施力方向不同所造成。

為探討此一效應,讓我們配合第二章中對微觀結構的觀察紀錄來說明。 先前有關寬高比之測量結果顯示,泡沫材料之微觀結構確實存在一定的長軸方向。寬高比的定義可參照前一章的(2.4) 式。每一個試樣皆有 $K_{12}$ 、 $K_{13}$ 及 $K_{23}$ 之量測結果,選用與實驗受壓方向有關之寬高比結果來比較。如遇到量測結果僅有 $K_{11}$ ,而方向i為受壓方向的情形,由以下的關係轉換:

$$K_{ij} = \frac{1}{K_{ji}}, i \neq j, i, j = 1,2,3$$
 (3.1)

與試樣受壓方向相關的寬高比整理於表 3.5 中,其中i為受壓方向,方向i與方向k 垂直於受壓方向。根據前一章的寬高比量測結果,絕大部分的 $K_{23}$  值很接近 1,表示此表面並沒有明顯的長軸方向,因此不參與比較。對照寬高比與各組實驗的受壓曲線,可將結果分為兩大類:在 BOT 與 MID 區域的試樣以方向 1 的平均細胞尺寸最大,為第一大類。第二大類為 TOP 區域的試樣,方向 2 及方向 3 的平均細胞尺寸大於方向 1。

第一大類中,長軸方向受力時整體力學反應、機械性質參數均高於其他方向。例如在 BOT\_Exp.1 實驗中,由於方向 1 細胞尺寸大於其他二方向  $(D_1: K_{13}=1.202; D_3: K_{31}=0.878)$ , $D_1$  實驗之反應曲線及機械性質參數皆明顯高於  $D_2$  及  $D_3$  實驗(請參照圖 3.9a 與表 3.4a)。另外在編號為 BOT\_Exp.2 的實驗組別中,方向 1 尺寸雖仍為三方向中最大,但差別顯然要較

BOT\_Exp.1 來得小(見表 3.5a),故實驗曲線及機械性質參數差異並沒有BOT\_Exp.2(圖 3.9b)來得明顯。

第二大類,短軸方向受力時整體力學反應與機械性質參數均低於其他方向。例如,檢視  $TOP_Exp.1$  實驗試樣的寬高比可發現  $D_1$  方向之細胞尺寸為三方向中最小( $D_1: K_{13}=0.825$ ; $D_2: K_{21}=1.199$ ; $D_3: K_{31}=1.289$ ),所以  $D_1$  實驗之反應曲線及機械性質參數明顯為三方向中最小。另外在  $TOP_Exp.5$  實驗中,由於  $D_3$  與  $D_1$  的寬高比很靠近 1 ( $D_1: K_{12}=0.964$ ; $D_2: K_{21}=1.023$ ; $D_3: K_{31}=1.007$ ), $D_1$  及  $D_3$  的反應曲線及機械性質參數因而均相 當接近,差異不明顯(參照圖 3.11b 及表 3.4c)。

## 3.2 記錄試樣變形狀態之壓力實驗

本節將紀錄封閉式泡沫鋁在受壓時表面細胞狀結構的變形。實驗的條件和前一節相同,於  $TOP \cdot MID \cdot BOT = 個區域分別取出 = 個 50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 的試樣,分別受壓於  $D_1 \cdot D_2$  及  $D_3$ ,位移速率為 $\dot{\delta}/H = 7.5 \times 10^{-4} S^{-1}$ 。本研究所探討的泡沫鋁基礎材料為鋁合金,乃一典型之彈塑性材料。此等材料在受力超過一定限度後,即使完全卸載,變形並無法全部恢復(存在塑性變形)。利用此一特性,我們將壓力實驗分成數階段進行。每次受壓的 $\delta/H$ 增量約為 6%,經過 6%的受壓後,將試樣卸載後移出測試機台,把各表面拍照,以記錄此階段試樣之塑性變形。每次實驗總共卸載 10 次,包含初始與

最終狀態,各表面會有12張相片。

根據實驗觀察發現,BOT與MID區域試樣之的力學反應類似,而TOP區域則較為不同。我們將所有實驗歸納為以下幾類來說明。

### 3.2.1 BOT 及 MID 區域之變形狀態

#### 3.2.1.1 D<sub>1</sub>方向實驗

此小節將探討封閉式泡沫鋁在 D<sub>1</sub> 實驗中表面微觀結構的變化情形,所舉的例子為 BOT 區域所取出的試樣 (BOT\_L05,相對密度為 11.78%)。圖 3.12 為 BOT\_L05 之受壓應力一位移關係圖。為使圖形不過於雜亂,圖中的卸載與加載線段有經過截斷。圖 3.13 為初始未變形表面及五個變形狀態,水平及垂直方向分別為方向 3 及 1,每個表面下的數字方塊對應到圖 3.12上的數字方塊。

由圖 3.13 狀態 $\mathbb{O}$ 的細胞結構,可觀察到在垂直方向的細胞尺寸較長,此為前一章所定義之長軸方向。在實驗剛開始反應曲線趨近線性。隨著應力與變形的增加,材料與幾何非線性開始顯現。結構逐漸喪失勁度(stiffness),反應曲線斜率也逐步減小,最後達到局部極大應力 $\sigma_{II}=3.17$ MPa,在此段線性區表面細胞狀結構變形尚小且較均勻。隨後之(第二次)加載曲線上可量測出泡沫材料的彈性模數,其值為 $E^*_1=1.523\times10^{-2}E$ (其中E為基礎材料鋁的彈性模數)。經過了局部極大應力後,表面細胞狀結構開始出現局部變形。

 $\sigma_n$ 之後,應力值逐漸下降,來到一個波谷, $\sigma_n$ 至此波谷應力之下降幅度約 12%。此後應力開始逐漸地緩步上升(gradual monotonic increasing),進入廣大文獻中(例如文獻 [5,13,18])所稱之應力平台(stress plateau)區。在圖 3.13 狀態[2]中,左側頂部向下約 1/3 高度處開始產生局部變形,變形區域初期呈直條狀,稍微往右上發展。在狀態[3]中可觀察到左下角往右上發展出另一局部變形區。同樣的在右下角也可觀察到往左上方發展的局部變形,此區域並延伸到狀態[2]時所產生之局部變形區。在狀態[4]時絕大部分表面細胞狀結構已經變形,左側及右側中間部分區域為僅存的少數例外。狀態[2]到狀態[4]所對應之應力值上升較為緩慢,這也是為何此區在文獻中被稱作應力平台區。本實驗之平台應力值為[5],這也是為何此區在文獻中被稱作應力平台區。本實驗之平台應力值為[5],這也是為何此區在文獻中被稱作應力平台區。本實驗之平台應力值為[5],這也是為何此區在文獻中

總結此實驗,局部極大應力後,應力值下降後緩慢上升,細胞結構開始出現局部變形的情形。變形集中以條狀方式出現,出現位置並不固定。隨著位移增加,鄰近的細胞會接著變形,條狀區域逐漸加寬,並往外蔓延到其它未變形區域,直到整個試樣都壓密為止(實驗 MID\_L05 中亦觀察到類似現象)。

### 3.2.1.2 D<sub>2</sub> 與 D<sub>3</sub> 方向實驗

此小節將探討在 D<sub>2</sub>實驗中表面微觀結構的變化情形,以實驗 BOT\_L08 為例(相對密度為 11.62%)。圖 3.14 為 BOT\_L08 之受壓應力—位移關係圖, 圖 3.15 則為初始未變形表面及五個變形狀態,圖中水平及垂直方向分別為 方向 2 及 3,每個表面下的數字方塊對應到圖 3.14 上的數字方塊。

圖 3.15 狀態 ○ 的細胞結構,有別於圖 3.13 狀態 ○ ,並沒有明顯的長軸 方向(根據寬高比測量,此試樣之長軸方向為垂直於紙面之面外方向)。在 此實驗中,反應曲線線性段的斜率要小於前述D1實驗,局部極大應力亦較 小,為 $\sigma_{i}$ , = 2.47MPa。 $\sigma_{i}$ , 與鄰近波谷之應力落差僅 5%,下降幅度明顯比 $D_{1}$ 實驗中來的小。此實驗之彈性模數為 $E^*_2 = 1.160 \times 10^{-2} E$ ,同樣小於 $D_1$ 實驗。 圖 3.15 中狀態 []於右上角往下約 1/3 高度可觀察到明顯的局部變形,由右 上方往左下角延伸。左上角亦有局部變形的產生,但沒有前者明顯。狀態2 中,右上方往左下的局部變形區已明顯加寬,而左上角往右下的局部變形 也較狀態П時較為明顯。在狀態37時,可以在表面上明顯觀察到兩道交叉 的局部變形區。值得注意的是,此時材料還存在著許多未變形的區域。在 狀態[4]時,表面未變形的區域已經減少,僅左側及右側仍存在未變形的區 域。此實驗之平台應力為 $\overline{\sigma}_{p_0}$ =2.64MPa,應力平台( 横跨狀態 $\mathbb{1}$ 、 $\mathbb{2}$ 、 $\mathbb{3}$ 及 $\mathbb{4}$ )長度則為 $\Delta \varepsilon_{P2} = 47.28\%$ 。相較於 $D_1$ 實驗,平台應力較小,應力平台長度則 無明顯差異。狀態[5]時,整體材料的表面細胞狀結構大致已完全被壓密實。

綜觀此實驗(其他  $D_2$ 與  $D_3$ 實驗亦有類似結果),經過局部極大應力後,應力值同樣會下降,但下降幅度小於  $D_1$ 實驗。此實驗所量測之 $\sigma_i$ 、 $E^*$  與 $\overline{\sigma}_p$  皆較  $D_1$ 實驗來的小, $\Delta \varepsilon_p$ 則無明顯差異。和  $D_1$ 實驗亦存在相似之處,兩者皆於局部極大應力後,開始產生局部集中變形的情形。接著變形區逐漸延長擴大,直至試樣完全被壓密。

### 3.2.2 TOP 區域受壓實驗

### 3.2.2.1 D<sub>1</sub>方向實驗

TOP 區域除前述在微觀結構與力學行為外,在變形趨勢上也有別於其他兩個區域。首先探討在D<sub>1</sub>實驗時表面微觀結構變化情形(實驗TOP\_L08,相對密度為 8.75%)。圖 3.16 為 TOP\_L08 試樣的受壓應力—位移關係圖,圖 3.17 為此實驗的變形情況。圖中水平與垂直方向為方向 3 與方向 1,表面變形圖片下的數字對應到圖 3.16 上的數字。

觀察圖 3.17 狀態 $\overline{0}$ ,可發現本試樣之短軸方向為垂直方向。與前述兩組實驗類似,在局部應力極大值( $\sigma_{I1}=1.02$ MPa)後亦出現應力波谷,應力落差值約 9%。有趣的是,此後應力並非持續上升,反而呈現波動(fluctuation)的情形。此實驗所量測之彈性模數為  $E^*_1=0.359\times10^{-2}E$ 。在細胞結構上,與狀態 $\overline{0}$ 相比,狀態 $\overline{1}$ 時靠近溝狀結構區域開始產生局部變形。到達狀態 $\overline{2}$ 時,狀態 $\overline{1}$ 的局部變形逐漸擴張,主要變形區域以表面中間偏上方之區域為主。

在狀態③時,底部開始出現範圍較小的局部變形區。在狀態④時,仍可觀察到左下及上方的區域尚未變形。此實驗之應力平台 $\overline{\sigma}_{P1}$ =1.10MPa,應力平台長度則為 $\Delta \varepsilon_{P2}$ =46.49%(橫跨狀態①、②、③及④)。在應力平台階段,應力值波動情況在狀態③前較為明顯,狀態③後則逐漸緩和。直到狀態⑤,表面細胞狀結構幾乎完全被壓密實。

總結TOP區域D<sub>1</sub>實驗結果,初始局部變形大部分集中在溝狀結構附近, 此與前述兩組實驗有異(其餘兩個區域試樣局部變形區之出現位置較無規 律)。應力平台階段之應力值呈現波動,亦不同前述實驗之緩步上升。

## 3.2.2.2 D2與D3方向實驗

最後以實驗 TOP\_L06(相對密度為 8.60%)探討 TOP 區域受壓於 D<sub>2</sub>時表面微觀結構的變化情形。圖 3.18 為 TOP\_L06之受壓應力—位移關係圖,圖 3.19 為表面結構的變形狀態。圖中水平與垂直方向分別為方向 1 及方向 2 ,表面變形圖片下的數字對應到圖 3.18 上的數字。

在圖 3.19 狀態  $\boxed{0}$  的細胞結構,垂直方向之細胞尺寸明顯長於水平方向,與圖 3.17 狀態  $\boxed{0}$  有明顯的差異存在。此實驗之局部極大應力為  $\sigma_{I2}=1.66$  MPa,與緊鄰應力波谷之應力落差達 37%,遠大於前述  $\boxed{0}$  1 實驗,此後應力值亦呈現與實驗  $\boxed{0}$  TOP\_L08 相仿之波動情形。量測之彈性模數  $\boxed{E}^*_2=0.767\times10^{-2}E$ ,大 $\boxed{0}$  1 實驗彈性模數兩倍以上。在狀態  $\boxed{0}$  日時,表面左下方往上約  $\boxed{1}$  1 高度及右

側中間處出現局部變形,直到狀態②時兩者局部變形擴大。此時表面底部幾乎已經變形,且在左下角及右下角發現部分材料被擠出。在狀態③時,底部變寬,左下及右下被擠出的材料量明顯增加。而上半部的寬度並沒有明顯變化,且表面上半部尚未變形。達到狀態④時,表面上半部出現變形,整體形狀呈現上半部較窄,而下半部較寬的情形。此實驗之應力平台 $\overline{\sigma}_{p_2}=1.55$ MPa,應力平台長度 $\Delta \varepsilon_{p_2}=60.84$ %(橫跨狀態 $\mathbb{I}$ 、②、③及④)。在應力平台期間,應力值波動幅度較 $\mathbb{T}$ OP區域 $\mathbb{D}_1$ 實驗明顯許多。達到狀態⑤時,試樣已完全壓密。與原始未變形的狀態 $\mathbb{O}$ 比較,可看出底部寬度明顯增加。

總結 TOP 區域實驗,D2或 D3實驗之局部極大應力值、彈性模數與應力平台皆大於 D1實驗。同時應力平台長度比 D1實驗大,此現象與 BOT 區試樣實驗明顯不同。局部極大應力值與鄰近應力波谷之應力落差亦大於 D1實驗者。另外在受壓過程中,觀察到會有部分材料被擠出,整體試樣在受壓後寬度有明顯增加。

### 3.3 討論

實驗結果顯示,影響泡沫材料力學行為之主要因素為試樣相對密度及施力方向。

## (一)相對密度

在相同的受壓方向下,BOT 與 MID 區域三個機械參數  $(E^* \setminus \sigma_i \setminus \overline{\sigma_p})$ 

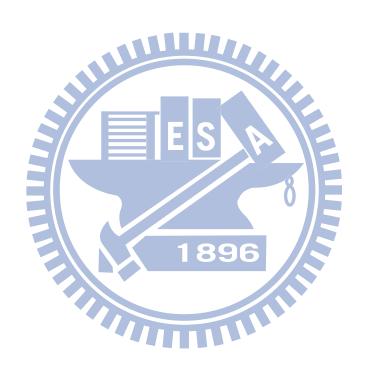
大致上隨相對密度增加而增加。TOP 區域中的 D<sub>2</sub> 與 D<sub>3</sub> 受壓實驗也有相同的結果,即相對密度增加時,機械參數數值也增加。而 D<sub>1</sub> 受壓實驗中則無明顯的關聯性。在整體力學行為上,BOT 與 MID 區域的實驗皆是相對密度越高時,反應曲線也越高,且在 TOP 區域中的 D<sub>2</sub> 與 D<sub>3</sub> 受壓實驗也有相同的結果。

### (二)方向

在相似的相對密度下,BOT 區域和 MID 區域於 D<sub>1</sub>實驗之反應曲線高於 D<sub>2</sub>與 D<sub>3</sub>實驗之反應曲線,到達局部極限應力後應力下降的幅度亦以 D<sub>1</sub> 最為明顯,在機械性質參數上,也以 D<sub>1</sub>實驗為最大。當試樣相對密度接近時, D<sub>2</sub>及 D<sub>3</sub>曲線亦十分接近。在 TOP 區域中,D<sub>1</sub>實驗之反應曲線、機械性質參數皆為三方向中最低。對照前一章的寬高比測量結果,可得出如下結論:長軸方向受力時整體力學反應、機械性質參數則低於其他方向。短軸方向受力時整體力學反應與機械性質參數則低於其他方向。

在另一組實驗中,除力學反應之外,我們同時記錄了試樣微結構之變 形狀況。應力方面,在BOT區域實驗之應力平台階段,應力值皆呈現逐漸 地緩步上升。MID與TOP兩區域實驗,應力平台階段之應力值則呈現幅度 不同之波動情形。

變形方面,與物理直觀不盡相符的是,在受力過程中,泡沫材料微觀 結構之變形並不均勻(non-uniform)。相反地,幾乎在所有實驗中,我們均 觀察到變形集中 (deformation localization) 的情形。變形集中常以條狀區域 (localization band) 出現,而此等區域初始產生 (initiation) 位置,亦各有 不同。在 BOT 與 MID 兩區域之實驗中,變形集中區域之產生位置並無明 顯規則。而在 TOP 區域實驗中,變形集中則較常出現於表面溝狀結構附近。 另外 TOP 區域  $D_2$  及  $D_3$  實驗中,試樣部分材料被擠出而導致在受壓之後整 體寬度有明顯增加。



## 第四章 數值模型建立與分析

在蜂巢狀結構與開口式泡沫材料的數值模型,已經發展到可以利用規則的幾何來準確估計彈性性質與整體受壓力學行為反應。然而,在封閉式泡沫材料的數值模型上,現階段仍屬於百家爭鳴的情形(詳情可見 1.3 節)。在文獻上,例如 Tekoğlu 等人 [35]及 Sha 等人 [36]的研究中,採用二維化的數值模型來代表封閉式泡沫材料,但幾何是不規則的。因此本章節的數值模型,將嘗試三維的複雜結構簡化為二維的簡單結構,由第二章的表面觀察結果進一步簡化為二維蜂巢狀結構 (honeycomb),並且加入觀察微觀結構得知的幾何參數,與實驗結果做比較,驗證簡化的二維蜂巢狀模型是否能代表封閉式泡沫鋁之複雜幾何。

## 1896

## 4.1 二維蜂巢狀模型

由 2.2 節的表面細胞狀結構以多邊形近似,並加以統計過後,發現最常出現的多邊形為五邊形及六邊形,平均邊數為 5.67,因此採用二維蜂巢狀結構來做為簡化封閉式泡沫鋁的模型。蜂巢狀結構如圖 4.1 所示,以六邊形來填滿平面,每個邊有相同的長度(ℓ)。在先前的研究中,已經有使用二維蜂巢狀結構來推算此結構的彈性性質(例如彈性模數、剪力模數、蒲松比)。在二維蜂巢狀模型中,通常將六邊形的邊假設為尤拉梁(Euler beam)。本

研究將六邊形的邊以 Timoshenko 梁理論假設,並且考慮以下額外條件:

- 六邊形的邊為非均勻斷面,斷面形狀假設為矩形。
- 修正結點處重複的材料,使相對密度估算更加精準。

### 4.1.1 模型條件說明

### 4.1.1.1 邊之幾何

在二維蜂巢狀模型中的邊假設為長度 $\ell$ 的直邊,且為非均勻斷面。邊之幾何形狀可參照圖 4.2,斷面形狀為矩形,其中寬度w為常數,厚度隨著位置而改變。中央厚度為 $t_0$ ,厚度的變化函數為 $t(\xi)=t_0f(\xi)=t_0(a\xi^4+b\xi^2+1)$ ,其中a=22、b=6、 $\xi=x/\ell$ 。其中斷面之面積  $A(\xi)$  及面積慣性矩  $I(\xi)$  如下所示:

$$A(\xi) = wt(\xi), I = \frac{1}{12}wt^3(\xi)$$
 (4.1)

## 4.1.1.2 特徴單元

特徵單元(characteristic cell)為組成一個無限大且有週期性規則之結構的重複幾何單元。本研究所選用之特徵單元如圖 4.3 所示,高度  $H=2\ell(1+\sin 30^\circ)$ ,寬度  $d=2\ell\cos 30^\circ$ 。特徵單元的選擇並不是唯一的,選用合適的特徵單元可讓分析簡化,且在數值模型中週期性邊界條件的設定容易許多。週期性邊界條件將在本章 4.1.3 節說明。

### 4.1.1.3 結點處重複材料修正

當二維蜂巢狀模型的邊假設為梁,每個結點處總共有三個邊互相重疊, 造成材料重複計算,推算相對密度時會產生誤差。在 Gong 等人 [23]的研究提到,在相對密度逐漸增加時,未考慮材料重疊部分時所計算出的相對密度會比實際之相對密度高,且在非均勻斷面下高估情況會更加嚴重,因此要修正結點處的重複材料,使相對密度計算上更精確。圖 4.4 (a) 中綠色的區域為材料重疊之處。梁的面積修正方式如圖 4.4 (b) 所示,每個長度《的梁扣除四個紅色區域,紅色區域的面積剛好為圖 4.4 (a) 綠色區域的一半。要計算修正後梁的面積大小,首先需要求解以下的方程式:

$$\frac{t_0}{2}f(\frac{x}{\ell}) = -\sqrt{3}(x - 0.5\ell) \tag{4.2}$$

其意義在於求解圖 4.4(b) 中藍色傾斜  $60^\circ$  之虛線與梁之邊緣的交點位置。 1.896 求解出交點位置  $x_{\rm int}$  後,可解出圖 4.4(b) 修正後的梁面積:

$$A_{m} = \left[ \int_{-x_{\text{int}}/\ell}^{x_{\text{int}}/\ell} t_{0} f(\xi) \ell d\xi \right] + 2 \times \left[ \frac{1}{2} \times f(\frac{x_{\text{int}}}{\ell}) t_{0} \times \left( 0.5 - \frac{x_{\text{int}}}{\ell} \right) \ell \right]$$

$$(4.3)$$

則修正後的蜂巢狀模型的相對密度為:

$$\frac{\rho^*}{\rho} = \frac{6A_m}{H \times d} = \frac{6A_m}{2\ell(1 + \sin 30^\circ) \times 2\ell \cos 30^\circ}$$
(4.4)

藉由以上三節之條件,可求得對應於特定相對密度之幾何參數( $\ell \mathcal{L} t_0$ )。 詳細步驟可參閱附錄。

### 4.1.1.4 剪力與軸向變形之影響

由第二章圖 2.3 (b),可得知細胞壁並不是十分細長的。在二維蜂巢狀模型中,把邊假設為尤拉梁時,如果梁本身不細長時,僅考慮彎矩變形時,會造成變形計算上的誤差,因此剪力與軸向變形必須納入考量。在本研究中,除了考慮彎矩造成之應變能外,另外加入梁內之橫向剪力及軸向變形所造成的應變能。橫向剪力V之應變能定義如下所示:

$$U_{s} = \int_{-1/2}^{1/2} f_{s} \frac{V^{2}(\xi)}{2GA} \ell d\xi, \ f_{s} = \frac{A}{I^{2}} \int_{z} \frac{Q^{2}(z)}{w} dz$$
 (4.5)

其中 $f_s$ 為形狀因子(form factor),在本研究所討論的斷面為矩形,因此  $f_s=1.2$  。

# 4.1.2 相對彈性模數解析解之推導

相對彈性模數可藉由圖 4.3 之特徵單元,將特徵單元的邊視為尤拉梁,並加以考慮剪力及軸向變形,利用能量法可推導出二維蜂巢狀結構之相對彈性模數。由彎矩 (M)、剪力 (V)、軸向力 (N) 所造成的應變能如下:

$$U = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{M^{2}(\xi)}{2EI(\xi)} \ell d\xi + \int_{-1/2}^{1/2} f_{s} \frac{V^{2}(\xi)}{2GA(\xi)} \ell d\xi + \int_{-1/2}^{1/2} \frac{N^{2}(\xi)}{2EA(\xi)} \ell d\xi$$
 (4.6)

其中E及G為基礎材料之楊氏模數及剪力模數,斷面面積 $A(\xi)$ 及面積慣性矩  $I(\xi)$  可參閱式子(4.1),形狀因子f 的定義可參考式子(4.5)。

圖 4.5 (a) 為二維蜂巢狀結構之特徵單元的自由體圖,進一步分析每

個邊的自由體圖,可將特徵元素中各邊歸類為兩種邊的自由體:第一種為 斜向邊的自由體,如圖 4.5 (b) 所示。第二種為直向邊的自由體,如圖 4.5 (c) 所示。

首先由圖 4.5 (b) 斜向邊的自由體圖,由 P/2 所造成的彎矩 M、剪力 V 及軸向力 N 如以下所示:

$$M = M_1 - (\frac{1}{2} - \xi) \frac{P\ell}{2} \cos 30^\circ, V = \frac{P}{2} \cos 30^\circ, N = \frac{P}{2} \sin 30^\circ$$
 (4.7)

其中 $\xi = x/\ell$ 。由於各邊交點處角度為固定的,則 $\theta_1 = \frac{\partial U}{\partial M_1} = 0$ 。將式子(4.7)

代入式子(4.6),利用 
$$\theta_1 = \frac{\partial U}{\partial M_1} = 0$$
 進一步解出:
$$M_1 = \frac{P\ell}{4}\cos 30^\circ$$
 (4.8)

令 P/2=P' ,並代入式子(4.4) 、(4.5)及(4.6) ,利用  $\delta_1=\frac{\partial U}{\partial P'}$  可得到斜向邊兩端點的相對位移為:

$$\delta_{1} = \frac{P\ell^{3} \cos^{2} 30^{\circ}}{2EI_{0}} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{\xi^{2}}{f^{3}(\xi)} d\xi + \frac{f_{s}P\ell \cos^{2} 30^{\circ}}{2GA_{0}} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\xi}{f(\xi)} + \frac{P\ell \sin^{2} 30^{\circ}}{2EA_{0}} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\xi}{f(\xi)}$$

$$= C_{1} \frac{P\ell^{3} \cos^{2} 30^{\circ}}{2EI_{0}} + C_{2} \frac{f_{s}P\ell \cos^{2} 30^{\circ}}{2GA_{0}} + C_{2} \frac{P\ell \sin^{2} 30^{\circ}}{2EA_{0}}$$

$$(4.9)$$

其中
$$I_0 = \frac{1}{12}wt_0^3$$
, $A_0 = wt_0$ , $C_1 = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{\xi^2}{f^3(\xi)} d\xi$ , $C_2 = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\xi}{f(\xi)}$ 。接著考慮圖 4.5(c)

直向邊的自由體圖,僅存在軸向力 N = P 會導致變形。直向邊的變形為:

$$\delta_2 = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{P\ell}{EA_0} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\xi}{f(\xi)} = C_2 \frac{P\ell}{EA_0}$$
 (4.10)

再回到整個特徵單元的自由體圖,整個特徵單元的變形包含兩個長度 ℓ的斜

向邊之變形及兩個長度ℓ的直向邊之變形,整體特徵單元的總變形為:

$$\delta = 2(\delta_1 + \delta_2) = \frac{P\ell[12C_1\ell^2\cos^2 30^\circ + 2C_2f_s(1+\nu)t_0^2\cos^2 30^\circ + C_2t_0^2(2+\sin^2 30^\circ)]}{Ewt_0^3}$$
(4.11)

特徵單元的應變為:

$$\varepsilon^* = \frac{\delta}{H} = \frac{P[12C_1\ell^2 \cos^2 30^\circ + 2C_2f_s(1+\nu)t_0^2 \cos^2 30^\circ + C_2t_0^2(2+\sin^2 30^\circ)]}{2Ewt_0^3(1+\sin 30^\circ)}$$
(4.12)

其中,為基礎材料之蒲松比。特徵單元的應力為:

$$\sigma^* = \frac{P}{2wd} = \frac{P}{2\ell w \cos 30^\circ} \tag{4.13}$$

將式子(4.12)及(4.13)代入 $E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*}$ ,加以整理後,可得到二維蜂巢狀結構之相對彈性模數:

$$\frac{E^*}{E} = \frac{t_0^3 (1 + \sin 30^\circ)}{12C_1 \ell^3 \cos^3 30^\circ + 2C_2 (1 + \nu) f_s \ell t_0^2 \cos^3 30^\circ + C_2 \ell t_0^2 \cos 30^\circ (2 + \sin^2 30^\circ)}$$
(4.14)

### 4.1.3 數值模型

本研究使用商業有限元素軟體 ABAQUS 將二維蜂巢狀結構建立成數值模型,採用平面應力元素來切割幾何。邊的部分採用 CPS8 四邊形二階平面應力元素,邊的寬度變化使用第二章所統計出來的壁面變化函數  $f(\xi)$ ,以元素所形成的二階函數逼近壁面變化函數  $f(\xi)$ 。邊的交點處採用 CPS6 三角形二階平面應力元素。經過收斂性分析後,採用之網格分割如圖 4.6 所示,整個二維蜂巢狀結構之特徵單元模型有 288 個四邊形及 64 個三角形元素所構成,總共 352 個元素。

在邊界條件上,為了使用一個特徵單元來代表一個無限大的幾何之力學行為表現,因此需要設定週期性邊界條件,週期性邊界條件說明如下:

令圖 4.6 左側邊界結點為  $A_i$ ,右側邊界結點為  $B_i$ ,上方邊界結點為  $C_j$ ,下方邊界結點為  $D_j$ 。其中i 為左側或右側邊界結點編號,編號順序為由上至下,其中i=1,2,...,18。j 為上方或下方邊界結點編號,編號順序為由左至右,其中j=1,2,...,9。第一個週期性邊界條件如下所示:

$$u_2^{A_i} = u_2^{B_i}$$

$$u_1^{C_i} = u_1^{D_i}$$
(4.15a)

其意義為相異側的結點要有相同的位移,讓幾何形狀在受力變形時邊界能保持連續。第二個週期性邊界條件如下所示:

$$u_1^{A_1} - u_1^{A_i} = u_1^{B_1} - u_1^{B_i}, i \neq 1$$

$$u_2^{C_1} - u_2^{C_j} = u_2^{D_1} - u_2^{D_j}, j \neq 1$$

$$(4.15b)$$

其中A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>及D<sub>1</sub>定義為參考點,設定此週期性邊界條件目的在於計算 特徵單元受力後變形的形狀,變形後仍可左右上下延伸成一個無限的規則 週期性幾何結構。

#### 4.1.4 結果

由於本研究所建立之二維蜂巢狀模型,非均勻斷面的邊是基於BOT區域細胞壁長度與厚度變化量測結果,量測的表面為細胞非等向性不明顯之表面,且表面細胞狀結構以多邊形近似的量測結果也是此表面,因此本研

究的數值模型並未考慮封閉式泡沫鋁的非等向性。在相對密度選用上,因  $D_2$  及  $D_3$  實驗中變形的表面有包含非等向性不明顯之表面,所以採用 BOT 區域中  $D_2$  及  $D_3$  實驗試樣的相對密度做為比較基準。

首先比較二維蜂巢狀模型的相對彈性模數之解析解與數值模型所計算出的相對彈性模數,如表 4.1 所示。結果顯示,使用平面應力元素所建立的數值模型所計算出來的結果皆高於解析解,與解析解的誤差約在 1%左右。接著將數值模型所計算出來的相對彈性模數與實驗結果做比較,如圖 4.7 所示,圖中橫軸為相對密度,縱軸為相對彈性模數。從結果可清楚得知,使用數值模型計算出的相對彈性模數低於實驗結果。

由以上結果可得知,二維蜂巢狀結構計算出來的相對彈性模數和實驗所量測出來的相對彈性模數存在不小的差距,並無法以二維蜂巢狀結構來 1896 推算封閉式泡沫鋁之相對彈性模數。

## 4.2 Voronoi 幾何數值模型

由第二章圖 2.9 (c) 右圖可見,BOT 區域試樣之表面上細胞狀結構的 尺寸並不是大小均一的,而在二維蜂巢狀結構的尺寸為單一大小。為了驗 證試樣表面之細胞狀結構非均一大小是否為彈性模數估計失準的原因,繼 續沿用三維的複雜結構簡化為二維的結構之概念,建立一個不規則的數值 模型,在此採用的不規則幾何為 Voronoi 幾何。

### 4.2.1 模型建立

如圖 4.8 所示,在平面上隨機分布許多點,以兩個相鄰的點繪出垂直平分線,由這些垂直平分線將平面分割為數個多邊形,此種方式形成的幾何為 Voronoi 幾何。基於 Voronoi 幾何的建立方法,為了建立與 BOT 區域試樣之表面細胞數量相當的多邊形,在此先統計八個 BOT 區域試樣中幾何非等向性不明顯的表面之細胞數量。經由統計後,平均一個表面存在 324 個細胞,因此在 50×50 mm²的表面隨機分布 324 個點,建立出 Voronoi 幾何。數值模型使用 ABAQUS B22 二階梁元素,此元素有考慮剪力變形。該模型的邊為均勻斷面,總共有 912 個邊。經過收斂性分析後,將每個邊分割成 4個梁元素,總共有 3648 個元素,模型之幾何可參照圖 4.9。

在 Voronoi 幾何之相對密度計算上,由於幾何較為不規則,材料重疊 1896 部分較難計算,僅考慮均勻厚度的斷面。相對密度計算如下所示:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\sum_{i=1}^N \ell_i \times t_0}{d_1 \times d_2} \tag{4.16}$$

其中 $\ell_i$ 為 Voronoi 幾何中各個邊的長度, $\ell_0$ 為邊的厚度,N 為邊的數量。 $d_1$ 與  $d_2$ 為圖 4.9 中 Voronoi 幾何整體之寬度與高度。

為了與 Voronoi 幾何數值模型計算之彈性模數比較,二維蜂巢狀結構亦不考慮重疊,且為均勻斷面。二維蜂巢狀結構不考慮重疊之相對密度如下所示:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{t_0}{\ell} \right) \tag{4.17}$$

其中 ℓ 為二維蜂巢狀結構之邊長, t<sub>0</sub> 為邊的厚度。

### 4.2.2 結果

在相對密度上,同樣採用 BOT 區域中  $D_2$  及  $D_3$  實驗試樣的相對密度,以及相對密度極小時( $0.01\%\sim0.1\%$ )兩種狀況,比較均勻斷面之二維蜂巢狀結構與 Voronoi 數值模型之相對彈性模數。

圖 4.10 (a) 為相對密度計算不考慮重疊因素且與實驗試樣相同時,比較蜂巢狀結構與 Voronoi 數值模型之相對彈性模數、圖中橫軸為相對密度,縱軸為相對彈性模數。由結果得知在均勻斷面且相同的相對密度下,Voronoi 數值模型之相對彈性模數仍小於二維蜂巢狀結構之相對彈性模數,結果亦顯示在相對密度遞減時兩者間的差異逐漸縮小。然而,由於 Voronoi 幾何與二維蜂巢狀結構的重疊方式不同,在相對密度上會有高估,兩者間的相對彈性模數差異有可能是實際相對密度不同所造成的。但在相對密度縮小時,重疊區域較少,未考慮重疊因素所計算出相對密度會與實際之相對密度較為接近,因此將兩種模型之相對密度進一步調整到極小的狀態來比較。圖 4.10 (b) 為相對密度極小時 (0.01%~0.1%),二維蜂巢狀結構與 Voronoi 數值模型之相對彈性模數比較,圖中橫軸為相對密度,縱軸為相對彈性模數。由圖可發現在相對密度極小時,Voronoi 數值模型和二维蜂巢狀結構之

相對彈性模數明顯差異明顯縮小,兩者相差僅3%上下。

### 4.3 討論

本研究嘗試將三維複雜的結構簡化為二維蜂巢狀結構並且加入微觀結構得知的幾何參數,驗證此簡化模型是否能代表封閉式泡沫鋁。而在結果上顯示二維蜂巢狀結構所計算出的相對彈性模數與實驗數據有明顯的差異。為了探討試樣表面之細胞狀結構非均一大小是否為彈性模數估計失準的原因,以 Voronoi 幾何之建立方法作為二維不規則幾何之數值模型。結果得知在 Voronoi 數值模型之相對彈性模數同樣小於二維蜂巢狀結構之相對彈性模數,在相對密度極小時兩者的彈性模數才會十分接近。

在二維蜂巢狀結構與 Voronoi 幾何中,主要變形結構為二維的梁。而在 封閉式泡沫鋁中,變形結構除了在三維空間中的梁以外,還包含了細胞與 細胞之間的薄膜。將封閉式泡沫鋁簡化為二維模型,幾何結構上過度簡化, 無法代表為封閉式泡沫鋁之模型,而造成相對彈性模數計算上有明顯的差 異。

# 第五章 結論與未來研究工作

### 5.1 封閉式泡沫鋁之微觀結構

由觀察整體封閉式泡沫材料之切面,可發現細胞狀結構之分布並不均 勻,且微結構之幾何外觀,更有明顯差異。例如 BOT 區域的切面可明顯觀 察到接近橢圓形狀且較小的細胞狀結構,而 TOP區域細胞狀結構較不規則。 在微觀結構觀察中,明顯可知細胞壁面為在中間為最薄,往交點處會逐漸 變厚的情形。試樣之相對密度亦隨著試體取得之位置而有明顯差異,以 BOT 區域最大, TOP區域變異性最明顯。

由觀察各區域試樣的切面,可發現細胞狀結構在某些表面有明顯的長軸方向。藉由寬高比測量後,結果顯示 BOT 及 MID 兩個區域中,方向 1 的平均細胞尺寸大於方向 2 及方向 3,而方向 2 與方向 3 的平均細胞尺寸很接近,而 TOP 區域方向 1 的平均細胞尺寸小於方向 2 及方向 3,而方向 2 與方向 3 的細胞平均尺寸大小比較不明顯。

## 5.2 封閉式泡沫鋁壓力實驗

在相同施力方向下,BOT 及 MID 區域的試樣在相對密度越大時,三個機械參數  $(E^* \setminus \sigma_I \setminus \overline{\sigma_P})$  數值會越大,TOP 區域在  $D_2$  及  $D_3$  實驗上也會有以上的關係存在,而在  $D_1$  實驗無明顯的關聯性。

而在相似的相對密度下施以不同方向受壓,在 BOT 區域及 MID 區域的試樣中, $D_1$ 實驗的機械性質會大於  $D_2$ 與  $D_3$ 實驗,在受壓應力—位移關係圖中以  $D_1$ 實驗之力學反應曲線高於  $D_2$ 及  $D_3$ ,且到達局部極限應力後應力下降的幅度以  $D_1$  最為明顯。在試樣相對密度極為接近時,  $D_2$ 及  $D_3$  曲線十分接近。在 TOP 區域實驗中, $D_1$ 實驗之反應曲線為最低,且機械性質參數也是  $D_1$ 實驗為最低。與第二章寬高比測量之結果比較,得知長軸方向受力時整體力學反應、機械性質參數均高於其他方向。短軸方向受力時整體力學反應與機械性質參數則低於其他方向。

在記錄表面變形狀態之壓力實驗中,觀察到封閉式泡沫鋁在受壓過程中變形並不是均勻的,會有變形集中的情形,變形常以條狀區域出現。在BOT與MID區域之變形集中產生位置無明顯規則,而TOP區域較常出現於表面溝狀結構附近。

## 5.3 數值模型建立與分析

以二維蜂巢狀結構來簡化封閉式泡沫鋁的數值模型,在相對彈性模數計算上,解析解與使用平面應力元素所建立的數值模型幾乎相符,但與實驗結果相比卻相差甚遠。由於試樣表面之細胞狀結構為非均一大小,進一步以 Voronoi 幾何作為二維不規則之數值模型。經過比較後, Voronoi 數值模型計算出相對彈性模數仍小於二維蜂巢狀結構。結果顯示簡化為二維的

數值模型並無法代表封閉式泡沫鋁。

### 5.4 未來研究工作

在壓力實驗上,除了以相同尺寸的試樣來執行壓力實驗外,嘗試改變立方體試樣之尺寸,探討受壓力學行為是否會因為試樣尺寸的改變而造成力學行為的不同。除了切割成立方體外,改變試樣的高度,試樣外觀改變為長方體,同樣探討力學行為是否會有差異。在數值模擬中,二維化的數值模型計算之相對彈性模數與實驗數值存在明顯差異,並無法代表為封閉式泡沫鋁之合理數值模型,因此建議未來發展數值模型以三維幾何作為考量。

1896

# 參考文獻

- [1] M. Vural and G. Ravichandran, "Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 40, pp. 2147-2170, 2003.
- [2] M. Yamashita and M. Gotoh, "Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications—numerical simulation and experiment," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 618-630, 2005.
- [3] W.-Y. Jang and S. Kyriakides, "On the crushing of aluminum open-cell foams: Part I. Experiments," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 617-634, 2009.
- [4] T. Miyoshi, *et al.*, "ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications," *Advanced Engineering Materials*, vol. 2, pp. 179-183, 2000.
- [5] J. Banhart and J. Baumeister, "Deformation characteristics of metal foams," *Journal of Materials Science*, vol. 33, pp. 1431-1440, 1998.
- [6] M. F. Ashby, et al., Metal Foams: A Design Guide Butterworth-Heinemann, 2000.
- [7] J. Banhart, "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams," *Progress in Materials Science*, vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- [8] J. Banhart, "Aluminium foams for lighter vehicles," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 37, pp. 114-125, 2005.
- [9] H. R. Zarei and M. Kröger, "Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application," *Thin-Walled Structures*, vol. 46, pp. 214-221, 2008.
- [10] D. Leitlmeier, *et al.*, "Development of a Foaming Process for Particulate Reinforced Aluminum Melts," *Advanced Engineering Materials*, vol. 4, pp. 735-740, 2002.
- [11] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed.: Cambridge University Press, 1997.
- [12] Y. Sugimura, *et al.*, "On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams," *Acta Materialia*, vol. 45, pp. 5245-5259, 1997.
- [13] T. Miyoshi, *et al.*, "Enhancement of energy absorption in a closed-cell aluminum by the modification of cellular structures," *Scripta Materialia*, vol. 41, pp. 1055-1060, 1999.
- [14] K. Y. G. McCullough, et al., "Uniaxial stress-strain behaviour of

- aluminium alloy foams," Acta Materialia, vol. 47, pp. 2323-2330, 1999.
- [15] A. Paul and U. Ramamurty, "Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 281, pp. 1-7, 2000.
- [16] T. Mukai, *et al.*, "Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading," *Scripta Materialia*, vol. 40, pp. 921-927, 1999.
- [17] A. E. Markaki and T. W. Clyne, "The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams," *Acta Materialia*, vol. 49, pp. 1677-1686, 2001.
- [18] C. M. Cady, *et al.*, "Compressive properties of a closed-cell aluminum foam as a function of strain rate and temperature," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 525, pp. 1-6, 2009.
- [19] L. J. Gibson, et al., "The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 382, pp. 25-42, July 8, 1982 1982.
- [20] M. J. Silva, *et al.*, "The effects of non-periodic microstructure on the elastic properties of two-dimensional cellular solids," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 37, pp. 1161-1177, 1995.
- [21] S. D. Papka and S. Kyriakides, "Experiments and full-scale numerical simulations of in-plane crushing of a honeycomb," *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 2765-2776, 1998.
- [22] K. Li, *et al.*, "Micromechanics model for three-dimensional open-cell foams using a tetrakaidecahedral unit cell and Castigliano's second theorem," *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp. 1769-1781, 2003.
- [23] L. Gong, *et al.*, "Compressive response of open-cell foams. Part I: Morphology and elastic properties," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 42, pp. 1355-1379, 2005.
- [24] W.-Y. Jang, *et al.*, "On the microstructure of open-cell foams and its effect on elastic properties," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, pp. 1845-1875, 2008.
- [25] D. Weaire and R. Phelan, "A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces," *Philosophical Magazine Letters*, vol. 69, pp. 107-110, 1994/02/01 1994.
- [26] W.-Y. Jang and S. Kyriakides, "On the crushing of aluminum open-cell foams: Part II analysis," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 635-650, 2009.

- [27] S. Santosa and T. Wierzbicki, "On the modeling of crush behavior of a closed-cell aluminum foam structure," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 46, pp. 645-669, 1998.
- [28] S. A. Meguid, *et al.*, "FE modelling of deformation localization in metallic foams," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 38, pp. 631-643, 2002.
- [29] A. E. Simone and L. J. Gibson, "Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams," *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 2139-2150, 1998.
- [30] I. C. Konstantinidis, *et al.*, "Model for determining mechanical properties of aluminum closed-cell foams," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 43, pp. 157-167, 2005.
- [31] I. Jeon, *et al.*, "Finite element simulation of the plastic collapse of closed-cell aluminum foams with X-ray computed tomography," *Mechanics of Materials*, vol. 42, pp. 227-236, 2010.
- [32] S. D. Papka and S. Kyriakides, "In-plane crushing of a polycarbonate honeycomb," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 35, pp. 239-267, 1998.
- [33] E. W. Andrews, *et al.*, "Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, pp. 701-713, 2001.
- [34] L. J. Gibson and M. F. Ashby, "The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 382, pp. 43-59, July 8, 1982 1982.
- [35] C. Tekoğlu, *et al.*, "Size effects in foams: Experiments and modeling," *Progress in Materials Science*, vol. 56, pp. 109-138, 2011.
- [36] J.-b. Sha, *et al.*, "FEM modelling of single-core sandwich and 2-core multilayer beams containing foam aluminum core and metallic face sheets under monolithic bending," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 21, pp. 127-138, 2011.
- [37] R. T. DeHoff and F. N. Rhines, *Quantitative Microscopy*. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [38] Y. Mu, *et al.*, "Effect of cell shape anisotropy on the compressive behavior of closed-cell aluminum foams," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 1567-1569, 2010.

表 2.1 各區域試樣之相對密度 (a) TOP (b) MID (c) BOT

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)
L01	8.83	R01	10.18
L02	9.10	R02	10.13
L03	8.28	R03	9.53
L04	9.18	R04	8.97
L05	8.68	R05	9.29
L06	8.60	R06	9.03
L07	8.37	R07	8.21
L08	8.75	R08	7.65
L09	7.88 7.64	R09	7.85
L10	7.64		
L11	7.95		
L12	8.01		
Average (L)	8.44	Average (R)	8.98
Specimen No.	$\rho^*/\rho_s(\%) = 1.8$	Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)
L01	7.83	R01	7.82
L02	7.82	R02	7.77
L03	7.96	R03	7.80
L04	7.88	R04	8.35
L05	8.39	R05	8.28
L06	8.45	R06	8.38
L07	8.40	R07	9.21
L08	8.33	R08	8.79
L09	9.87	R09	8.74
L10	9.75		
L11	9.26		
L12	8.94		
Average (L)	8.57	Average (R)	8.35

Specimen No.	$ ho^*/ ho_{\scriptscriptstyle S}$ (%)	Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)
L01	12.57	R01	12.35
L02	12.36	R02	12.36
L03	12.34	R03	12.38
L04	12.28	R04	11.91
L05	11.78	R05	11.75
L06	11.60	R06	11.75
L07	11.69	R07	10.83
L08	11.62	R08	10.85
L09	11.27	R09	10.65
L10	10.91	W.	
L11	10.61		
L12	11.05		
Average (L)	11.67	Average (R)	11.65

表 2.2 沿著方向 3 各區域之相對密度比較 (a) TOP (b) MID (c) BOT

/		`
1	$\mathbf{a}$	١
١.	7	,
`	u	_

TOP_Part1 TOP_Part2	$\frac{\rho^*/\rho_s(\%)}{9.32}$	$\left. \left. \rho^*/\rho_s \right _{\mathrm{min-max}} \right.$
	9.32	Q 2Q 10 1Q
TOP_Part2		0.40-10.10
	8.81	8.37-9.29
TOP_Part3	7.89	7.64-8.21
	(b)	
	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$\left. ho^*/ ho_s ight _{ ext{min-max}}$
MID_Part1	7.84	7.77-7.96
MID_Part2	8.37	8.28-8.45
MID_Part3	9.22	8.74-9.87
	E(S)	E
	$\rho^*/\rho_s$ (%)	$\left \rho^*/\rho_s\right _{\min-\max}$
BOT_Part1	12.38	12.28-12.57
BOT_Part2	11336	11.60-11.91
BOT_Part3	10.89	10.61-11.27

表 2.3 表面細胞寬高比

	$\overline{K}_{12}$	$\overline{K}_{13}$	$\overline{K}_{23}$	$K_{12}\big _{\min-\max}$	$K_{13} _{\min-\max}$	$K_{23} _{\min-\max}$
TOP	0.891	0.856	0.991	0.802-1.098	0.755-1.038	0.844-1.203
MID	1.082	1.099	1.004	1.020-1.145	1.020-1.182	0.965-1.069
BOT	1.144	1.130	0.995	1.031-1.235	1.014-1.248	0.956-1.044

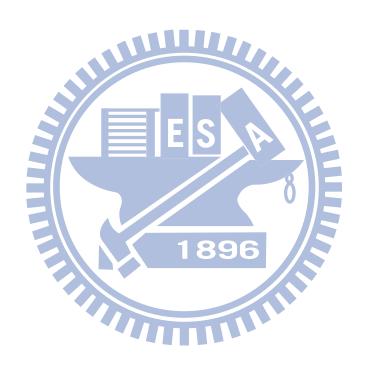


表 3.1 D<sub>1</sub> 實驗材料機械性質 (a) BOT (b) MID (c) TOP

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*_1/E$ (%)	$\sigma_{I1}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P1}$ MPa	$\Delta \varepsilon_{P1}(\%)$
BOT_L03	12.34	1.603	3.32	3.56	48.85
BOT_R04	11.91	1.494	3.07	3.34	48.78
BOT_R07	10.83	1.293	2.53	2.73	46.93

(b)

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*_1/E$ (%)	$\sigma_{I1}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P1}$ MPa	$\Delta \mathcal{E}_{P1}(\%)$
MID_L09	9.87	1.071	2.05	2.10	52.92
MID_R04	8.35	0.918	1.82	1.78	58.41
MID_L02	7.82	0.895	1.72	1.60	60.16

Specimen No.	$\rho^*/\rho_s$ (%)	$E_{1}^{*}/E(\%)$	$\sigma_{II}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P1}$ MPa	$\Delta arepsilon_{P1}(\%)$
TOP_R03	9.53	0.306	1.09	1.19	43.96
TOP_L08	8.75	0.359	1.02	1.10	46.49
TOP_R09	7.85	0.511	1.23	1.27	52.96

表 3.2 D<sub>2</sub> 實驗材料機械性質 (a) BOT (b) MID (c) TOP

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*_2/E$ (%)	$\sigma_{I2}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P2}$ MPa	$\Delta\varepsilon_{P2}(\%)$
BOT_R02	12.36	1.197	2.70	2.87	46.31
BOT_R05	11.75	1.147	2.55	2.57	47.96
BOT_L12	11.05	1.107	2.37	2.51	48.27

(b)

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*_2/E$ (%)	$\sigma_{I2}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P2}$ MPa	$\Delta arepsilon_{P2}(\%)$
MID_L10	9.75	0.847	1.77	1.85	50.36
MID_L06	8.45	0.586	1.69	1.66	56.28
MID_R02	7.77	0.787	1.62	1.50	61.10

Specimen No.	$\rho^*/\rho_s$ (%)	$E^{*}_{2}/E(\%)$	$\sigma_{I2}$ MPa	$ar{\sigma}_{\scriptscriptstyle P2}$ MPa	$\Delta arepsilon_{P2}(\%)$
TOP_L02	9.10	0.777	1.90	1.74	61.73
TOP_R04	8.97	0.819	1.76	1.65	59.81
TOP_R07	8.21	0.682	1.51	1.47	59.37

表 3.3 D<sub>3</sub> 實驗材料機械性質 (a) BOT (b) MID (c) TOP

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*_3/E$ (%)	$\sigma_{I3}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P3}$ MPa	$\Delta arepsilon_{P3}(\%)$
BOT_L02	12.36	1.143	2.58	2.79	44.69
BOT_R06	11.75	1.160	2.57	2.71	47.61
BOT_R09	10.65	1.050	2.38	2.48	50.46

(b)

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*_3/E$ (%)	$\sigma_{I3}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P3}$ MPa	$\Delta arepsilon_{P3}(\%)$
MID_L11	9.26	0.847	1.77	1.85	50.36
MID_L07	8.40	0.791	1.63	1.68	54.39
MID_R03	7.80	0.723	1.42	1.46	58.57

Specimen No.	$\rho^*/\rho_s$ (%)	$E_{3}^{*}/E(\%)$	$\sigma_{I3}$ MPa	$ar{\sigma}_{\scriptscriptstyle{P3}}$ MPa	$\Delta arepsilon_{P3}(\%)$
TOP_R05	8.68	0.858	1.94	1.78	59.51
TOP_L01	8.33	0.831	1.56	1.63	55.08
TOP_R08	7.65	0.566	1.22	1.27	55.79

表 3.4 不同方向下機械性質比較 (a) BOT (b) MID (c) TOP (a)

Specimen No.	$\rho^*/\rho_s$ (%)	$E^*/E$ (%)	$\sigma_{\scriptscriptstyle I}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P}$ MPa	$\Delta arepsilon_p(\%)$	
Exp.1						
BOT_L03_D1	12.34	1.603	3.32	3.56	48.85	
BOT_L04_D2	12.28	1.213	2.60	2.82	45.48	
BOT_L02_D3	12.36	1.143	2.58	2.79	44.69	
		Exp.2	2			
BOT_L09_D1	11.27	1.095	2.41	2.66	48.01	
BOT_L12_D2	11.05	1.107	2.37	2.51	48.27	
BOT_L10_D3	10.61	1.202	2.47	2.50	49.23	
		Exp.3				
BOT_L05_D1	11.78	1.523	3.17	3.38	49.38	
BOT_L08_D2	11.62	1.160	2.47	2.64	47.28	
BOT_L06_D3	11.60	1.127	2.54	2.69	47.52	
		Exp.4	0	112		
BOT_R01_D1	12.35	1.515	3.38	3.61	48.85	
BOT_R02_D2	12.36	1.197	2.70	2.87	46.31	
BOT_R03_D3	12.38	1.258	2.68	2.89	46.21	
		Exp.5				
BOT_R04_D1	11.91	1.494	3.07	3.34	48.78	
BOT_R05_D2	11.75	1.147	2.55	2.57	47.96	
BOT_R06_D3	11.75	1.160	2.57	2.71	47.61	
		Exp.6	)			
BOT_R07_D1	10.83	1.293	2.53	2.73	46.93	
BOT_R08_D2	10.85	1.111	2.40	2.47	50.06	
BOT_R09_D3	10.65	1.050	2.38	2.48	50.46	

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*/E$ (%)	$\sigma_{\scriptscriptstyle I}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P}$ MPa	$\Delta \varepsilon_{p}  \left(  \%  \right)$		
Exp.1							
MID_L09_D1	9.87	1.071	2.05	2.10	52.92		
MID_L10_D2	9.75	0.847	1.77	1.85	50.36		
MID_L11_D3	9.26	0.848	1.61	1.76	49.40		
		Exp.2	2				
MID_L02_D1	7.82	0.895	1.72	1.60	60.16		
MID_L01_D2	7.83	0.662	1.38	1.38	56.40		
MID_L04_D3	7.88	0.656	1.29	1.41	51.88		
		Exp.3	3				
MID_L05_D1	8.39	0.934	1.81	1.77	57.92		
MID_L06_D2	8.45	0.586	1.69	1.66	56.28		
MID_L07_D3	8.40	0.791	1.63	1.68	54.39		
		Exp.4					
MID_R01_D1	7.82	0.888	1.75	1.60	62.24		
MID_R02_D2	7.77	0.787	1.62	1.50	61.10		
MID_R03_D3	7.80	0.723	1.42	1.46	58.57		
		Exp.5	5				
MID_R04_D1	8.35	0.918	9 1.82	1.78	58.41		
MID_R05_D2	8.28	0.888	1.75	1.70	57.71		
MID_R06_D3	8.38	0.877	1.72	1.72	57.74		
	Exp.6						
MID_R07_D1	9.21	0.938	1.90	1.95	54.62		
MID_R08_D2	8.79	0.870	1.76	1.76	55.45		
MID_R09_D3	8.74	0.810	1.68	1.76	53.20		

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	$E^*/E$ (%)	$\sigma_{\scriptscriptstyle I}$ MPa	$\overline{\sigma}_{\scriptscriptstyle P}$ MPa	$\Delta \varepsilon_{\scriptscriptstyle P}$ (%)	
Exp.1						
TOP_L04_D1	9.18	0.368	1.11	1.21	45.97	
TOP_L02_D2	9.10	0.777	1.90	1.74	61.73	
TOP_L01_D3	8.83	0.831	1.56	1.63	55.08	
		Exp.2	2			
TOP_L12_D1	8.01	0.500	1.26	1.32	54.64	
TOP_L11_D2	7.95	0.730	1.55	1.44	60.90	
TOP_L09_D3	7.88	0.567	1.30	1.30	58.47	
		Exp.3	3			
TOP_L08_D1	8.75	0.359	1.02	1.10	46.49	
TOP_L06_D2	8.60	0.767	1.66	1.55	60.84	
TOP_L05_D3	8.68	0.803	1.71	1.65	60.03	
		Exp.4	1			
TOP_R06_D1	9.03	0.431	1.14	1.22	48.18	
TOP_R04_D2	8.97	0.819	1.76	1.65	59.81	
TOP_R05_D3	9.29	0.858	1.94	1.78	59.51	
		Exp.5	5			
TOP_R09_D1	7.85	0.511 8	91:23	1.27	52.96	
TOP_R07_D2	8.21	0.682	1.51	1.47	59.37	
TOP_R08_D3	7.65	0.566	1.22	1.27	55.79	
Exp.6						
TOP_R03_D1	9.53	0.306	1.09	1.19	43.96	
TOP_R01_D2	10.18	0.843	1.94	1.94	56.80	
TOP_R02_D3	10.13	1.012	2.28	2.05	60.15	

表 3.5 試樣寬高比 (a) BOT (b) MID (c) TOP

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	i, j, k	$K_{ij}$	$K_{ik}$
		Exp.1		
BOT_L03_D1	12.34	1, 2, 3	1.190	1.202
BOT_L04_D2	12.28	2, 1, 3	0.894	0.956
BOT_L02_D3	12.36	3, 1, 2	0.878	0.992
		Exp.2		
BOT_L09_D1	11.27	1, 2, 3	1.093	1.014
BOT_L12_D2	11.05	2, 1, 3	0.914	0.991
BOT_L10_D3	10.61	3, 1, 2	0.948	0.985
		Exp.3		
BOT_L05_D1	11.78	1,2,3	1.184	1.248
BOT_L08_D2	11.62	2, 1, 3	0.882	0.980
BOT_L06_D3	11.60	3, 1, 2	0.834	1.017
		Exp.4	0	
BOT_R01_D1	12.35	1, 2, 3	1.143	1.134
BOT_R02_D2	12.36	12,1,3 6	0.828	0.993
BOT_R03_D3	12.38	3, 1, 2	0.842	1.010
		Exp.5		
BOT_R04_D1	11.91	1, 2, 3	1.126	1.176
BOT_R05_D2	11.75	2, 1, 3	0.879	0.964
BOT_R06_D3	11.75	3, 1, 2	0.876	1.006
		Exp.6		
BOT_R07_D1	10.83	1, 2, 3	1.126	1.050
BOT_R08_D2	10.85	2, 1, 3	0.879	0.994
BOT_R09_D3	10.65	3, 1, 2	0.946	0.988

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	i, j, k	$K_{ij}$	$K_{ik}$
		Exp.1		
MID_L09_D1	9.87	1, 2, 3	1.111	1.172
MID_L10_D2	9.75	2, 1, 3	0.884	1.041
MID_L11_D3	9.26	3, 1, 2	0.882	0.972
		Exp.2		
MID_L02_D1	7.82	1, 2, 3	1.143	1.120
MID_L01_D2	7.83	2, 1, 3	0.874	0.991
MID_L04_D3	7.88	3, 1, 2	0.912	0.993
		Exp.3		
MID_L05_D1	8.39	1, 2, 3	1.128	1.118
MID_L06_D2	8.45	2, 1, 3	0.879	1.021
MID_L07_D3	8.40	3, 1, 2	0.915	0.999
		Exp.4		
MID_R01_D1	7.82	1, 2, 3	1.058	1.061
MID_R02_D2	7.77	2, 1, 3	0.940	1.002
MID_R03_D3	7.80	3, 1, 2	0.938	0.992
		Exp.5		
MID_R04_D1	8.35	11,2,3 6	1.045	1.072
MID_R05_D2	8.28	2, 1, 3	0.965	1.003
MID_R06_D3	8.38	3, 1, 2	0.907	1.009
		Exp.6		
MID_R07_D1	9.21	1, 2, 3	1.045	1.075
MID_R08_D2	8.79	2, 1, 3	0.967	1.006
MID_R09_D3	8.74	3, 1, 2	0.941	1.008

Specimen No.	$ ho^*/ ho_s$ (%)	i, j, k	$K_{ij}$	$K_{ik}$
		Exp.1		
TOP_L04_D1	9.18	1, 2, 3	0.834	0.825
TOP_L02_D2	9.10	2, 1, 3	1.199	0.944
TOP_L01_D3	8.83	3, 1, 2	1.289	1.034
		Exp.2		
TOP_L12_D1	8.01	1, 2, 3	0.893	0.937
TOP_L11_D2	7.95	2, 1, 3	1.034	1.050
TOP_L09_D3	7.88	3, 1, 2	1.082	0.965
	. 411	Exp.3		
TOP_L08_D1	8.75	1, 2, 3	0.833	0.821
TOP_L06_D2	8.60	2, 1, 3	1.195	0.965
TOP_L05_D3	8.68	3, 1, 2	1.235	0.949
		Exp.4		
TOP_R06_D1	9.03	1, 2, 3	0.851	0.843
TOP_R04_D2	8.97	2, 1, 3	1.146	0.938
TOP_R05_D3	9.29	3, 1, 2	1.189	1.024
		Exp.5		
TOP_R09_D1	7.85	1, 2, 3	0.964	1.019
TOP_R07_D2	8.21	2, 1, 3	1.023	0.984
TOP_R08_D3	7.65	3, 1, 2	1.007	1.021
		Exp.6		
TOP_R03_D1	9.53	1, 2, 3	0.842	0.784
TOP_R01_D2	10.18	2, 1, 3	1.188	0.954
TOP_R02_D3	10.13	3, 1, 2	1.262	1.058

表 4.1 二維蜂巢狀模型解析解與數值模型之彈性模數比較

$ ho^*ig/ ho_s$ (%)	解析解	平面應力元素	誤差 (%)
10.65	0.3043%	0.3069%	0.85
10.85	0.3223%	0.3250%	0.85
10.91	0.3281%	0.3309%	0.86
11.05	0.3417%	0.3447%	0.87
11.6	0.3975%	0.4012%	0.93
11.62	0.3997%	0.4034%	0.93
11.75	0.4144%	0.4184%	0.96
12	0.4421%	0.4464%	0.97
12.36	0.4849%	0.4899%	1.01
12.38	0.4869%	0.4918%	1.02



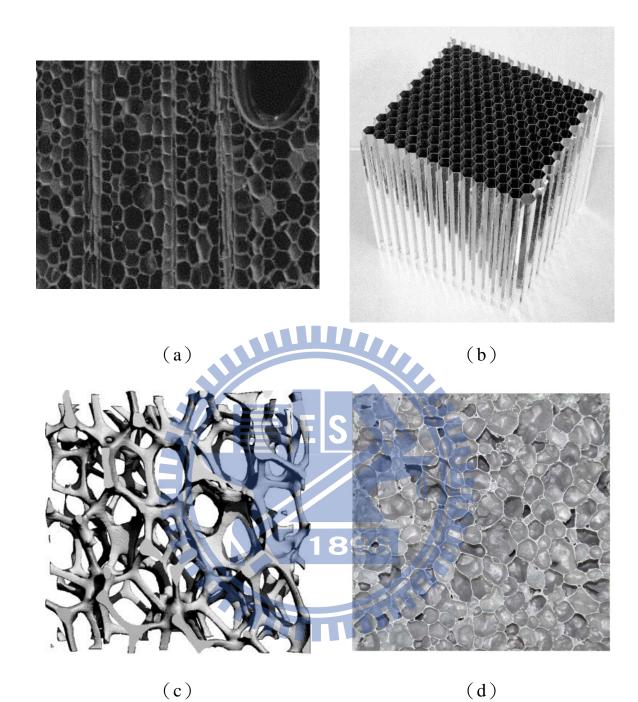


圖 1.1 不同形式的細胞狀材料 (a) 巴爾莎木 (SEM 圖) (b) 鋁製的蜂巢 狀材料 (c) Duocel®開口式泡沫鋁 (電腦斷層掃描圖) (d) ALPORAS™封 閉式泡沫鋁

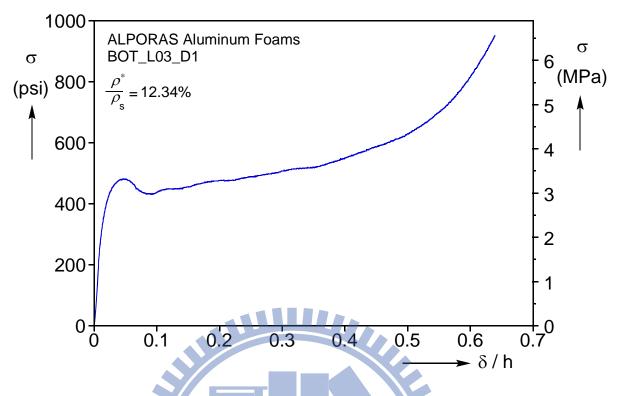
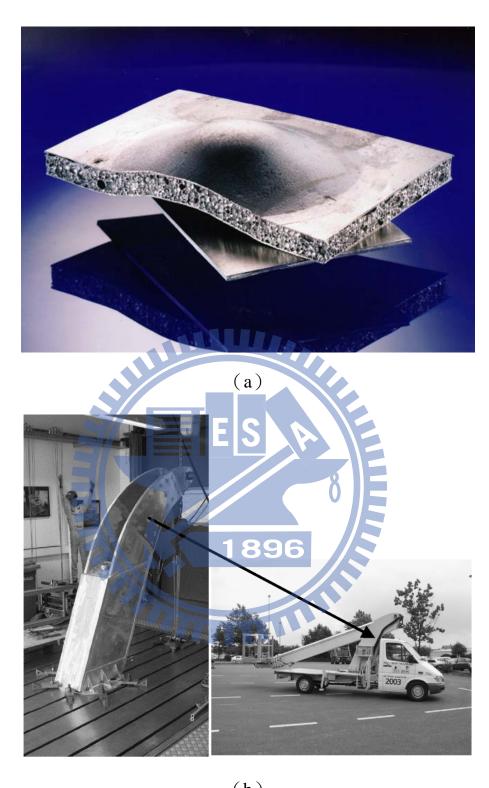


圖 1.2 ALPORAS™封閉式泡沫鋁之受壓力學行為



(b)

圖 1.3 泡沫鋁三明治結構應用(a)以泡沫鋁為芯材製成之三明治結構(b) 由泡沫鋁三明治結構製成之起重臂



圖 1.4 空心管內填滿泡沫鋁之能量吸收裝置



圖 1.5 西門子 COMBINO 列車之能量吸收裝置

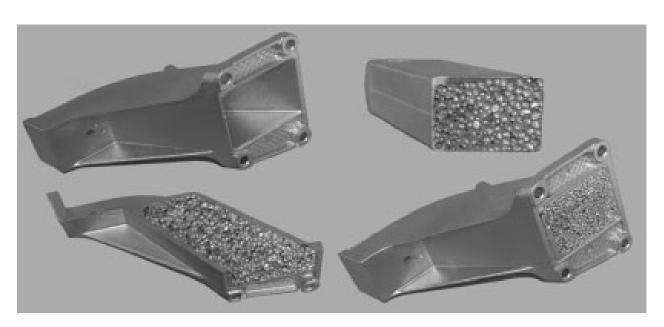


圖 1.6 BMW 引擎支撐座之樣品

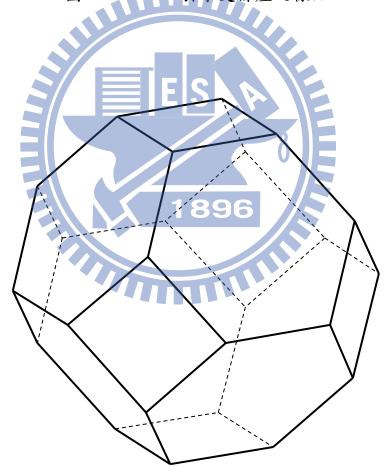


圖 1.7 Kelvin cell 十四面體



圖 2.1 封閉式泡沫鋁之表面及表面局部放大

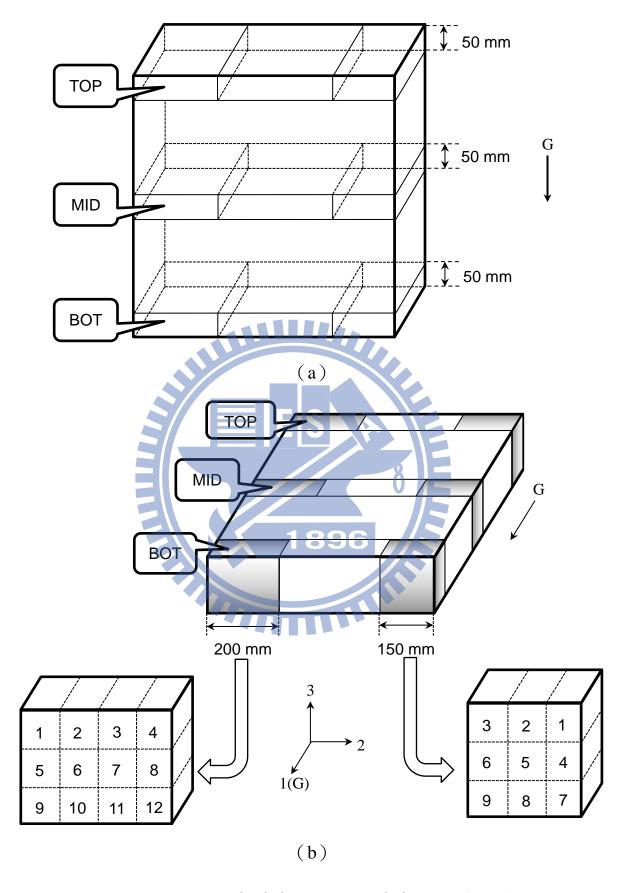


圖 2.2 母材切割示意(a)切割位置(b)立方體試樣編號



圖 2.3 封閉式泡沫鋁表面 (a) 試樣切面 (b) 表面細胞壁之放大

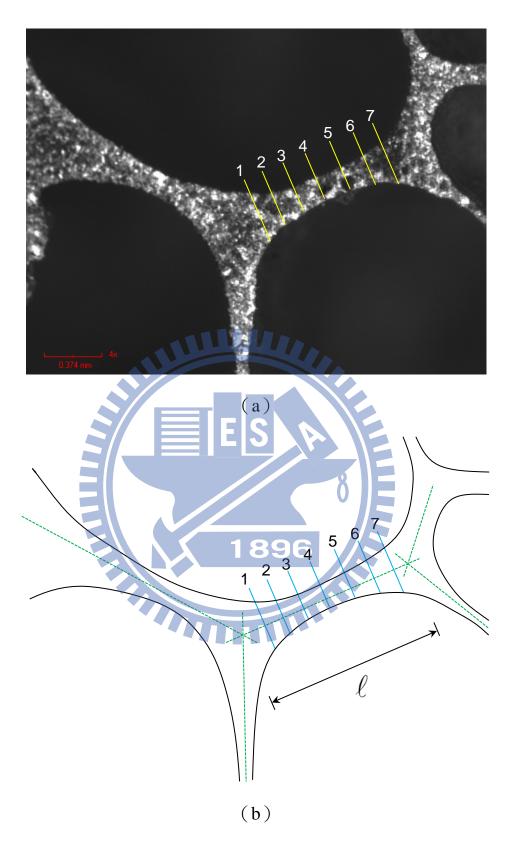


圖 2.4 表面細胞壁量測 (a) 表面細胞壁之照片與厚度量測位置 (b) 細胞壁勾勒圖與壁面長度定義

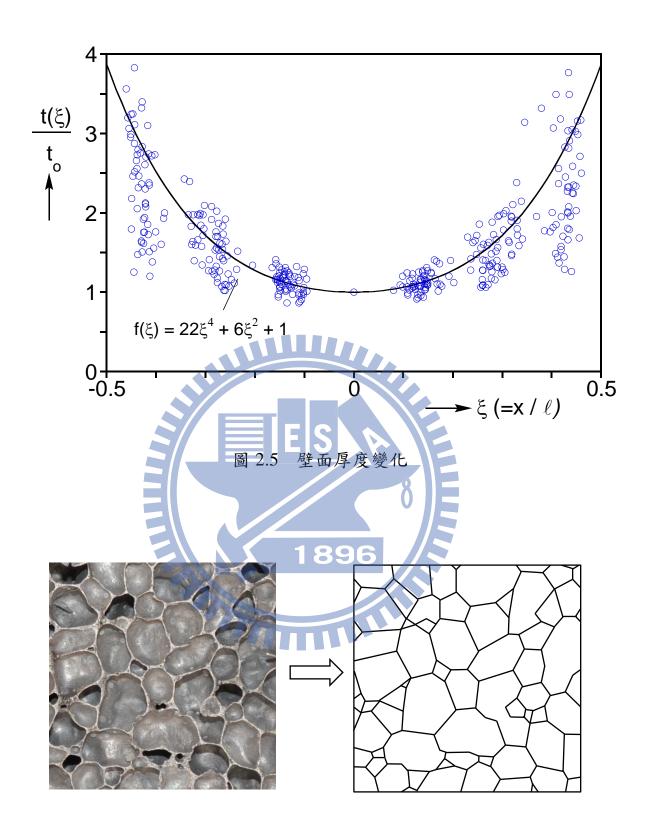


圖 2.6 表面細胞狀結構以多邊形近似示意圖

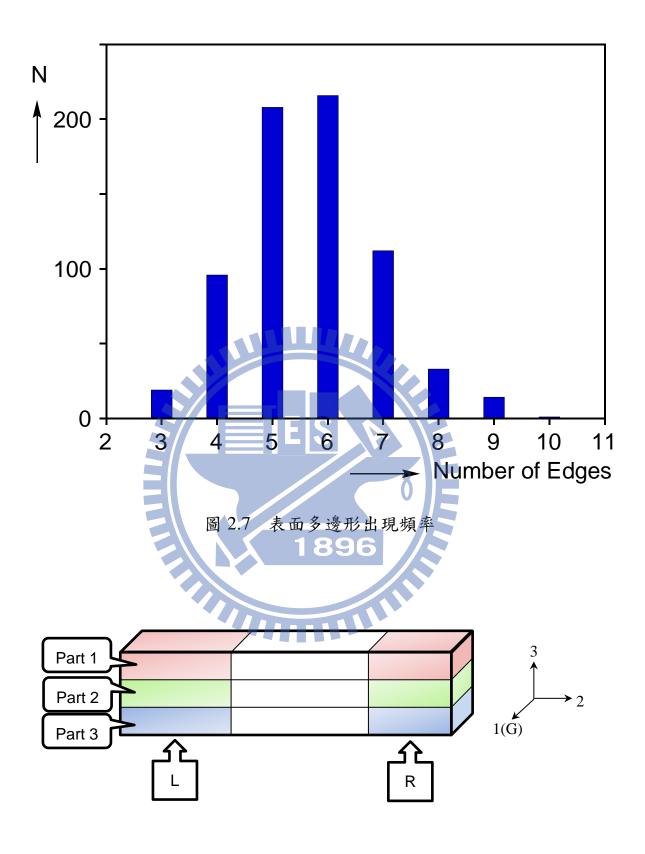


圖 2.8 沿方向 3 分組示意圖

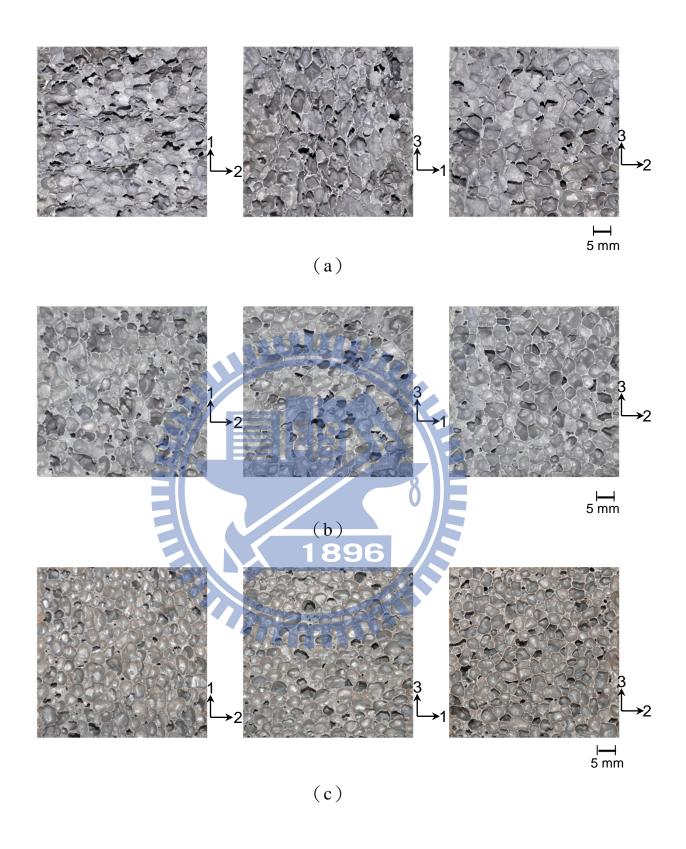
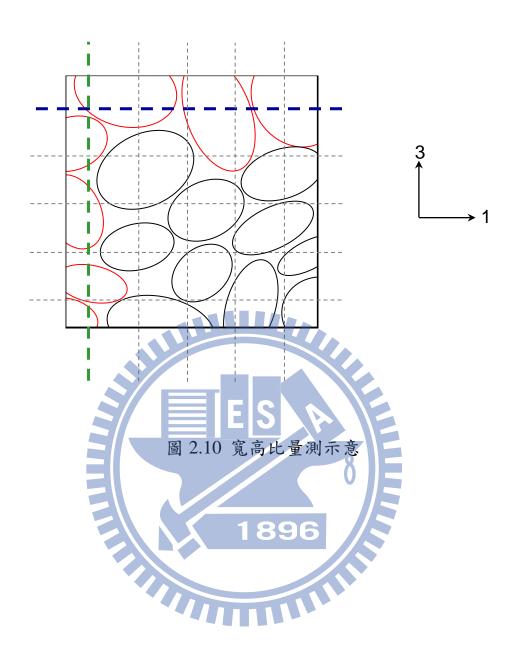


圖 2.9 試樣切面比較 (a) TOP (b) MID (c) BOT



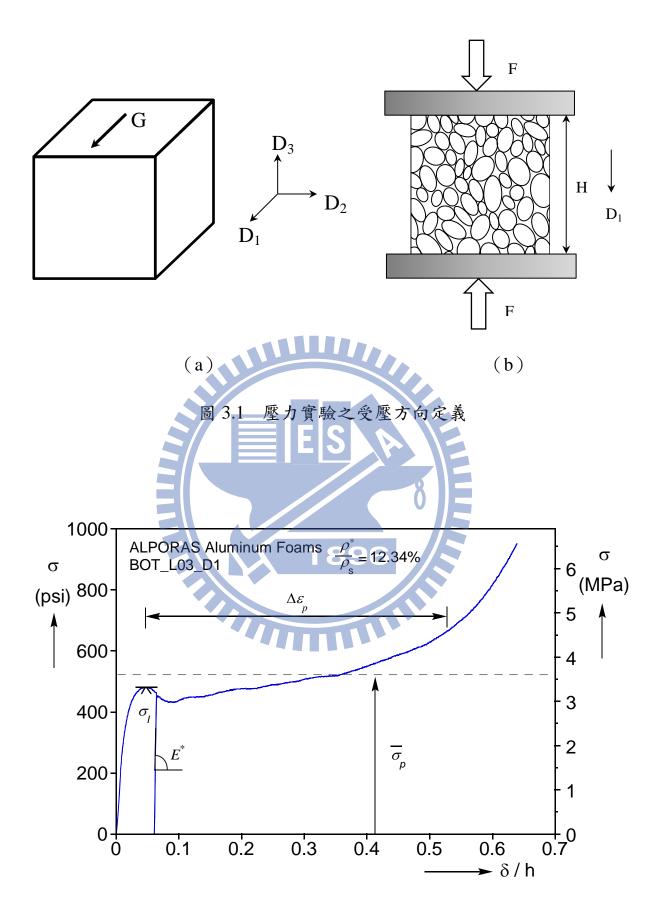
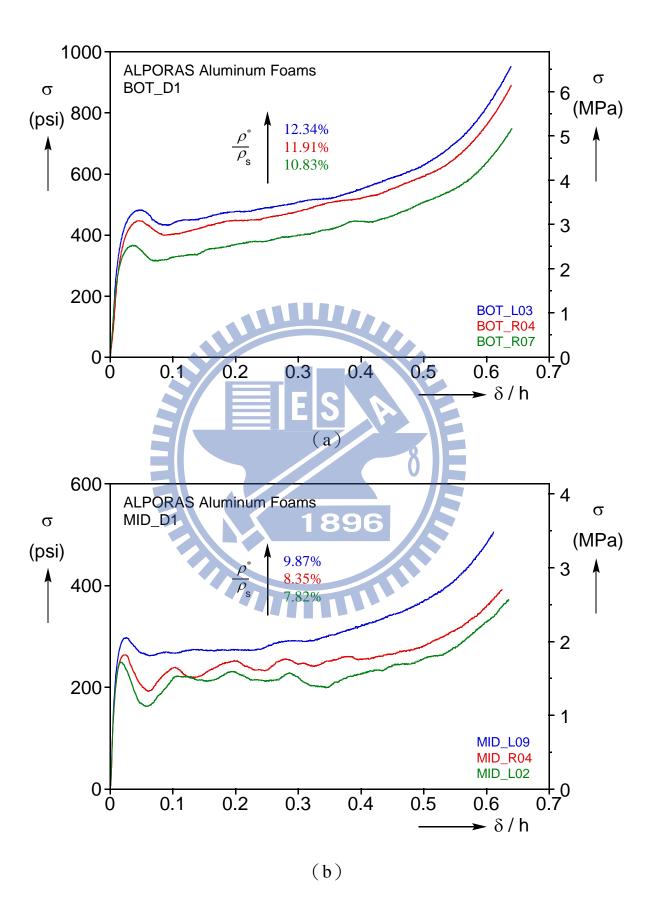


圖 3.2 封閉式泡沫鋁之受壓力學行為



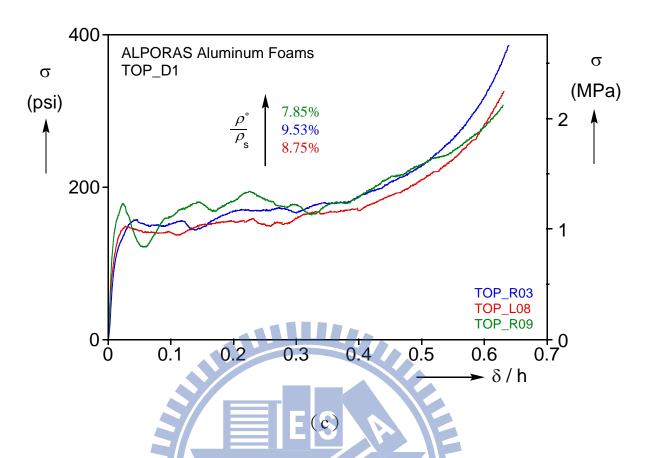


圖 3.3  $D_1$  實驗之受壓應力—位移關係圖 (a) BOT (b) MID (c) TOP

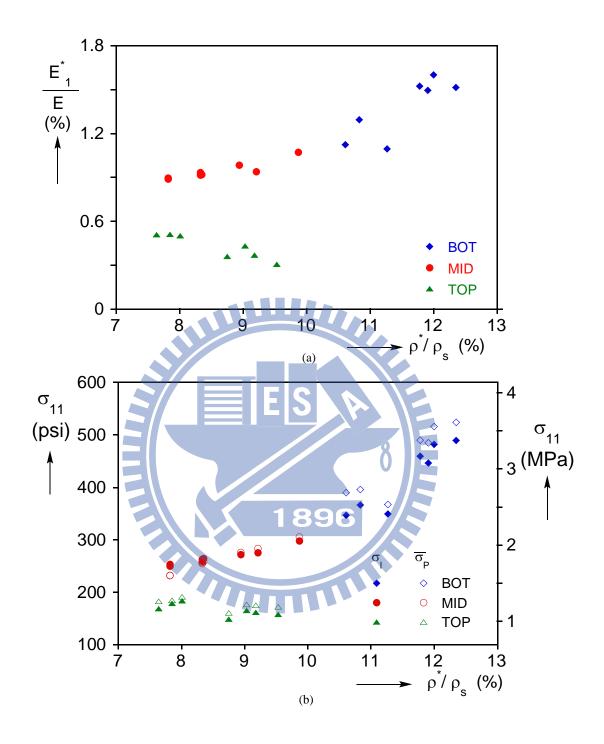
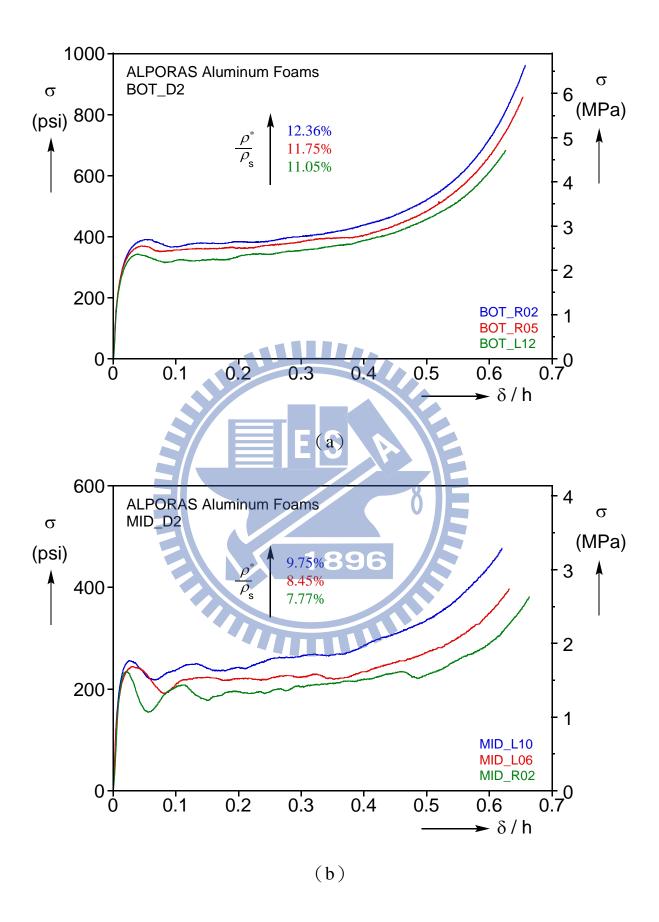


圖 3.4  $D_1$  實驗之機械性質 (a) 軸向彈性模數  $E^*_1/E$  (b) 局部極大應力值  $\sigma_{P_1}$  及平台應力  $\overline{\sigma}_{P_1}$ 



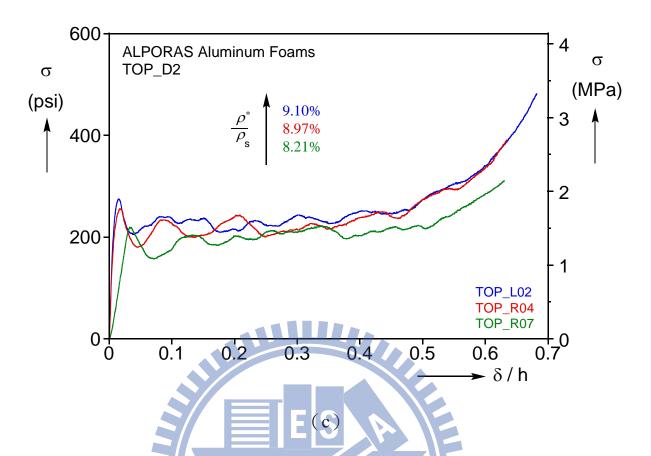
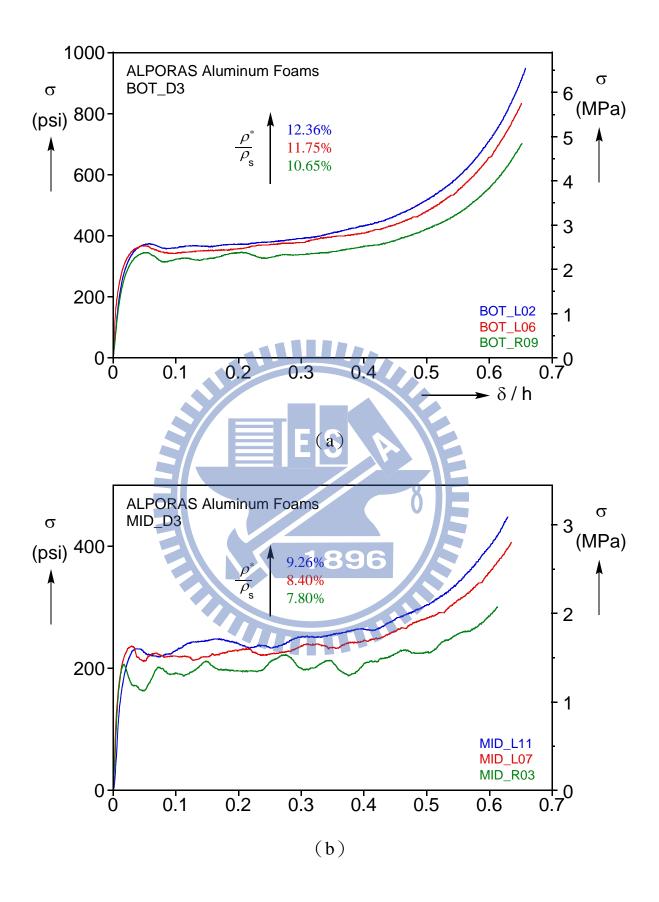


圖 3.5  $D_2$  實驗之受壓應力—位移關係圖 (a) BOT (b) MID (c) TOP



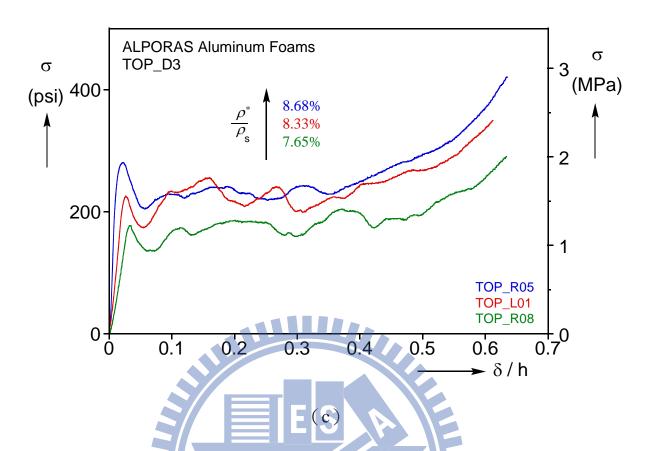


圖 3.6 D<sub>3</sub>實驗之受壓應力─位移關係圖 (a) BOT (b) MID (c) TOP

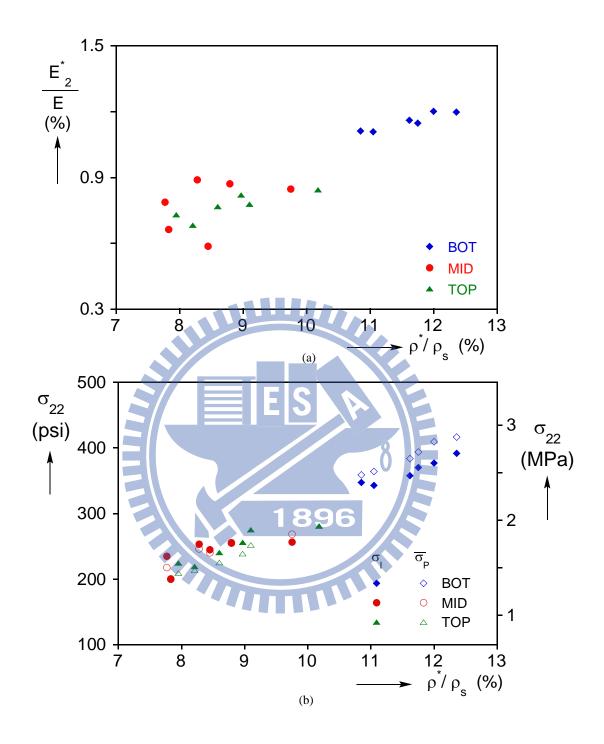


圖 3.7  $D_2$  實驗之機械性質 (a) 軸向彈性模數  $E^*_2/E$  (b) 局部極大應力  $\sigma_{r_2}$  及 平台應力  $\overline{\sigma}_{p_2}$ 

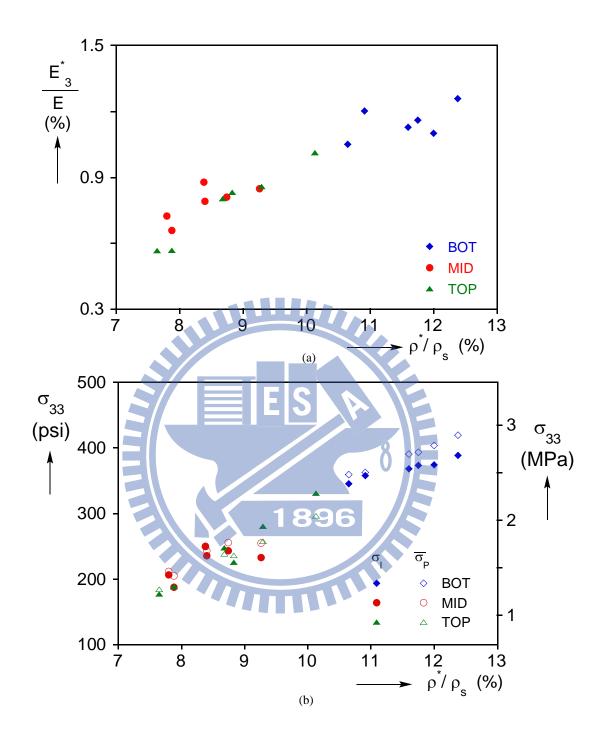


圖 3.8  $D_3$ 實驗之機械性質 (a) 軸向彈性模數  $E^*_3/E$  (b) 局部極大應力 $\sigma_{I_3}$  及 平台應力 $\overline{\sigma}_{P_3}$ 

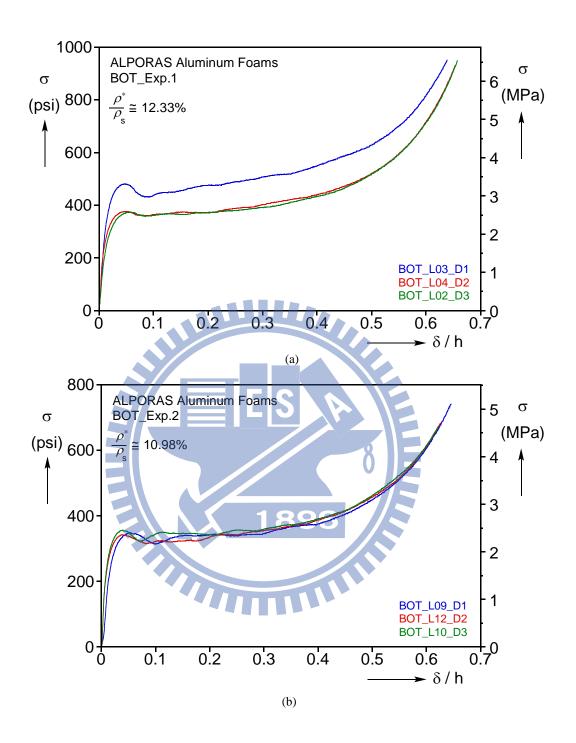


圖 3.9 BOT 區域試樣以不同施力方向之受壓應力—位移關係圖

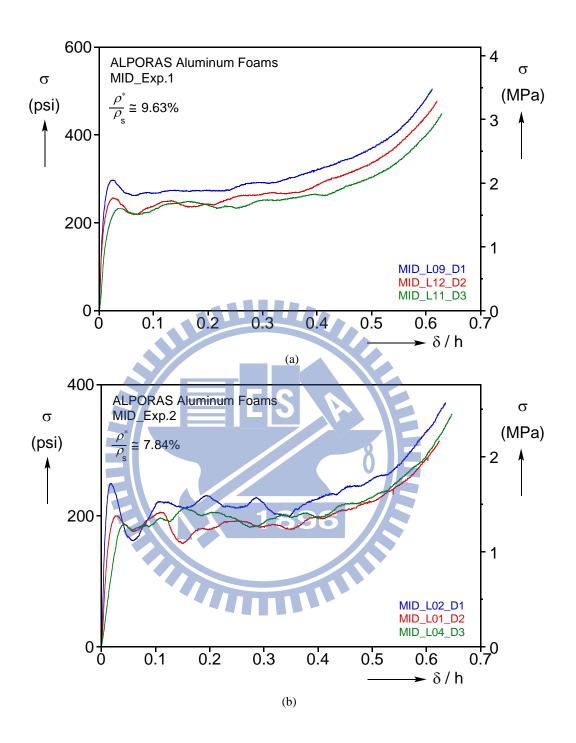


圖 3.10 MID 區域試樣以不同施力方向之受壓應力—位移關係圖

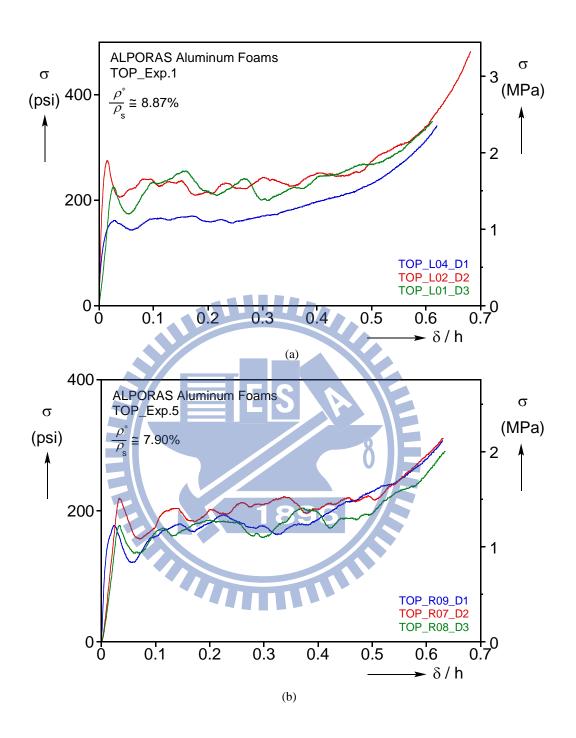


圖 3.11 TOP 區域試樣以不同施力方向之受壓應力—位移關係圖

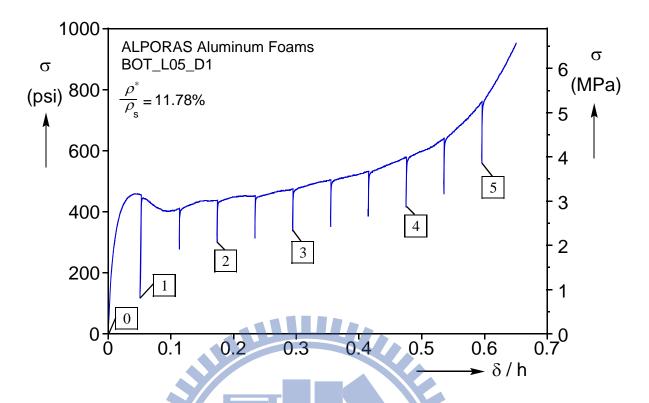


圖 3.12 試樣 BOT\_L05 受壓應力—位移關係圖 (D1實驗)



圖 3.13 對應於圖 3.12 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況

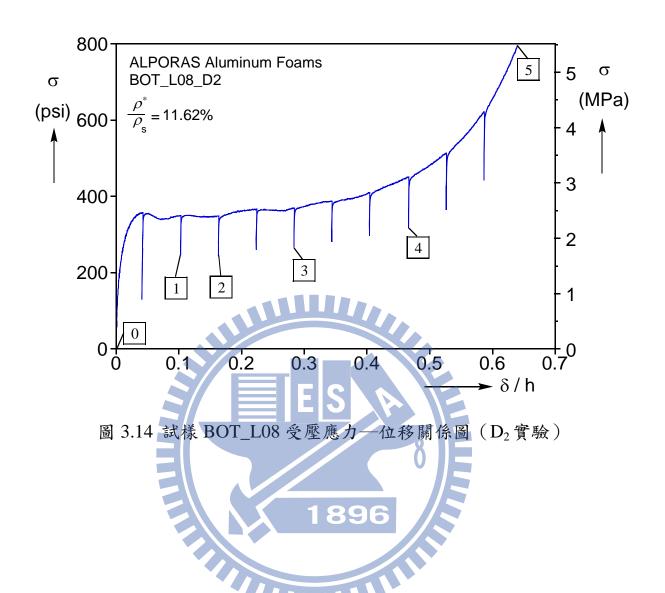




圖 3.15 對應於圖 3.14 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況

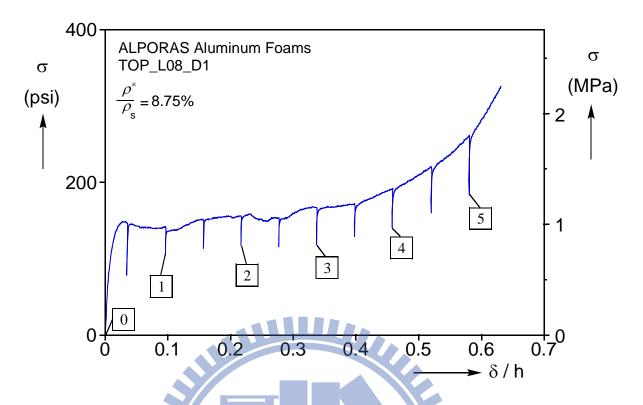


圖 3.16 試樣 TOP\_L08 受壓應力—位移關係圖 (D1實驗)



圖 3.17 對應於圖 3.16 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況

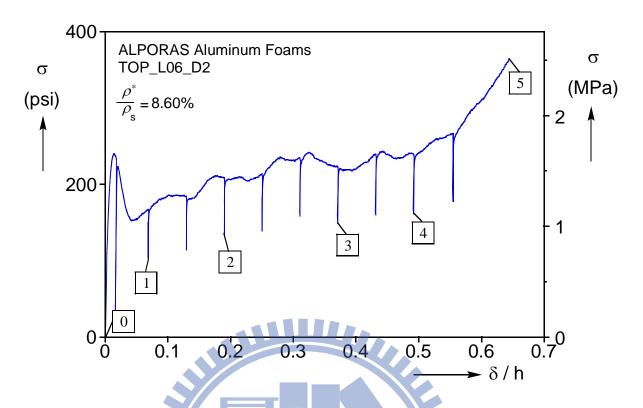


圖 3.18 試樣 TOP\_L06 受壓應力—位移關係圖 (D2實驗)



圖 3.19 對應於圖 3.18 狀態 ① 至狀態 ⑤ 的表面變形情況

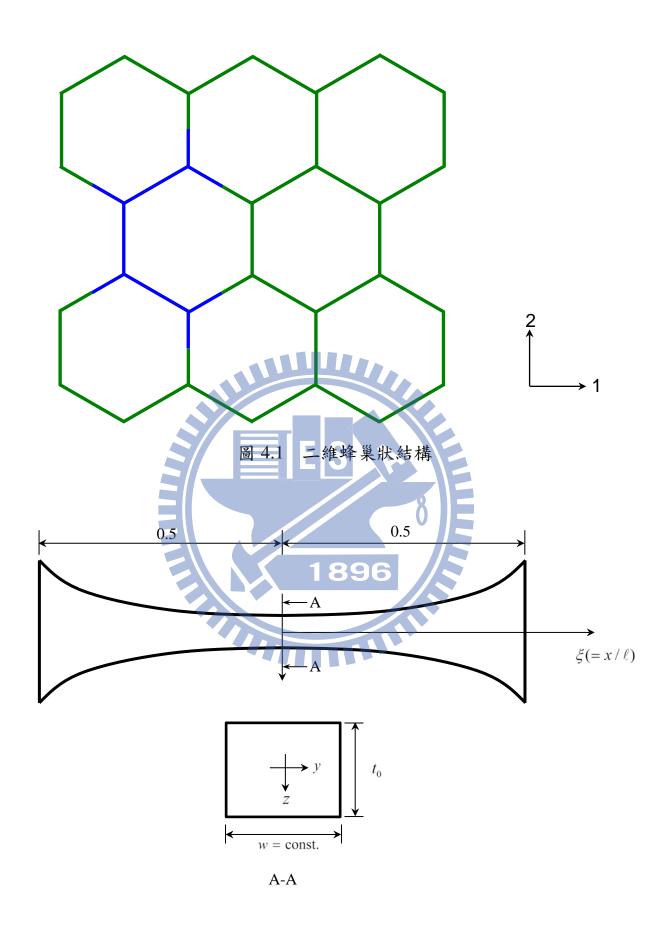
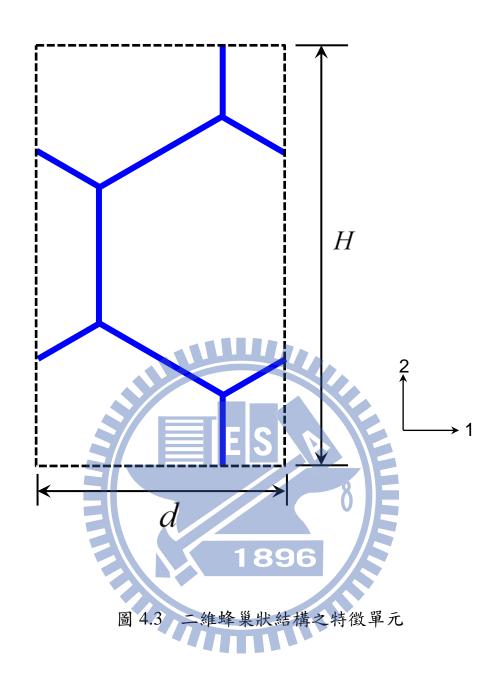


圖 4.2 邊之幾何定義



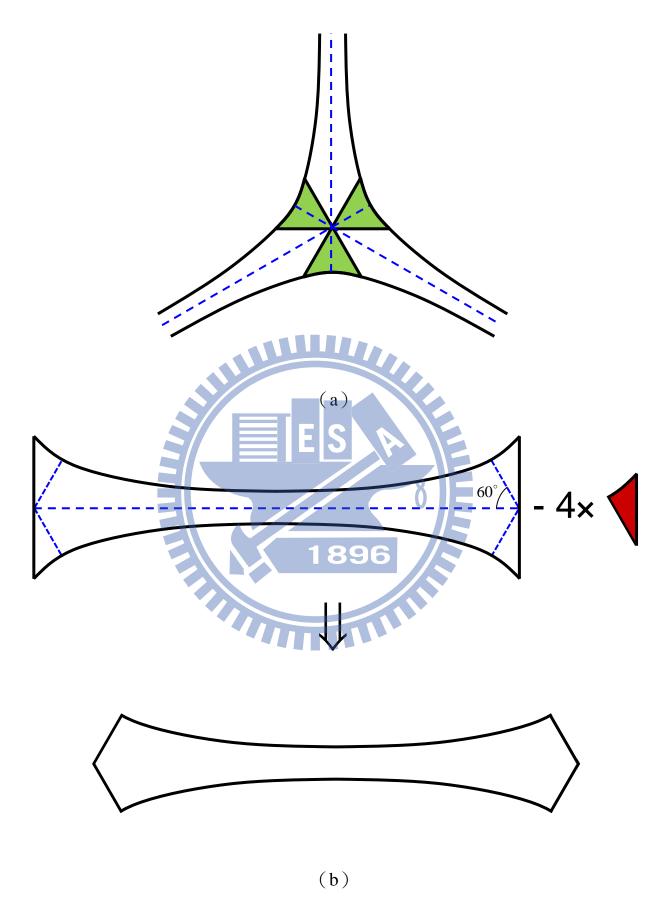


圖 4.4 結點修正 (a) 結點處材料重疊情形 (b) 扣除重複材料部分

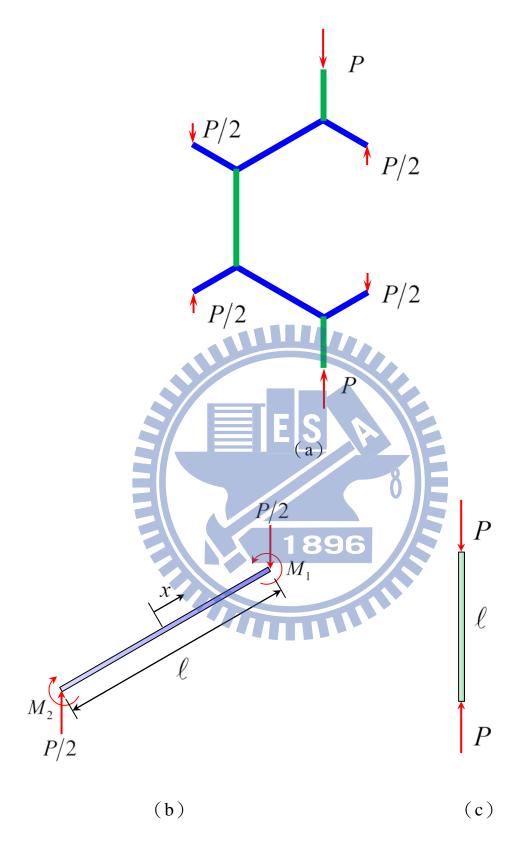
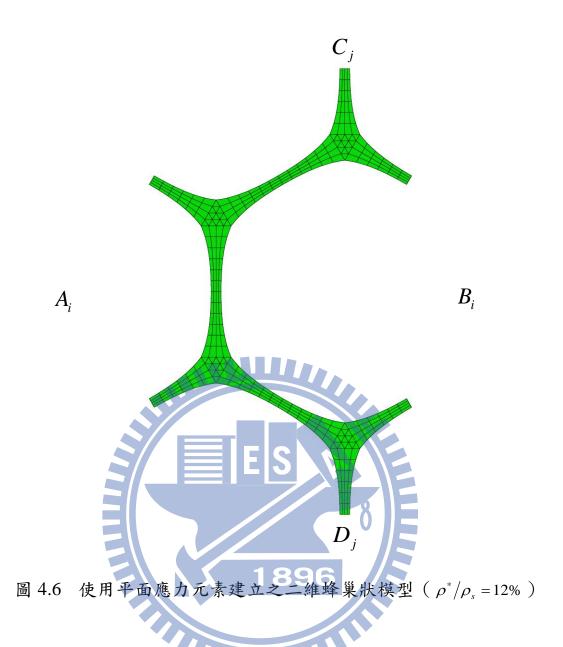
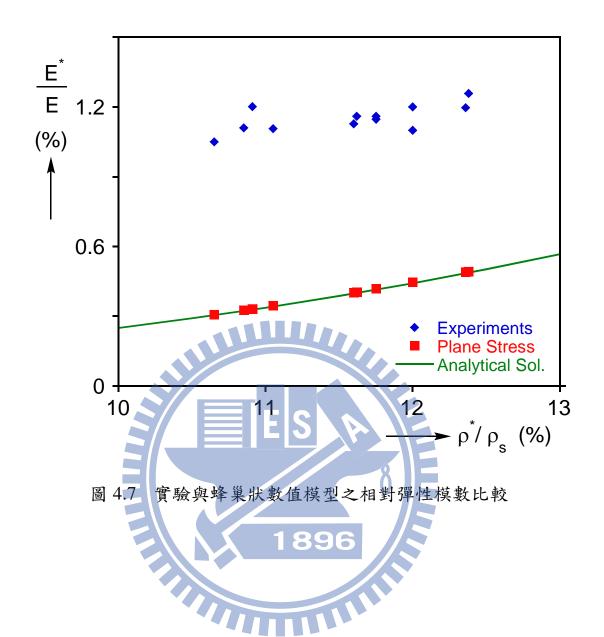
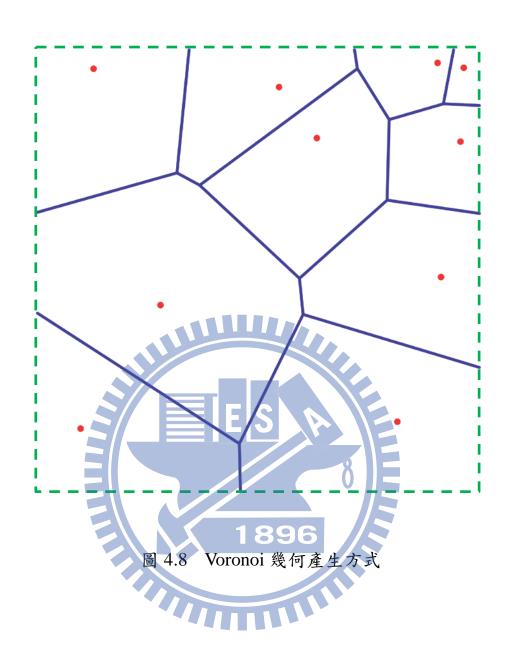


圖 4.5 二維蜂巢狀結構自由體圖 (a) 特徵單元自由體圖 (b) 斜向邊自由體圖 (c) 直向邊自由體圖







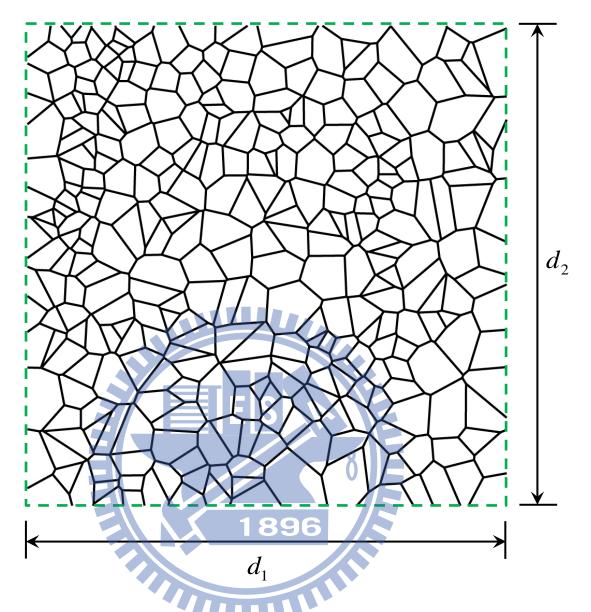


圖 4.9 Voronoi 數值模型之幾何

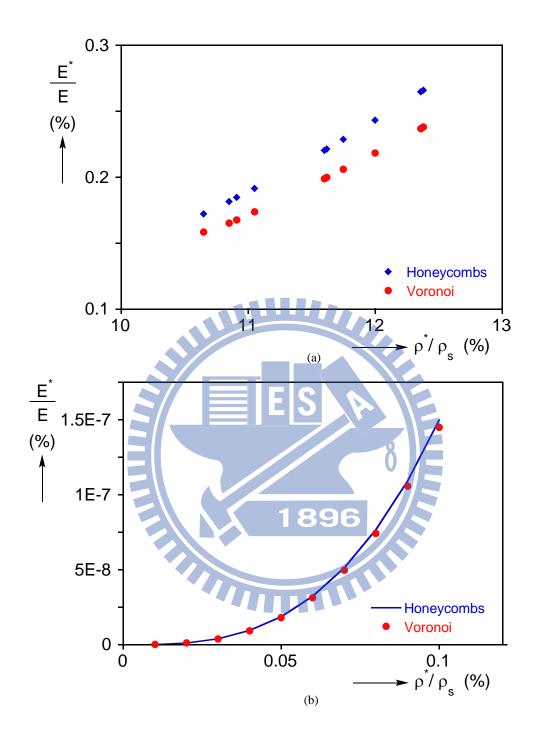


圖 4.10 蜂巢狀數值模型與 Voronoi 數值模型之彈性模數比較 (a) 與實驗試 樣相同之相對密度 (b) 相對密度極小

## 附錄 二維蜂巢狀模型幾何參數產生流程圖

