

國立交通大學建築研究所  
碩 士 論 文

新構築：初探外骨骼構造之自由形體參數式設計與施作流程

**New tectonics : Design and Prototyping  
of a Exoskeleton Free Form Structure and its Components**



研 究 生：張峻福

指 導 教 授：侯君昊

中 華 民 國 一 〇 一 年 七 月

# 新構築：初探外骨骼構造之自由形體參數式設計與施作流程

## **New tectonics : Design and Prototyping of a Exoskeleton Free Form Structure and its Components**

研究生：張峻福

Student : Chun-Fu Chang

指導教授：侯君昊

Advisor : June-Hao Hou



國立交通大學  
建築研究所  
碩士論文

A Thesis  
Submitted to Graduate Institute of Architecture  
College of Humanities and Social Sciences  
National Chiao Tung University  
In Partial Fulfillment of the Requirements  
For the Degree of  
Master  
of

**Science in Architecture**

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

## 中文摘要

電腦輔助設計 ( CAD ) 與電腦輔助製造 ( CAM ) 技術解放了建築設計與製造之侷限性，使設計者便於創作更加自由豐富之自由形體，於現今實質案例中，自由形體建造多數採用組合皮層與骨架之建構方式；而以皮層即是骨架之外骨骼 ( Exoskeleton ) 構造為概念，採用單元構件建構自由形體之案例多數為實驗階段物件，其所施作之自由形體製造流程亦不成熟。

有鑑於此，於自由形體數位設計與施作過程中，該如何設計外骨骼構造之單元構件原型？而外骨骼構造之自由形體係如何被建造？又如何以參數化方式建構自由形體，並減少軟體操作繁雜之問題？

本研究試圖藉由案例分析探討外骨骼構造之構成方式與材料應用原理，以操作參數式設計與實體化製造，建構單元構件原型，進而發展外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。而本文數位製造方法可分為二個階段：階段一為依單元構件之概念建立外骨骼構造之原型，並建置參數化系統；階段二即進而提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

關鍵字：外骨骼構造、單元構件、數位建造流程、參數式系統

# Abstract

This paper is a presentation of the preliminary process of the exoskeleton free form design and fabrication. Today, the digital technology applied in the architecture field is everywhere. However, there are still lots free form architecture uncompleted and remained on the paper architecture or only the digital visual simulated model.

Until now, most of the finished free form cases are constructed of the surface and frame. The complete exoskeleton free form cases which are consisted of components are fewer and the process remains untold. Based on parametric environments, how might you design a component of exoskeletons' free form? How could you fabricate a exoskeletons' free form?

This paper is trying to analysis and discusses the composition of exoskeleton structure and material application theorem. Such analysis will be divided into two steps. First, explore the composition of the exoskeleton structure and material application theorem by case study; therefore establish a prototype of the exoskeleton free form by parametric design and physical fabrication. Second, integrate preliminary process of the exoskeleton free form design and fabrication.

Keyword : exoskeleton, component, digital fabrication, parametric system.

# 目錄

|                    |          |
|--------------------|----------|
| 中文摘要               | I        |
| 英文摘要               | II       |
| 目錄                 | III      |
| 圖表目錄               | V        |
| <b>第一章 緒論</b>      | <b>1</b> |
| 1.1. 研究背景          | 1        |
| 1.2. 研究問題與目標       | 2        |
| 1.3. 研究方法與步驟       | 3        |
| <b>第二章 文獻回顧</b>    | <b>7</b> |
| 2.1 自由形體與媒材的發展     | 7        |
| 2.1.1 設計媒材發展       | 7        |
| 2.1.2 自由形體的發展      | 8        |
| 2.2 自由形體在建築設計的技術   | 9        |
| 2.2.1 CAD/CAM 技術發展 | 9        |
| 2.2.2 自由形體之設計與建造流程 | 10       |
| 2.3 自由形體在建築設計的案例   | 11       |
| 2.3.1 案例選擇         | 11       |
| 2.3.2 案例分析         | 12       |
| 2.3.2 分析結論         | 18       |

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| <b>第三章 單元設計與研究</b> | <b>19</b> |
| 3.1 材料分析與檢討        | 20        |
| 3.1.1 材料性質分析       | 20        |
| 3.1.2 木材性質分析       | 22        |
| 3.2 單元構件設計         | 23        |
| 3.2.1 單元構件設計限制與原則  | 23        |
| 3.2.2 單元構件設計概念     | 24        |
| 3.2.3 單元構件形體設計     | 24        |
| 3.3 單元構件表面層與結構層分析  | 29        |
| 3.3.1 單元構件量測分析方法   | 29        |
| 3.3.2 單元構件形態量測分析   | 30        |
| 3.4 參數化系統建置        | 36        |
| 3.5 討論             | 43        |
| <b>第四章 數位設計建造</b>  | <b>44</b> |
| 4.1 自由形體單元化分割      | 45        |
| 4.2 自由形體單元構件製作     | 52        |
| 4.2.1 表面層數據分析      | 52        |
| 4.2.2 單元構件形體生成與攤平  | 56        |
| 4.3 實體生產與組裝        | 59        |
| 4.4 討論             | 63        |
| <b>第五章 結論</b>      | <b>65</b> |
| 5.1 研究結論           | 65        |
| 5.2 研究貢獻           | 66        |
| 5.3 研究限制與未來研究      | 67        |
| <b>參考文獻</b>        | <b>69</b> |

## 圖表目錄

### 圖目錄：

|  |    |
|--|----|
| 圖 1-1 方法與步驟.....   | 4  |
| 圖 2-1 Dragon Skin Pavilion ( 2012 ) .....                    | 13 |
| 圖 2-2 構成概念.....  | 13 |
| 圖 2-3 數位編號.....  | 13 |
| 圖 2-4 模具與彎曲程度定義.....   | 13 |
| 圖 2-5 單元構件組裝過程.....  | 13 |
| 圖 2-6 Enneper ( 2011 ) .....                                 | 14 |
| 圖 2-7 Enneper ( 2012 ) .....                                 | 14 |
| 圖 2-8 細部施工圖.....   | 15 |
| 圖 2-9 單元構件組裝過程.....  | 15 |
| 圖 2-10 Teagloo ( 2012 ) .....                                | 16 |
| 圖 2-11 單元構件及組構原型.....  | 16 |
| 圖 2-12 木板材局部彎曲概念.....  | 16 |
| 圖 2-13 CNC 製程切割.....   | 16 |
| 圖 2-14 New Prosthesis: Bent Wood Exoskeletons ( 2011 ) ..... | 17 |
| 圖 2-15 個別單元構件攤平及組板過程.....                                    | 17 |
| 圖 2-16 CNC 製程切割.....   | 17 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 圖 2-17 各別單元構件組立.....               | 17 |
| 圖 3-1 自由形體數位設計與建造流程.....           | 19 |
| 圖 3-2 骨架與皮層之組構概念.....              | 20 |
| 圖 3-3 外骨骼構造之組構概念.....              | 20 |
| 圖 3-4 自由形體構成之曲度曲線.....             | 24 |
| 圖 3-5 原始板材尺寸及紋路彎曲方式.....           | 24 |
| 圖 3-6 實體曲線量測說明.....                | 30 |
| 圖 3-7 實體量測輔助網格.....                | 30 |
| 圖 3-8 上弦主單元構件之量測構件.....            | 31 |
| 圖 3-9 上弦主單元構件之量測紀錄.....            | 32 |
| 圖 3-10 上弦主單元構件皮層與骨架數據.....         | 32 |
| 圖 3-11 下弦主單元構件之量測構件.....           | 33 |
| 圖 3-12 下弦主單元構件之量測紀錄.....           | 33 |
| 圖 3-13 下弦主單元構件皮層與骨架數據.....         | 33 |
| 圖 3-14 上弦次單元構件之量測紀錄.....           | 34 |
| 圖 3-15 上弦次單元構件皮層與骨架數據.....         | 34 |
| 圖 3-16 下弦次單元構件之量測紀錄.....           | 36 |
| 圖 3-17 下弦次單元構件皮層與骨架數據.....         | 36 |
| 圖 4-1 預設外骨骼系統之自由形體初步設計與製造流程.....   | 45 |
| 圖 4-2 外骨骼構造之初步自由形體數位設計與製造流程.....   | 64 |
| 圖 5-1 單元構件設計步驟與初步自由形體數位設計製造流程..... | 65 |

## 表目錄：

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 表 3-1 材料於材料性、施作性及經濟性之比較.....     | 21 |
| 表 3-2 木材種類、性質與價格分析.....          | 22 |
| 表 3-3 多向度彎曲單元構件設計過程.....         | 25 |
| 表 3-4 單向度彎曲單元構件設計過程.....         | 26 |
| 表 3-5 上弦主單元構件之量測數據.....          | 31 |
| 表 3-6 下弦主單元構件之量測數據.....          | 32 |
| 表 3-7 上弦次單元構件之量測數據.....          | 34 |
| 表 3-8 下弦次單元構件之量測數據.....          | 35 |
| 表 3-9 水平直線單元構件之參數化系統建置過程.....    | 36 |
| 表 3-10 上弦主單元構件之參數化系統建置過程.....    | 37 |
| 表 3-11 下弦主單元構件之參數化系統建置過程.....    | 40 |
| 表 4-1 類圓拱形體之單元化分割流程.....         | 45 |
| 表 4-2 多向度自由形體之單元化分割流程.....       | 48 |
| 表 4-3 主架構皮層部位數據之定義與分析.....       | 53 |
| 表 4-4 上側次架構皮層部位數據之定義與分析.....     | 54 |
| 表 4-5 下側次架構皮層部位數據之定義與分析.....     | 55 |
| 表 4-6 單元構件導入參數化系統並進行攤平作業之流程..... | 56 |
| 表 4-7 實體生產與組裝流程.....             | 60 |

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

建築之生成源自於人類需求，人類為生存於大自然中，建築成為人類生存所必需。而建築隨著人類演進的軌跡，其功能從居住到生產，從保護到拓展，從遮風避雨到儲存展示，人類對建築的要求不再只著眼於實用性，進而要求其藝術性，於是建築設計之美油然而生。也因為人類對美的無限想像，使建築的設計具有無限可能性。

對於傳統垂直水平之自由形體建築而言，建築師自設計至建造之過程需耗費大量的時間、人力及物力，而使其實踐之可行性大幅降低；即自由形體建築於設計與建造上，欠缺經濟性、時效性或實效性，如圓錐式或水滴形屋頂的設計與建造，需耗費相對大量的設計時間、建造成本與實行人力，使自由形體的建築發展停滯不前，從而，建築設計之無限可能性受限於建築技術發展不足。

1960 年代初期，興起電腦輔助設計 ( CAD ) 的風潮，進而發展出相關的設計理論與實作 ( Mitchell, 1977 )；電腦輔助設計與電腦輔助製造 ( CAM ) 降低了傳統建築技術所需耗費的時間、人力及物力，並於提升效率的同時亦提高了設計與建造的精準度 ( Lin, 1999 )，讓自由形體設計與建造之實踐性大為提高，於此情形下，CAD /CAM 技術成為建築生產與建築設計不可或缺的技术。

1992 年 Frank Gehry 以 CAD /CAM 技術解放了建築設計與建造之侷限性，於自由形體的設計與建造上，將形體分為皮層與骨架之製作方式而製訂出一套程序，使設計者對於創造與設計出之形體更加自由豐富 ( Kolarevic, 2003 )。現今於皮層之製作上，常用的方式如電腦數值控制製造曲面單元 ( CNC )、三角化攤平 ( Welch, 1994 ; Turkiyyah, 1997 ; Lee, 2005 ) 及平面化四邊網格 ( Glymph, 2004 ; Schelden, 2003 ; Schmiedhofer, 2008 ) 等方法；而於骨架製作上，常用的方式如 3D 骨架建構及卡接進行 2D 圖面製作等方法。

CAD/CAM 技術於建築領域大量被應用，2000 年後，許多學者開始尋找標準化之設計與建造流程，其中林楚卿於 2006 年以李元榮之研討歸納為基礎，提出一個完整的 CAD/CAM 數位設計及建造流程，其中定義了五個設計與製作階段，分別為「建築計畫」、「概念發展」、「設計發展」、「細部設計與施工圖」及「數位建構」( Mitchell, 1998 ; Lindsey, 2001 ; Kocaturk, 2001 ; Kolarevic, 2003 ; Lee, 2005 ; Lim, 2007 )。

就現行自由形體數位設計與製作流程之設計發展階段而言，骨架與皮層之組構方式，使自由形體外殼承載大量的結構力，內部空間無需額外支撐，並具自由塑形之可行性 ( Sheldon,2003; Lee,2005 ;Griffith and Kenfield,2005 )。但此種建構方式於自由形體施作上，骨架與皮層間易產生大量之誤差值，更增加了自由形體外殼的厚度，而為使形體表面達到光滑平順的目的，無論採取 CNC 製造曲面單元、三角化及攤平或平面化四角面等方法，所切割出之各個皮層及骨架單元俱難以一致。

近年來，於自由形體之數位設計與製作上，為減低骨架與皮層間所產生大量之誤差值，出現了皮層即是骨架之「外骨骼」( Exoskeleton ) 構造，此種構築方式係藉由模矩化之單元構件組構自由形體，減低自由形體外殼的厚度，同時於達成形體表面光滑平順之目的下，解決皮層與骨架單元形態不一致之問題。Exoskeleton 一詞源自於「生物學」之節肢動物外殼，外骨骼兼具皮層與骨架作用，除了具結構上之自體承載能力外，亦能保護內部構造 ( S. Bengtson, 2004 )，故本文進而將「外骨骼」定義為形體皮層即是骨架之構造。

## 1.2 研究問題與目標

本研究著重於皮層即是骨架之「外骨骼」構造上，研究問題之可論述分為三部分，分別為外骨骼構造之單元構件設計方法與步驟、外骨骼構造之自由形體設計與製造流程及其於設計與製造上之數位媒材應用：

### 1. 外骨骼構造之單元構件設計方法與步驟：

由外骨骼構造之定義可知，其構築方式係以皮層即是骨架之概念，藉由模矩化之單元構件組構曲面自由形體。而現今建築領域上，缺乏模矩化單元

構件建構曲面自由形體之案例，更遑論以材料本質起始，探討兼顧時效性、經濟性與施作性之單元構件案例，故如何以材料本質起始，建構外骨骼構造之單元構件設計方法與步驟？即為值得深入探討的問題。

## 2. 外骨骼構造之自由形體設計與製造流程

現有 CAD/CAM 自由形體設計與製作流程已廣泛為設計者所利用，但以外骨骼構造為概念，採用單元構件建構自由形體之案例多數為實驗階段物件，其所施作之自由形體製造流程亦不成熟；而以完成之外骨骼構造案例，其施作流程為不透明之黑箱作業，隱含了許多未知的方法與步驟，故如何建構外骨骼構造之自由形體製造流程？確為值得深入探討的問題。

## 3. 數位媒材應用

由現行自由形體設計與施作流程可知，其於皮層及骨架單元之製作上，以 CAD/CAM 技術將自由形體進行幾何形體分割，進而於數位軟體中攤平並輸出為實體，過程中數位軟體操作繁複，以致輸出時產生無法預期之誤差，而反觀外骨骼構造之自由形體設計與製造流程，應如何以參數化方式建構自由形體，以減少軟體操作繁雜之問題？亦為值得深入探討的問題。

本研究目標係藉由參數式技術以外骨骼構造建構單元構件原型，實際操作自由形體之參數式設計與實體化建造，於現有流程之基礎下，提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

### 1.3 研究方法與步驟

本研究於文獻回顧中先行歸納現有自由形體與媒材之發展，其中包含媒材與自由形體演繹至今之歷史，及其於建築設計之發展，進而探討電腦輔助設計與電腦輔助製造技術的發展，與其於自由形體之設計與建造流程，以瞭解現行流程之原理與步驟。再者，則藉由外骨骼構造之案例分析中，理解其設計與製作過程，及其如何將設計之概念發展落實於實體物件之施作上。

基於本研究問題與目標，於外骨骼構造之案例選擇上需具備下列四項原則：分別

為由探討材料性質出發尋求其施作性、近三年內涉及數位媒材應用之自由形體設計與建造、有限時間內完成及有限經費下完成。

本研究係藉由案例分析中探討現行案例之「目的與規模尺度」、「材料應用與形體組構」、「數位媒材應用」及「實體建造」等議題，並將其外骨骼構造之構成方式與材料應用原理進行整合以歸納出結論，以外骨骼構造之自由形體建構方式，於操作單元之參數化設計與實體化製造中，提出單元構件原型，進而發展外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

如上所述，可知本研究著重探討外骨骼構造之單元構件設計與自由形體製造流程，藉由沿用現有自由形體設計流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，可發展出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。而本文數位製造方法可分為二個階段：階段一為依單元構件之概念建立外骨骼構造之原型，並建置參數化系統；階段二即進而提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程（圖 1-1）。

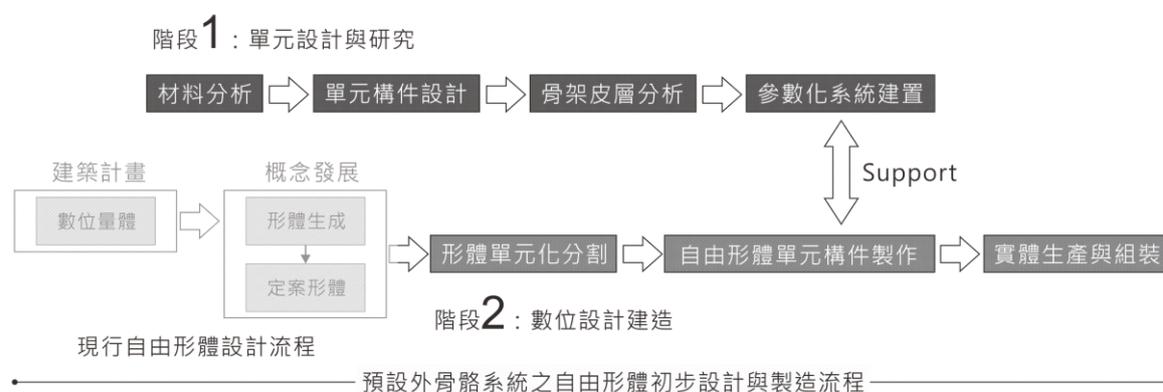


圖 1-1 方法與步驟

### 階段一：單元設計與研究（見第三章單元設計與研究）

此階段係藉由外骨骼構造案例中之自由形體單元構件設計概念與材料應用上之關係，進而提出外骨骼構造之新單元構件構成原型，而其設計與研究之方法，可分為五個步驟，依序為：材料分析與檢討、單元構件設計、單元構件表面層與結構層分析、參數化系統建置與討論，步驟詳述如下：

1. 材料分析與檢討：

本步驟將先行列舉自由形體硬殼式結構之材料應用，進而分析自由形體之材料性、施作性與經濟性，依據分析之結果定義新單元構件使用之材料；並進一步探究材料於現行市場上形態之種類、性質、尺寸與價格，以最佳適用性之單元構件進行設計與研究。

2. 單元構件設計：

單元構件設計為符合材料性、經濟性與施作性之條件下，本步驟先行制訂單元構件設計之限制與原則，並以此為依據，由原始施作材料端與自由形體端衍伸設計概念，進一步測試單元構件對應材料性質之發展可能性，加以反覆研討個體單元構件與其組裝後自由形體之構成方式，以完成新單元構件之設計。

3. 單元構件表面層與結構層分析：

物件量測分析之方式影響單元構件由實體模型轉換至數位模型之準確性，故本步驟依據上述步驟新單元構件之設計，先行制訂其量測與分析方式，並於新單元構件組構自由形體上，分析其個別形體變化上，單元構件之表面層與結構層之構成關係，並採取量化之方式，取得表面層與結構層構成上之相關量測數值。

4. 參數化系統建置：

藉由單元構件骨架與皮層分析之結果，將新單元構件形態以 Rhinocero 電腦軟體建置 3D 模型，並將單元構件於形態量測分析下之表面層與結構層相關數據，以 Grasshopper 電腦軟體輔助建構參數化系統模型，利於後續建立 CAD/CAM 技術下外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程研究使用。

步驟 5 討論：

在此步驟主要探討單元構件設計與研究中，經「材料分析檢討」、「單元構件設計」、「表面層與結構層分析」及「參數化系統建置」下，歸納整理實體模型與數位參數化模型建構過程所面臨之問題與限制。

## 階段二：數位設計建造（見第四章數位設計建造）

本階段係以外骨架構造之單元構件原型定義自由形體施作流程，可預見於施作過程中有產生大量問題之可能，故以實體製作 1：1 模型之方式，將各階段施作過程加以記錄，由實踐面進一步檢討施作之可行性，並於沿用現有自由形體設計流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，進一步提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。步驟詳述如下：

### 1. 自由形體單元化分割

本研究著重探討外骨骼構造之自由形體製造流程，故於自由形體設計之論述將不加以探討，直接依單元構件形式選擇自由形體，並依循上階段新單元構件之設計作為施作準則，針對自由形體進行單元化分割，以取出自由形體經單元化分割後之單元構件數據。

### 2. 自由形體單元構件製作

本步驟係藉由分割後單元構件之數據，導入上階段參數化系統取得單元構件之構成形體，及其表面層與結構層之關係，進而以 Grasshopper 電腦軟體輔助下將單元構件形態攤平，以利實體輸出作業之施作。

### 3. 實體生產與組裝

將單元構件於數位化攤平之形體，放樣至實體施作材料上，採手工製成方式進行單元構件生產並組裝為自由形體。並透過實作過程所發現單元構件組構自由形體之優點與缺點，加以記錄與驗證外骨骼系統自由形體初步數位設計與製造過程之可行性。

### 4. 討論

本步驟係透過「自由形體單元化分割」、「自由形體單元構件製作」與「實體生產與組裝」過程，建構外骨骼構造之初步自由形體製造流程，並沿用現有自由形體設計與施作流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，以建立外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 自由形體與媒材的發展

#### 2.1.1 媒材的發展

由認知行為的觀點著眼，設計行為的運作，是一連串設計者與媒材互動的過程 (Schon, 1992)。設計源自想像，想像既無限，設計則亦無限，而媒材為輔助設計者實現想像的輔助工具，為設計者而生，同時也影響設計者的思維；創作者的想法藉由媒材呈現，然而設計者對不同的媒材會有不同的思維 (Zevi, 1981; 劉育東, 2006)。所以媒材雖然提供了設計者不同的創作可能性，卻也同時限制了設計者的創作可能性。

在設計歷史上，早在古埃及時期建築師就利用平面圖及立面圖來呈現建築物的立體形態，以平面式的工具建構三度空間的建築形體，當時的建築物主要遵循基本的幾何形式，所有建築立體的變化都可用平面式的工具加以處理；至歌德晚期文藝復興時代，為了建築形體日趨繁複的需求，而產生了新媒材 - 「實體模型」，此種新媒材一直沿用至今，仍可應付大部分的設計需求；甚於 1990 年後，實體模型更孕育了許多偉大的建築設計，如高地使用 Estereo Estatica 結構模型，而 Utzon 使用大型結構模型測試 (Million, 1994)。

隨著數位時代的來臨，電腦輔助設計與電腦輔助製造成為設計的新媒材，使設計媒材中多了能提供更為快速、即時、精確及大量計算的新選擇；電腦輔助設計與電腦輔助製造技術改善了建築設計與建造的流程、便利性、操作性與經濟性，賦予設計者全新的空間體驗；相較於圖面或實體模型等媒材而言，此種新媒材更能呼應設計者的想像思維，同時提供設計者較多的創作可能，並減少對設計者創作思維的限制。

### 2.1.2 自由形體的發展

在未進入數位時代以前，就曲面自由形體的建築設計而言，建築師就曲面自由形體的設計所使用的媒材主要為圖面與實體模型，藉由整合大量的平面圖、量體模型與結構模型作為曲面自由形體設計的輔助工具；在設計者與數種媒材的互動間，減少設計思維與建造施作間的差異，如 1900 年安東尼·高地於 Casa Milla, Colonia, Sagrada Familia 聖家堂大量運用各媒材，以輔助建築設計的過程與形成空間形式上的認知，即為著例；則在 1900 年至 2000 年間，雖未進入數位時代，但前立體式的思考已經開始浮現 ( 劉育東, 2006 )。

在此時期，就曲面自由形體的建築建造而言，建造工程施作者乃藉由手工雕塑的方式來補實際建築與實體模型間的差異；而建材大多選擇混凝土、磚造或是泥作予以施作，就許多無法在設計階描述的細節與問題，在現場施作時直接以手工進行處理，如 Le Corbusier 的廊香教堂、1924 年 Erich Mendelsohn 設計的愛因斯坦天文臺及 Rudolf Steiner 1928s 的人類哲學院，即為著例；而此種透過數個表示量體大小關係的模型與關鍵標準圖作為參考，並利用標準化的概念及參數化的圖面來呈現設計，再由施工者補足細節之過程，即為參數化設計的濫觴 ( Steiner, 2003 ; Liu, 2001 ; Lim, 2007 )。

在進入數位時代以後，在電腦輔助設計與電腦輔助製造技術的輔助下，媒材的形態由實體模型到數位模型，其間除耗費時間、人力及物力外之最大差異在於設計者透過數位模型提升控制力、自由度與空間感知力，包括可預視性、可調整性、模擬性、變化性與衍生性；而設計者在藉由 CAD/CAM 技術的協助之下，有效的實現其創作思維，進而予以呈現，甚而加以變動，使得設計者與媒材間的對話突破傳統媒材的侷限而擁有較為活絡的溝通與互動。

CAD/CAM 技術在建築領域的成就，主要在於改善了建築的設計過程，不再只利用平面圖說和手工製作的實體模型來呈現設計的創作思維；電腦輔助設計與電腦輔助製造在當代建築設計上扮演著重要的角色，建築設計者與建造者都需要倚靠 CAD/CAM 技術的輔助來完成其設計及建造 ( Kolarevic, 2001 ; Mitchell, 2004 ; Liu, 2001 ; Lee, 2005 ; Lim, 2007 )，「數位建築」乃由此而生；近年來，在 CAD/CAM

技術的輔助下，建築師得以更為自由的塑造自由形體，進而帶動了新的建造方式、結構系統、細部接頭和表皮材料。

## 2.2 自由形體在建築設計的技術

### 2.2.1 CAD/CAM 技術發展

1950 年美國軍方發展出 sage 系統使雷達上的資訊圖像化，此為電子計算機最早的繪圖系統，其電腦繪圖系統是呈現數值計算的結果，即函數運算及彈道模擬出的圖形。此時電腦繪圖為單純的製圖，而尚未具有媒體的性質。

70 年代以後，由於航太工業發展的需求，以傳統的平面繪圖工具製作曲面自由形體有其困難，故轉而以電腦繪圖工具呈現曲面自由形體於三度空間上的具體形態，因而發展出數位建模系統，如 Mesh、貝茲曲線、CAD 及參數化實體建模技術等。此時電腦輔助工程分析 ( CAE ) 技術開始蓬勃發展，廣的被運用於機械、電子、航空、航太及建築等領域。

在建築領域中，電腦輔助設計與電腦輔助製造技術使建築的設計與建造過程產生了革命性的改變。而在設計面，電腦輔助設計最大的效應在於解放建築師的創作思維，而在建造面，電腦輔助製造則是徹底的革新的曲面自由形體建築的建造方式。早期電腦輔助製造技術主要以電腦數值控制為主，此為一種減去法的數位生產製作方式，如 3D 銑床、水刀切割、雷射切割及打槽機技術等。

80 年代中期以後，隨著個人電腦的普及化，建築師廣泛的使用電腦輔助設計後，亦陸續開發出配合個人電腦的小型電腦輔助製造軟體，使得電腦輔助製造不再只能在工作站上運行 ( Groover and Zimmers, 1984 ; Mitchell and McCullough, 1995 ; Ryder et al, 2002 )，如 RP 快速成形 ( Rapid Prototyping )，此為疊層加工技術，是附加的製造方式，又稱為立體印刷術，及 3D scanner，此為一種逆向工程的技術，乃將實體模型轉為數位資料，再將其輸入電腦輔助設計系統中 ( Luca and Nardin, 2002 ; Seely, 2004 ; Friedman, 2002 )。

## 2.2.2 自由形體之設計與建造流程

CAD/CAM 技術於建築領域方興未艾，尤其於曲面自由形體建築的設計與建造，此原因在於，傳統幾何形體建築的設計與建造於未發展出 CAD/CAM 技術的數位媒材前，設計者與建造者憑藉原有媒材，即能有效的完成傳統幾何形體建築，但曲面自由形體建築的設計與建造於未發展出 CAD/CAM 技術的數位媒材前，自由形體建築的設計與建造的高度困難常使其設計者與建造者裹足不前。而現有 CAD/CAM 技術於曲面自由形體之設計與建造的結構與流程，依其方法不同而有不同的結構與流程，其方法概為薄殼構造 ( Shell ) 與硬殼式構造 ( Monocoque construction )，謹略述如後。

### 1. 薄殼構造 ( Shell ):

薄殼結構係以薄膜狀殼物作成曲面，為形抗結構，即除利用其立體勁性承受自重外，並能抵抗外力與載重之構造形式。薄殼系統應用於曲面自由形體所採用的材料為鋼筋混凝土，以鋼筋配筋作為拉材料，再搭模版澆製塑形 ( Sapaun, 2005 )，因此構造關鍵在於模版的組立及放樣。早期薄殼結構及應用於曲面自由形體建築的發展，如東海大學路斯義教堂、1957 年 John Utzon 設計的雪梨歌劇院等；而進年來薄殼結構的構造方式廣泛使用鋼絲網噴混凝土免拆模版工法以利製造，如伊東豐雄於 2006 年設計的臺中歌劇院，其施作方式係由竹中工務所所提出，採用桁架鋼筋混凝土牆，以鋼筋作為桁架並組裝成底架，再用三層金屬網做成免拆模版，再用高流動性混凝土澆灌成為一體。

### 2. 硬殼式構造的表皮與骨架 ( Monocoque construction )

曲面自由形體達的意象是非線性而均勻的連續形態 ( Lynn, 1995 )，這種狀態也意味者形體的複雜性，曲面自由形體表面往往具有無規則的曲率，這對於施工流程從放樣、計算到組合等，均帶來了莫大的困難度，但為了施作的可執行性，將曲面自由形體分割為正交的骨架，再使用覆皮的方法將表皮圍合，此種方法是採體硬殼式構造 ( Monocoque construction ) 的概念。Monocoque 一詞來自希臘文的單 ( Mono ) 與法文的殼 ( coque )，是指構造體作為外圍皮層的結構荷載，而非透過內部的構架體或桁架；此種方式是航空工業中製造飛行器的構造方式，乃將形體分割為交錯的骨架系統，再使

用表皮包覆骨架形成完整的外型，同時使組構的外殼承受大部分的結構力，使內部空間不需要予以支撐，即由骨架作為結構的主角，所有的載重皆過骨架傳遞，而面材基本上除了本身自重外，不需傳遞其他荷重，並且可以自由塑形，故而近來曲面自由形體建築的建構，乃大量引用此種利用規則的骨架加上外覆的表皮加以塑形的構造方式 ( Sheldon, 2003 ; Lee, 2005 ; Griffith, 2005 ) ; 而骨架與外覆表皮兩者間互為脫開的關係，與薄殼結構在結構上有明顯的差異。

## 2.3 自由形體在建築設計的案例

### 2.3.1 案例選擇

基於本研究問題與目標，於外骨骼構造之案例選擇上需具備下列四項原則：( 1 ) 以探討材料性質出發尋求其施作性之案例；( 2 ) 近三年內且涉及數位媒材應用之自由形體設計與建造案例；( 3 ) 有限時間內完成之案例；( 4 ) 有限經費下完成之案例。而符合上述條件原則之案例如下：

1. Emmi Keskiarja , Pekka Tynkkynen & LEAD / Dragon Skin Pavilion
2. June-Hao Hou / Enneper Loop
3. NCTU MS / Teagloo
4. Joel Letkemann / New Prosthesis: Bent Wood Exoskeletons

上述案例係集結國內、外之自由形體實體作品，皆有材料特質、有限之時間與經費下完成、應用數位化輔助設計與製造等議題，具深入研究且有所成果發表之案例。有鑑於既有大尺度之實體建築案例，皆採用骨架單元與皮層單元分別獨立設計製造並組構為自由形體，而單元以皮層即骨架方式組構自由形體之大尺度建築案例實足不多，故於案例之選擇上，則以實驗性較高之空間展覽作品為主，並突顯案例於限定時間與經費下完成之特質。

本研究目標係「藉由參數式技術以外骨骼構造之方式建構單元構件原型，並提出

外骨骼構造之自由形體初步設計與製作流程」，其中之關鍵於自由形體單元構件組構之方式與材料應用之原理，故案例之分析方式，非採用自由形體數位設計與製造流程-建築計畫、概念發展、設計發展、細部設計與施工圖、數位建構 ( Lim, 2007 )；而是進一步分析案例之「目的與規模尺度」、「材料應用與形體組構」、「數位媒材應用」、「實體建造」四種層面，並整合歸納其於四種層面上應用手法與原理。

### 2.3.2 案例分析

#### 案例一：Dragon Skin Pavilion

##### 1. 目的與規模尺度：

Dragon Skin Pavilion 係為 Emmi Keskisarja , Pekka Tynkkynen & LEAD 共同創作之作品，初始版本建立於 2011 年，從設計規劃至製作僅耗費 8 個工作日，而後續為配合「2011-12 香港深圳城市/建築雙城雙年展」之展出，則重新探討材料之組構性與結構性並進而製作第二版本，而作品規模約為 400\*400\*450 立方公分 ( 圖 2-1 )。

##### 2. 形體組構與材料應用：

於形體組構上，採用外骨骼構造之方式，以數個形體大小相同之單元組構為自由形體 ( 圖 2-2 )，其間則先行制定單元構件之形體，並利用單元構件接頭卡榫之位置控制自由形體之形態；於材料使用上，採用木膠合夾板應用蒸汽加熱之方法使平板木材軟化，並置入預先組構之木製模具以定義其木板彎曲之程度。

##### 3. 數位媒材應用：

本案例數位媒材之應用於設計階段下，以電腦軟體建置個體單元構件並組構為自由形體；進而於製造階段下，精準計算單元構件間接合之角度與卡榫之位置，並進一步將個別單元構件攤平進行編號，以利實體輸出時使用 ( 圖 2-3 )。

##### 4. 實體建造：

整體自由形體之單元構件數量共為 163 片，建造上需藉由三階段製程：( 1 )

將相同大小之木板材以 CNC 製程切割其接頭卡榫之位置與深度 ; ( 2 ) 將切割完成之木板材進行蒸氣加熱 · 並採模具定義其彎曲程度 ( 圖 2-4 ); ( 3 ) 將個別單元構件依其編號進行組裝 ( 圖 2-5 )。



圖 2-1 Dragon Skin Pavilion ( 2012 )

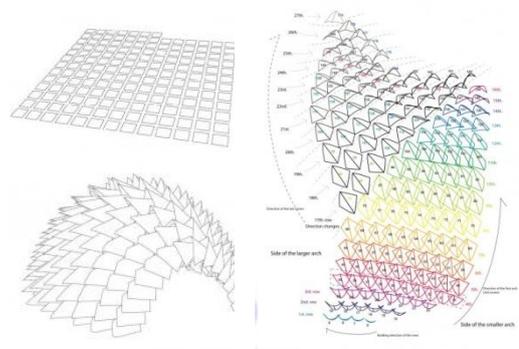


圖 2-2 構成概念

圖 2-3 數位編號



圖 2-4 模具與彎曲程度定義



圖 2-5 單元構件組裝過程

圖摘 <http://www.archdaily.com> ( 2012/03 )

## 案例二：Enneper Loop / Enneper

### 1. 目的與規模尺度：

Enneper Loop / Enneper 係為 June-Hao Hou 創作之作品 · 初始版本

建立於 2011 年之「未來『玩』城市-浮動的定居」，而後續為配合 2012 年「衍序建築展-後設數位時代的新維度」展出，重新測試不同之材料進而製作第二版本，而初始作品規模約為 150\*150\*150 立方公分 (圖 2-6)；第二版本作品規模為 50\*50\*50 立方公分 (圖 2-7)。



圖 2-6 Enneper ( 2011 )



圖 2-7 Enneper ( 2012 )

圖摘 <https://plus.google.com/photos/105757426192282099677> ( 2011/03 )

## 2. 形體組構與材料應用：

以既有之 Enneper's Minimal Surface 自由曲面，採用切片方式製作，故本案例之自由形體之構成關係為外骨骼構造之構成方式；而材料之應用上，初始版本則考量材質之重量採用密迪板 ( M.D.F. )，而第二版本則進而測試壓克力材質於自由形體製作上之可行性。

## 3. 數位媒材應用：

本案例數位媒材之應用於設計階段下，以既有曲面匯入電腦軟體 Rhinocero 切片為數個體形體大小不一之單元構件；進而於製造階段下，精準設計拼接組裝方式與調整形體切割線，並進一步將個別單元構件投影至 XY 平面組板及製作細部施工圖 (圖 2-8)，以利實體輸出時使用。

## 4. 實體建造：

整體自由形體之實體建造上需藉由三階段製程：( 1 ) 將單元構件組板後之形體進行雷射切割以取得個體單元構件；( 2 ) 將切割完成之單元構件依形體分割單元先行組裝 (圖 2-9)；( 3 ) 合併組裝個別形體分割單元並切除接合上多餘之螺栓。

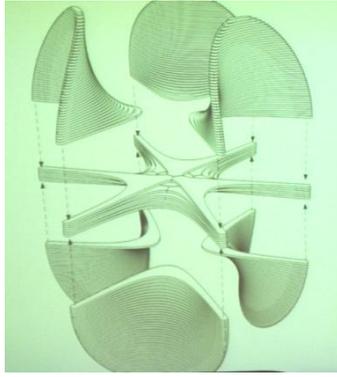


圖 2-8 細部施工圖



圖 2-9 單元構件組裝過程

圖摘 <https://plus.google.com/photos/105757426192282099677> ( 2011/03 )

### 案例三：Teagloo

#### 1. 目的與規模尺度：

Teagloo / 「茶·胞」係為交大數位組共同創作之作品，於 2012 年之「衍序建築展-後設數位時代的新維度」展出，作品規模約為 360\*400\*196 立方公分 ( 圖 2-10 )。

#### 2. 形體組構與材料應用：

於自由形體組構上，採用外骨骼構造之方式，以數個形體大小不一之六角桶單元構件組構為冰屋造型之結構體 ( 圖 2-11 )，其間先行設定自由形體形態，並於分割下生成單元構件，利用單元構件間接合構件之長度與位置組構自由形體之形態；於材料使用上，採用木膠合夾板應用切割溝槽之方式使木板材可於局部彎曲 ( 圖 2-12 )，並以木構卡榫方式拼接以生成個體單元構件。

#### 3. 數位媒材應用：

本案例數位媒材之應用於設計階段下，配合使用電腦軟體 Rhinocero 及 Grasshopper 建構冰屋造型自由形體，並以形體進行分割以取得大小不一之單元構件；而於製造階段下，精準設計單元構件間接合構件之長度與位置，並進一步將個別單元構件攤平及組板，以利實體輸出時使用。

#### 4. 實體建造：

整體自由形體之實體建造上需藉由四階段製程：( 1 ) 將單元構件組板後

之形體進行 CNC 製程切割以取得其構成元件 ( 圖 2-13 ); ( 2 ) 將構件之構成原件組立為個體單元構件 ; ( 3 ) 針對冰屋造型自由形體底部進行組構單元構件 ; ( 4 ) 預先組構冰屋造型自由形體頂部之單元構件 , 待其底部完成後將其二者組合。



圖 2-10 Teagloo ( 2012 )

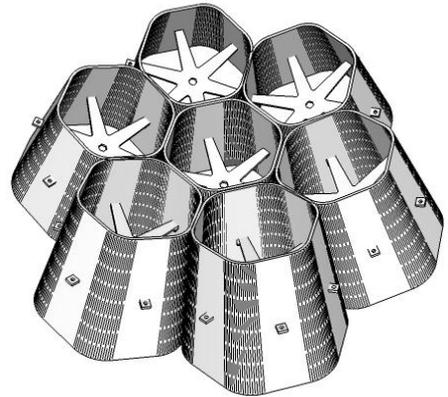


圖 2-11 單元構件及組構原型



圖 2-12 木板材局部彎曲概念

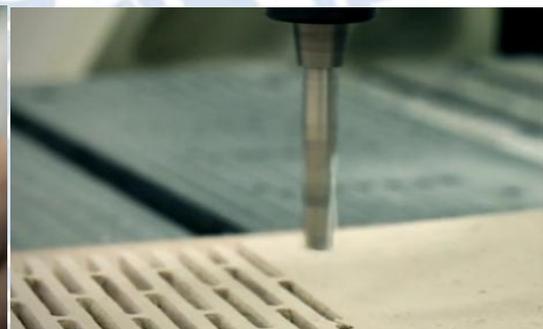


圖 2-13 CNC 製程切割

圖摘 <http://procedural-architecture.net/> ( 2012/05 )

#### 案例四：New Prosthesis: Bent Wood Exoskeletons

##### 1. 目的與規模尺度：

New Prosthesis: Bent Wood Exoskeletons 係為 Joel Letkeman 創作之作品，於 2011 年之「ZeZeZe Architecture Gallery」展出，作品規模約為 400\*500\*450 立方公分 ( 圖 2-10 )。

##### 2. 形體組構與材料應用：

於自由形體組構上，採用外骨骼構造之方式，以數個形體大小不一之單

元構件組構為仿生之結構體 (圖 2-14)，其間先行設定單元構件形態並尋求其形態之可組構方式，並利用其形體與單元構件間接合部之位置組構自由形體之形態；於材料使用上，採用厚度 3mm 輕薄木板自體彎曲之材料特性，並以木構卡榫方式拼接以生成個體單元構件。

### 3. 數位媒材應用：

本案例數位媒材之應用於設計階段下，配合使用電腦軟體 Rhinocero 及 Grasshopper 建構單元構件形體，並測試其組構之方式及單元構件間之相對位置；而於製造階段下，由單元構件組構之方式取得其接合部位之位置，並進一步將個別單元構件攤平及組板 (圖 2-15)，以利實體輸出時使用。

### 4. 實體建造：

整體自由形體之實體建造上需藉由三階段製程：(1) 將單元構件組板後之形體進行 CNC 製程切割以取得其構成元件 (圖 2-16)；(2) 將構件之構成原件組立為各別單元構件 (圖 2-17)；(3) 將個別單元構件依其相對位置進行組裝。



圖 2-14 New Prosthesis: Bent Wood Exoskeletons (2011)

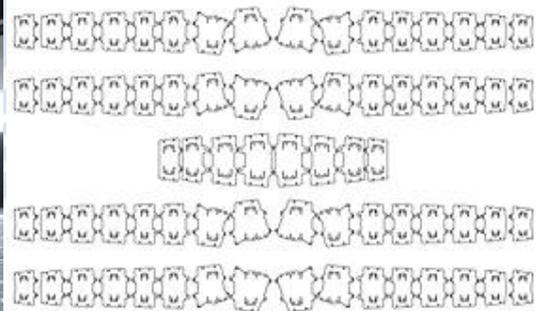


圖 2-15 個別單元構件攤平及組板過程



圖 2-16 CNC 製程切割



圖 2-17 各別單元構件組立

圖摘 <http://www.joelletkemann.com/> (2011/04)

### 2.3.2 分析結論

上述案例國內、外之自由形體實體作品之分析後，可知其於「目的與規模尺度」、「材料應用與形體組構」、「數位媒材應用」、「實體建造」四種層面上之應用手法與原理皆有所不同，為有效達成本研究目標「以外骨骼構造建構單元構件原型，進而提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程」，本章節將進一步針對四種層面歸納分析結論，如下所述：

#### 1. 目的與規模尺度：

本研究於案例之選擇上，以空間展覽作品為主，但藉由四個案例可知其於時程與經費限制下之作品，空間尺度最大可達 400\*500\*450 立方公分，等同於一棟一層樓之建築物，故以單元構件構成自由形體之物件尺度，亦可達現行自由形體設計與建造流程下之物件尺度。

#### 2. 形體組構與材料應用：

於形體組構上，此四個案例已跳脫現有自由形體皮層與骨架分別製造之限制，皆以材料性為考量，採用外骨骼構造之構成關係，進而以單元構件構成自由形體；而於材料之應用下，此四個案例皆探討材料之特性，並由材料特性中取得可應用於設計與製作之手法或概念，進而延伸設計單元構件形體，於時程與經費限制下完成作品。

#### 3. 數位媒材應用：

四個案例皆對數位媒材有所應用，於設計階段中，多數以數位媒材進行自由形體與單元構件之建置，進而研討組構上單元構件之構成方式與接點之相對位置，而於製造階段中，數位媒材則協助自由形體之單元構件進行攤平及組板作業。

#### 4. 實體建造：

以單元構件構成自由形體之實體建造上，初步可歸納出三階段製程：( 1 ) 將單元構件組板後之形體進行 CAM 技術實體切割以取得其構成元件；( 2 ) 將構件之構成原件組立為各別單元構件；( 3 ) 將個別單元構件依其相對位置進行組裝。

## 第三章 單元設計與研究

電腦輔助建築以數位化生產技術呈現，其 CAD/CAM 製程技術提升建築生產建造之效率，有效減短建築設計耗費之時間，節省工程建造之費用。2007 年林楚卿基於李元榮( 2005 )之自由形體設計與施作流程研究，同時整併數個國內外實際案例，進一步歸納出 CAD/CAM 技術於自由形體中之結構系統、材料、細部及接點等因子，提出標準化之數位設計與建造過程( 圖 3-1 )。

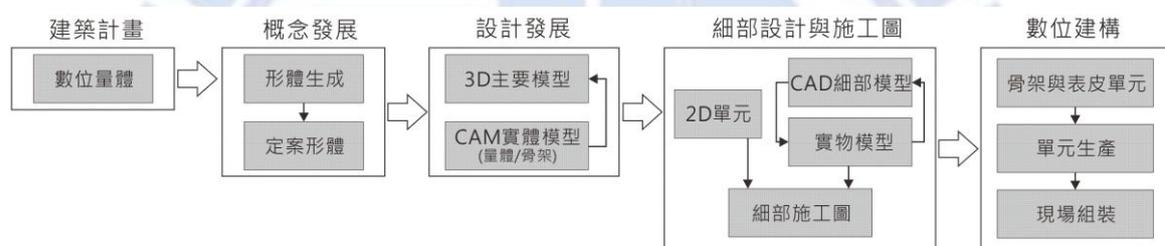


圖 3-1 自由形體數位設計與建造流程 ( Lim, 2007 )

但就現行自由形體數位設計與製作流程而言，骨架與皮層間易產生大量之誤差值，更增加了自由形體外殼的厚度，而為使形體表面達到光滑平順的目的，無論採取 CNC 製造曲面單元、三角化及攤平或平面化四角面等方法，所切割出之各個皮層及骨架單元俱難以一致。而隨 CAD/CAM 技術流程發展至今，設計發展階段之實體模型於骨架與皮層單元構成上可分為二種組構概念，其一為骨架與皮層單元被視為分別單獨之個體；另一為外骨骼構造，敘述如下：

### 1. 骨架與皮層單元：

概念上將實體模型拆解為骨架單元與皮層單元，於 3D 電腦模型中，考量自由形體之結構性與材料性等因子分別進行製作，並將製作後成品進一步組構為 CAM 實體模型( 圖 3-2 )。

### 2. 外骨骼構造：

以骨架即是皮層之構成概念進行施作，於製作流程上，考量自由形體之

分割方式，依結構性與材料性等因子設計分割單元，並將製作後成品進一步組構為實體模型(圖 3-3)。可有效減低自由形體外殼的厚度，同時於達成形體表面光滑平順之目的下，解決皮層與骨架單元形態不一致之問題。

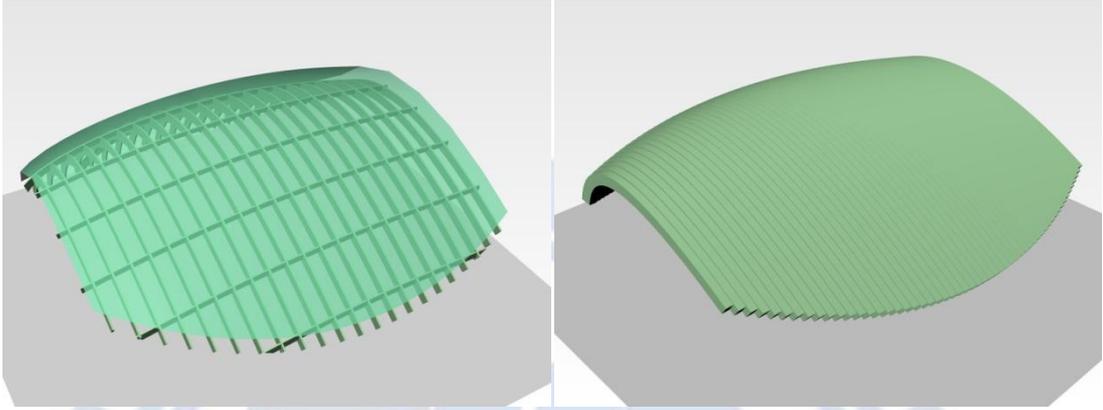


圖 3-2 骨架與皮層之組構概念

圖 3-3 外骨骼構造之組構概念

本研究著重探討外骨骼構造之單元構件設計與自由形體製造流程，藉由沿用現有自由形體設計流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，可發展出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。而本文數位製造方法可分為二個階段：階段一為依單元構件之概念建立外骨骼構造之原型，並建置參數化系統；階段二即進而提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

本章節專注於單元構件設計與研究流程。在 CAD/CAM 技術之輔助下，分析材料對於自由形體單元構件之材料性、施作性及經濟性之關係，由分析結果作為設計之依據，進行單元構件之設計、測試分析及提取單元之相關數據，並加入參數化系統設計之思維，將單元構件以數位化之方式建置，以利於建立單元構件對應自由形體之初步數位設計與建造流程使用，及降低細部設計至數位建構階段單元構件製造之時間。

## 3.1 材料分析與檢討

### 3.1.1 材料性質分析

自由形體硬殼式結構之材料應用，使用上可分為皮層材及骨架材兩個項目，普遍常見之皮層材種類有金屬、木材、玻璃及石材；骨架材之常見種類則以金屬及木材為

主。綜合自由形體於材料性、施作性及經濟性分析如下 (表 3-1)：

表 3-1 材料於材料性、施作性及經濟性之比較

| 項目 | 材料性  | 施作性   | 經濟性                     |
|----|--|---|-------------------------|
| 金屬 | 兼具剛性及彈性，並含金屬光澤且不透明，以延展性著稱適合皮層及骨架材使用。   | 皮層材多採用 CNC 雷射切割施作；而骨架材則採用 CNC 雷射切割或以三向度彎曲圓管以 CNC 滾彎機製作組合而成。材質剛性中等，施作期程中等。 | 材料價格高<br>施作費用中等。        |
| 石材 | 具高強度之剛性材料，但其材料之彈性弱不具延展性，如過度抵禦外力則易造成破損，適合於皮層材使用。                              | 採用 CNC 之打槽機技術製作，材質剛性高，施作期程長。  | 材料價格高<br>施作費用中等。        |
| 玻璃 | 具透明性之材料，但其剛性弱不具延展性，如過度抵禦外力則易造成破損碎裂，適合於皮層材使用。                                 | 採用 CNC 3D 銑床作不鏽鋼模，並利用鋼模製作個別玻璃單元，每一片玻璃須獨立開模，施作期程長。                         | 材料價格中等，施作費用高。           |
| 木材 | 材料彈性比金屬差，但優於石材與玻璃；而剛性雖優於玻璃，但比金屬與石材差，故多採用多層材（膠合板）方式使用，可分為木質板材（剛性），及可彎曲板材（彈性）。 | 採用 CNC 雷射切割或 CNC 之打槽機技術製作，材質剛性較弱，施作期程短。                                   | 材料價格低<br>及施作費用低，市場使用性高。 |

綜合上述討論，以單元材料性、施作性及經濟性為因子分析各材料於自由形體之應用，木材本質雖彈性於剛性較弱，但以多層材方式使用可加強彈性與剛性之缺失，

並由於材質在施工上之便利性、製作價格低廉及市場普及率高等因素，本研究單元構件材質採用木材加以施作，並進一步分析市場上木質板材及可彎曲板材之種類、性質與價格（表 3-2）。

### 3.1.2 木材性質分析

表 3-2 木材種類、性質與價格分析

| 種類    | 性質  | 尺寸與價格  |
|-------|---|--|
| 夾板    | 夾板亦稱為多層材（膠合板），由薄木材或木材單板，逐層對紋黏貼而成，分三夾板、五夾板等，特色為不易開裂，收縮，扭曲/翹曲。                      | 3尺*6尺*3mm約150元；<br>4尺*8尺*3mm約250元；<br>3尺*6尺*5mm約250元；<br>4尺*8尺*5mm約400元；<br>3尺*6尺*9mm約450元；<br>4尺*8尺*9mm約600元； |
| 木碎板   | 木碎板亦稱為壓縮板，於加拿大、澳洲等地，把松木鏢板材後餘下的木碎加上膠水，用高壓壓成木碎板。優點為比夾板便宜、更能善用天然木材，缺點為易因潮濕擴展和變色。     | 4尺*8尺*3mm約300元；<br>4尺*8尺*5mm約450元；<br>4尺*8尺*9mm約650元   |
| 高壓板   | 造夾板或木碎板製程產生大量木糠，將木糠加以膠合再加壓，便成高壓板（M.D.F.）。M.D.F.的優點為板材的邊緣光滑易於處理及彎曲，缺點是會因潮濕容易擴展和變色。 | 4尺*8尺*3mm約300元；<br>4尺*8尺*5mm約500元；<br>4尺*8尺*9mm約700元   |
| 纖維板   | 用各種植物，如草、竹、禾竿、麻、甘蔗等之纖維加膠再加壓製成，質感介乎木碎板和M.D.F.之間。                                   | 4尺*8尺*3mm約200元；<br>4尺*8尺*5mm約350元；<br>4尺*8尺*9mm約550元；  |
| 易可彎夾板 | 係為三夾板之延伸，外層兩側由薄木材採同方向紋路，並夾以軟木及膠合劑製造而成，板材可單向彎曲，並保有單向度之彈性。                          | 4尺*8尺*3mm約600元；<br>4尺*8尺*5mm約700元；<br>4尺*8尺*9mm約900元   |

綜合木材種類、性質、尺寸與價格分析如下：

1. 種類與材料性質：

上述夾板、木碎板、高壓版與纖維板之材料性質，皆係屬以剛性為主木質板材，可彎曲之彈性不大，如應用於自由形體構造上，僅能以大量之單元折面組構自由形體方式施作；而易可彎夾板具自體可彎曲之彈性，並具一定程度之剛性，故以此作為單元構件材料，相較之下，具有跳脫現有自由形體骨架與表皮構成之可能性，並符合本研究新構成原型之初衷。

2. 尺寸與價格：

尺寸與價格之選用上，以市場使用程度較高之 4 尺\*8 尺\*5mm 之易可彎夾板，而鑒於材料之自體可彎曲性質，於設計上可採用固定形體之單元構成自由形體，以節省相異之骨架與表皮單元構件於製作上之耗材，間接減低自由形體於數位建構階段之施作費用。

故本研究採用 4 尺\*8 尺\*5mm 之易可彎夾板，作為單元構件設計之材料。

## 3.2 單元構件設計

### 3.2.1 單元構件設計限制與原則

在上述材料性、施作性及經濟性分析下，選用木材作為主材料，並進一步以木材於種類、性質、尺寸與價格研究結果作為設計依據。本節主要論述單元構件之設計原理與構成，而於設計前先行提出單元構件需達成之原則，如下：

1. 單元構件之形體種類應盡可減少，以降低製作上原始板材額外之耗損。
2. 單元構件形體盡可以外骨骼構造之方式呈現。
3. 單元構件應盡可達成自體支承，加強工作性提高施作效率。
4. 構件組合中，應產生以最少之接合點。
5. 構件組合後，形體之外觀保持完整並趨近於光滑平順。
6. 構件組合後，自由形體可自體支承。

### 3.2.2 單元構件設計概念

基於單元構件形體及結構、構件組合中與構件組合後之原則，可歸納出二大設計概念，分別衍伸自自由形體設計發展端與原始施作材料端：

#### 1. 自由形體設計發展 (圖 3-4)：

形體上，自由形體之構成包含三種曲度曲線，分別為上弦、下弦及水平直線，故單元構件形體須呈現三種曲度曲線，而個別構件須具漸變調整之能力，以達成個體單元構件組裝時趨近於自由形體；結構上，由於易可彎板材性質具彈性回復力，故單元構件須針對三種曲度曲線設計支承結構，以達成自體支承之原則。

#### 2. 原始施作材料 (圖 3-5)：

易可彎夾板依相異紋路有二種彎曲方式之板材，分別為長向紋路往短向端彎曲及短向紋路往長向端彎曲，故構件須依板材紋路設計個別單元，而單元構件尺寸之制訂，則須為原始板材 4 尺\*8 尺可整除之尺寸，如 30、20、15、10 公分等，以達成減少製作上原始板材額外耗損之原則。

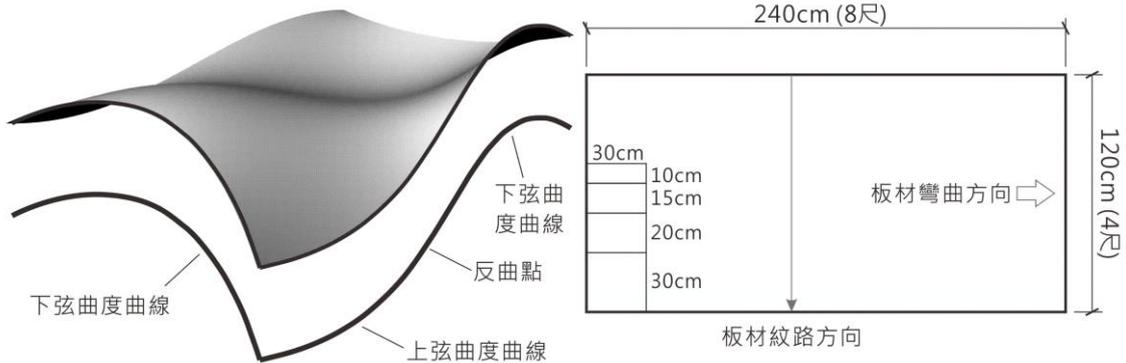


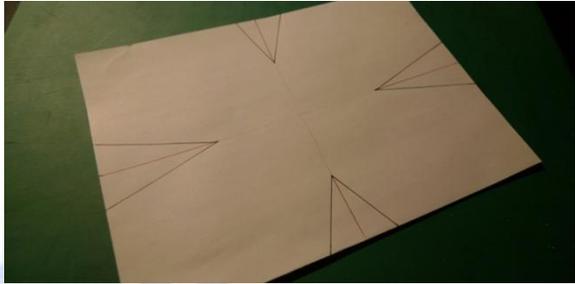
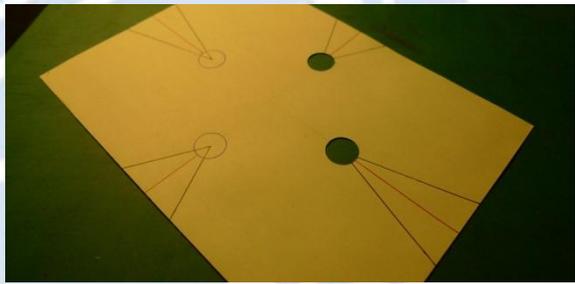
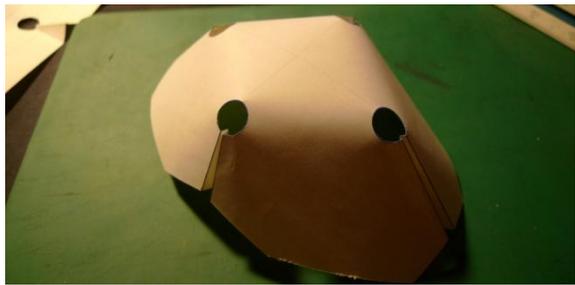
圖 3-4 自由形體構成之曲度曲線

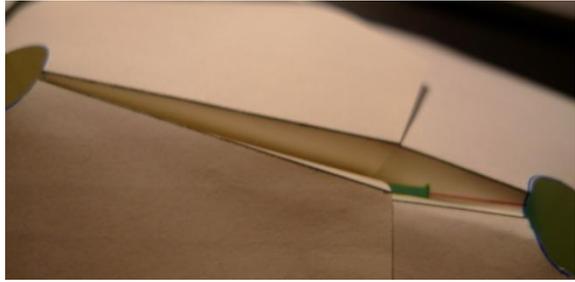
圖 3-5 原始板材尺寸及紋路彎曲方式

### 3.2.3 單元構件形體設計

單元構件設計係依據原則與概念發展構件形體，於單元紋路與彎曲方式探討下，本階段將以二種類型設計與研擬，並檢討以易可彎板材施作下構成之可能性，類型分別為多向度彎曲單元構件 (表 3-3) 及單向度彎曲單元構件，內容如下：

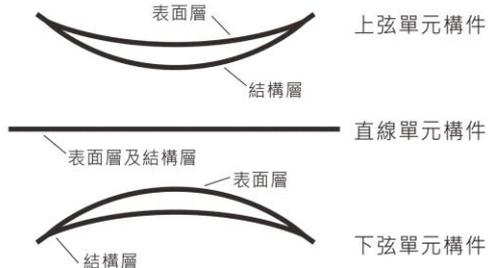
表 3-3 多向度彎曲單元構件設計過程

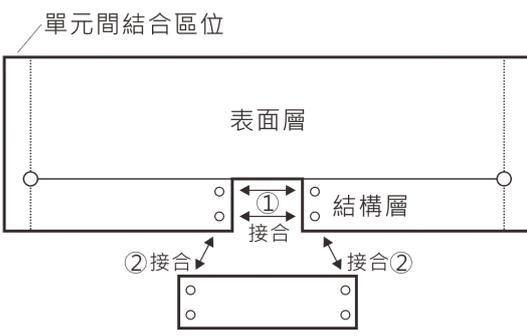
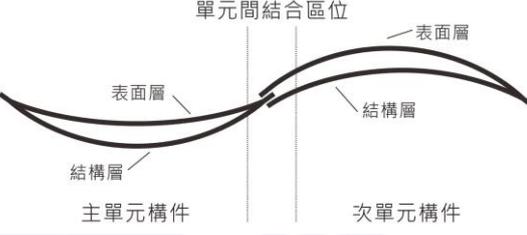
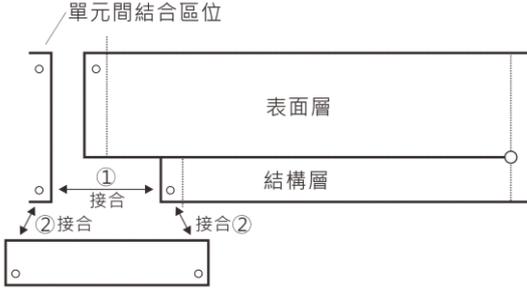
| 類型一：多向度彎曲單元構件   |  |
|---|--|
| 說明  | 圖示   |
| <p>初始形體採符合原始板材之矩形，並設定尺寸長寬 30*20cm。</p> <p>設定單元長短向彎折位置，預設單元長向為主彎曲方向，採較大彎折缺口。</p> |    |
| <p>依單元長短向設定之彎折位置進行初始動作，而彎折尖角之部分，承載單元形體過大之彎曲角度，將至單元無法平順，並可預見尖角處會產生應力集中之現象。</p>   |   |
| <p>進一步將曲面攤平，並於尖角處設置圓形缺口，防止單元無法平順及尖角處會產生應力集中之現象。</p>                             |  |
| <p>重新檢視依單元長短向設定之彎折位置及加入尖角處圓形缺口後，所設置之單元構件形體。</p>                                 |  |
| <p>於固定單元構件形體後，可知於矩形邊角處，會直接影響形體表面平順之曲度，故裁除矩形邊角處多於之材料，以使形體更趨近於平順。</p>             |  |

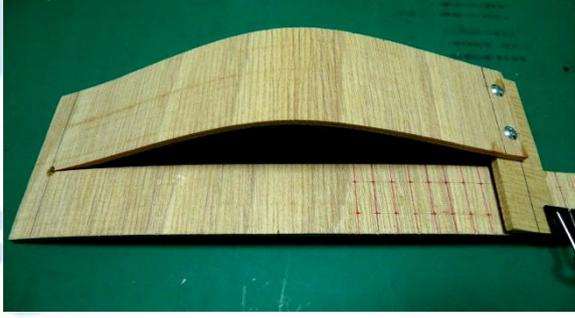
|   |   |
|---|---|
| <p>為減少單元搭接處接點之形成，於單元長短向設定之彎折位置預留凹槽，進一步將單元構件概念模型式組裝。</p>                                   |   |
| <p>以易可彎板材為材料進行測試，並確定單元紋路與彎曲之方式。<br/>於板材彎曲方向平行於單元彎折位置設定開口測試，單元板材無法彎折，如過度承載外力將造成單元構件破損。</p> |   |
| <p>如以板材彎曲方向平行於單元彎折位置設定開口測試，單元板材可彎折，但於開口處無法完全閉合。</p>                                       |  |

由多向度彎曲單元構件設計過程可知，以易可彎板材為材料進行測試，單元構件僅容許單向度之彎曲，未符合多向度彎曲原則，故單元構件之設計概念須進一步改進，但於設計過程中之二項主要思維，可加以簡化並作為單向度彎曲單元構件設計之參考，分別為設置圓形缺口以防止應力集中之現象，與藉由開設形體缺口後接合以達成彎曲之自由形體，而單向度彎曲單元構件設計過程（表 3-4）如下所述：

表 3-4 單向度彎曲單元構件設計過程

| <p>類型二：單向度彎曲單元構件</p>  |  |
|---|--|
| <p>說明</p>   | <p>圖示</p>  |
| <p>概念發展階段（形體概念推演）</p>   |  |
| <p>採用單向度彎曲單元構件構成自由形體，須以自由形體之三種曲度曲線（上弦、下弦及水平直線）為基礎下，進一步發展單元構件。</p> |  |

|   |   |
|---|---|
| <p>於符合表皮即是骨架及單元構件自體支承之原則下，將單一物件分割為表面層與骨架層，並採骨架部位之長度以定義皮層部位之彎曲程度。</p> <p>採①之接合方式則為下弦單元構件；採②之接合方式則為上弦單元構件，而水平直線單元構件則去除骨架層。</p>                  |  <p>Diagram illustrating the structure of a horizontal unit component. It shows a rectangular component divided into a '表面層' (Surface Layer) and a '結構層' (Structural Layer). The '結構層' is further divided into '主單元構件' (Main Unit Component) and '次單元構件' (Secondary Unit Component). Two joint types are shown: '接合①' (Joint 1) and '接合②' (Joint 2). The '單元間結合區位' (Joint Position) is indicated by a vertical dashed line.</p> |
| <p>為提高施作上之便利性與工作性，並將自由形體細分之原則下，單元構件以上述三種類型為主構件，並往主構件兩側延伸二種形式類型之次構件。</p>   |  <p>Diagram illustrating the structure of a curved unit component. It shows a curved component divided into a '表面層' (Surface Layer) and a '結構層' (Structural Layer). The '結構層' is further divided into '主單元構件' (Main Unit Component) and '次單元構件' (Secondary Unit Component). Two joint types are shown: '接合①' (Joint 1) and '接合②' (Joint 2). The '單元間結合區位' (Joint Position) is indicated by a vertical dashed line.</p>          |
| <p>採①之接合方式則為下弦次單元構件；採②之接合方式則為上弦次單元構件，</p>   |  <p>Diagram illustrating the structure of a vertical unit component. It shows a rectangular component divided into a '表面層' (Surface Layer) and a '結構層' (Structural Layer). The '結構層' is further divided into '主單元構件' (Main Unit Component) and '次單元構件' (Secondary Unit Component). Two joint types are shown: '接合①' (Joint 1) and '接合②' (Joint 2). The '單元間結合區位' (Joint Position) is indicated by a vertical dashed line.</p>  |
| <p>材料測試階段 ( 易可彎板材 )</p>   |   |
| <p>初始單元形體採符合原始板材之矩形，並設定尺寸長寬 30*10cm，而單元形體彎曲方向平行於構件長向。</p> <p>基於接頭直徑為 0.5cm 並預留接頭間距 1cm，進而設定結構層寬度 3cm 與表面層寬度 7cm；單元長向兩側 1.5cm 則設定為單元間接合區位。</p> |  <p>Photograph of a rectangular wood board. A white arrow points to the right, labeled '木材彎曲方向' (Wood Bending Direction). The board is placed on a green cutting mat.</p>   |
| <p>上弦主單元構件：<br/>經單元構件板材部位定義及尺寸放樣後切割，上弦主單元構件之結構層，須採增加長度之方式以定義皮層部位之彎曲程度。</p>  |  <p>Photograph of a curved wood component, likely a main unit component for the upper chord. It is shown on a green cutting mat. Two screws are visible, securing the component.</p>  |

|  |  |
|--|--|
| <p>下弦主單元構件：<br/>經單元構件板材部位定義及尺寸放樣後切割，下弦主單元構件之結構層，須採減少長度之方式以定義皮層部位之彎曲程度。</p>                     |    |
| <p>水平直線單元構件：<br/>為保持單元構件維持水平平板，採用改變單元形體彎曲方向為垂直於構件長向，並經單元構件板材部位定義及尺寸放樣後切割而成（去除結構層）。</p>         |    |
| <p>上弦次單元構件：<br/>經單元構件板材部位定義及尺寸放樣後切割，上弦次單元構件之結構層，須採增加長度之方式以定義皮層部位之彎曲程度。</p>                     |   |
| <p>下弦次單元構件：<br/>經單元構件板材部位定義及尺寸放樣後切割，下弦主單元構件之結構層，須採減少長度之方式以定義皮層部位之彎曲程度。</p>                     |  |
| <p>單元構件預組裝階段</p>   |  |
| <p>單元構件短向延伸向度組裝：<br/>主單元構件個體依據皮層部位之需求值組構後，將主單元構件以短向延伸向度組裝為主架構，而個體間之角度及結點於接合區位之位置決定主架構彎曲程度。</p> |  |

單元構件長向延伸向度組裝：

自由形體主架構建構後，進一步將次單元構件依據表皮層之需求值組構於主架構，而次單元個體間之角度及結點於接合區位之位置決定自由形體彎曲程度。



單向度彎曲單元構件經以易可彎板材為材料進行測試，及單元構件之預組裝過程，可知單元構件具構成自由形體之可能性。而檢視前述整體設計過程，可預見多項問題有待探討：

1. 單向度彎曲單元構件個體組裝上，表皮層彎曲程度與結構層長度之關係。
2. 自由形體組構上，單元構件間之角度與接點區為之關係。
3. 自由形體組構上，主架構與次架構之構成關係。
4. 自由形體單元化方式中，單元構件與自由形體之關係。

### 3.3 單元構件表面層與結構層分析

由單向度彎曲單元構件設計過程中，可知設計構件分為上弦主單元構件、水平直線單元構件、下弦主單元構件、上弦次單元構件及下弦次單元構件之五種形態，除水平直線單元構件不具表皮層與結構層之關係外，其餘四種形態於表皮層之彎曲程度與結構層長度皆具關聯性，故本階段將四種形態於使用易可彎木板材為材料之下，分析其表皮層之彎曲程度與結構層長度之關係，並加以整體歸納。

#### 3.3.1 單元構件量測分析方法

於彎曲程度分析上，普遍使用之測量單位為曲率半徑與長度，亦即於單位固定長度下弧之曲率半徑距離，但本案單元構件為手工施作及測量，如採用曲率半徑作為量測單位，則欠缺精準度無法有效歸納，故本階段四種形態之彎曲程度分析，採用相對

距離作為量測單位，測量方法如下說明：

1. 將單元形態立面曲線座落於二維座標 (X、Y) 系統內，並以直線連接曲線 (排除單元間接合區位) 兩端。
2. 以直線中點座落於二維座標系統原點，並將曲線兩端點對齊 X 軸，可得曲線 (表面層曲線及結構層曲線) 兩端點距離原點之長度，與曲線中點距離原點之長度 (圖 3-6)。
3. 為取得形態表面層彎曲與結構層長度之關係，本案之控制變因為結構層之長度，以遞增及遞減方式施作，於固定表面層長度下，量測表面層與結構層於二維座標系統內曲線端點與中點距離原點之長度。
4. 本案各種形態曲線之長度資訊繁多，於測量階段加以繪製 1cm 見方之網格，以取得測量之便捷性 (圖 3-7)。

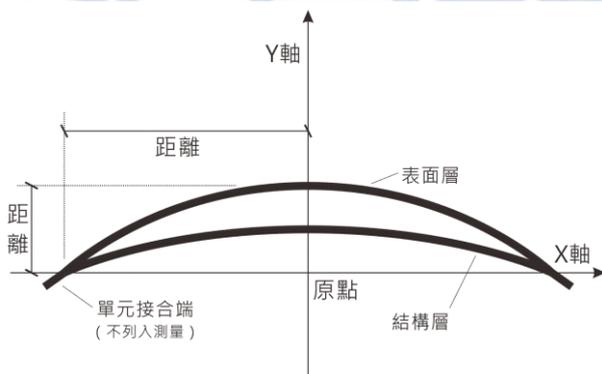


圖 3-6 實體曲線量測說明

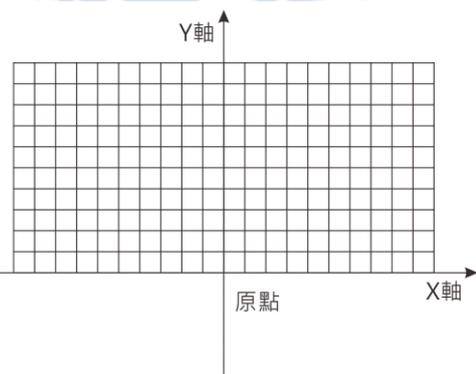


圖 3-7 實體量測輔助網格

### 3.3.2 單元構件形態量測分析

在單元形體量測分析方法下，針對四種形態之單元構件進行量測，以取得各形態在皮層彎曲與骨架長度關係下之 X、Y 軸距離，並進一步歸納整理。上弦主單元構件、下弦主單元構件、上弦次單元構件及下弦次單元構件之分析如下：

1. 上弦主單元構件：

建立上弦主單元構件之量測構件 (圖 3-8)，規格及相關尺寸則依前章節單元設計之規格訂定，並以表面層長度為控制變因，結構層長度以 1cm 為間

距遞增，而皮層長度固定為 27cm (圖 3-9)。其二者於二維座標系統內曲線端點與中點距離原點之長度如下表所示 (表 3-5)：

表 3-5 上弦主單元構件之量測數據 (單位：公分)

| 結構層<br>長度 | 結構層            |                | 表面層            |                | 形體論述                               |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|
|           | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 |                                    |
| 1         | 13.4           | 4.5            | 13.4           | 1.9            | 表面層趨<br>近於拱<br>形；結構<br>層趨近於<br>懸鍊線 |
| 2         | 13.2           | 6.0            | 13.2           | 2.5            |                                    |
| 3         | 13.0           | 7.4            | 13.0           | 2.9            |                                    |
| 4         | 12.8           | 8.4            | 12.8           | 3.3            |                                    |
| 5         | 12.6           | 9.3            | 12.6           | 3.6            |                                    |
| 6         | 12.5           | 10.1           | 12.5           | 3.9            |                                    |
| 7         | 12.4           | 10.9           | 12.4           | 4.2            |                                    |
| 8         | 12.3           | 11.6           | 12.3           | 4.5            |                                    |
| 9         | 12.2           | 12.2           | 12.2           | 4.5            |                                    |

依據量測數據可歸納出構件形態表面層彎曲與結構層長度之關係：於結構層長度遞增下，表面層曲線中點與原點之距離(圖 3-10)，介在於 0~4.5cm 之間，4.5cm 亦是表面層變化量之最大值 (結構層長度增加超過 9cm，表面層變化量維持於 4.5cm)；而於形體論述論述下，表面層趨近於拱形，則結構層趨近於懸鍊線 (Catenary)。

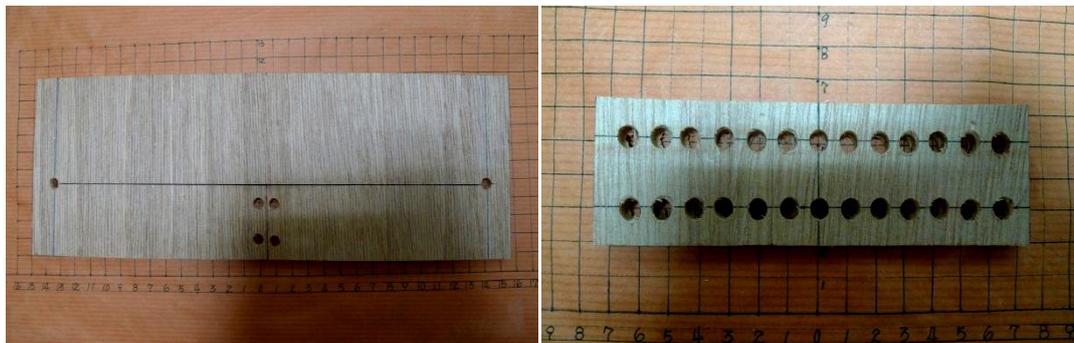


圖 3-8 上弦主單元構件之量測構件

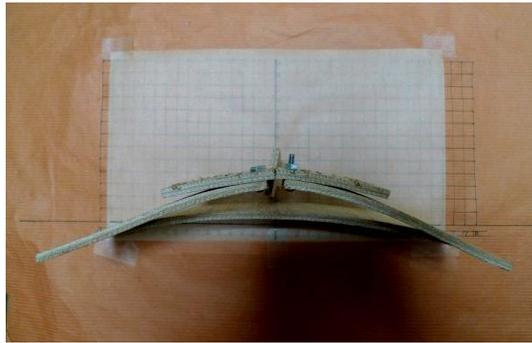


圖 3-9 上弦主單元構件之量測紀錄

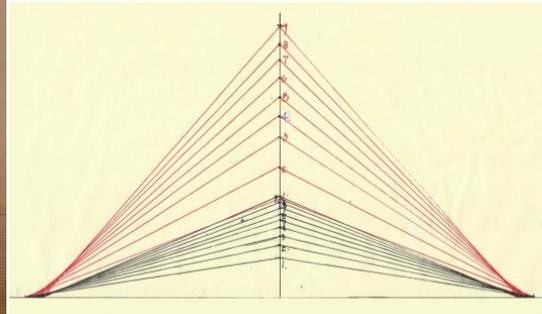


圖 3-10 上弦主單元構件表面層與結構層數據

2. 下弦主單元構件：

建立下弦主單元構件之量測構件 ( 圖 3-11 )，規格及相關尺寸則依前章節單元設計之規格訂定，並以結構層長度為控制變因，結構層長度以 1cm 為間距遞增，而表面層長度固定為 27cm ( 圖 3-12 )，其二者於二維座標系統內曲線端點與中點距離原點之長度如下表所示 ( 表 3-6 )：

表 3-6 下弦主單元構件之量測數據 ( 單位：公分 )

| 結構層<br>長度 | 結構層            |                | 表面層            |                | 形體論述                 |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
|           | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 |                      |
| 1         | 12.9           | 1.0            | 12.9           | 3.7            | 表面層與<br>結構層趨<br>近於拱形 |
| 2         | 12.2           | 2.0            | 12.2           | 5.0            |                      |
| 3         | 11.6           | 2.0            | 11.6           | 6.2            |                      |
| 4         | 11.0           | 2.0            | 11.0           | 6.9            |                      |
| 5         | 10.5           | 2.0            | 10.5           | 7.6            |                      |
| 6         | 10.0           | 2.0            | 10.0           | 8.2            |                      |
| 7         | 9.5            | 2.0            | 9.5            | 8.6            |                      |
| 8         | 9.1            | 2.0            | 9.1            | 9.1            |                      |
| 9         | 8.7            | 2.0            | 8.7            | 9.6            | 無法分析                 |

依據量測數據可歸納出構件形態表面層彎曲與結構層長度之關係：隨結構層長度遞減，表面層與結構層形體維持趨近拱形之情況下，表面層曲線中點與原點之距離 (圖 3-13)，介在於 0~9.1cm 之間，而結構層曲線中點與原點之距離，則以其長度增加 2cm 為中介點，小於 2cm 則曲線中點與原點距離介於 0~2cm 之間；2cm 以上則測得之距離維持 2cm。

當表面層曲線中點與原點之距離 (Y 軸向度) 大於曲線端點與原點之距離 (X 軸向度) 時，結構層形體雖維持趨近於拱形，但表面層脫離可分析之形體 (非拱形及懸鍊形)，無法使用上述量測方式之數據分析，故本研究排除此部分數據。

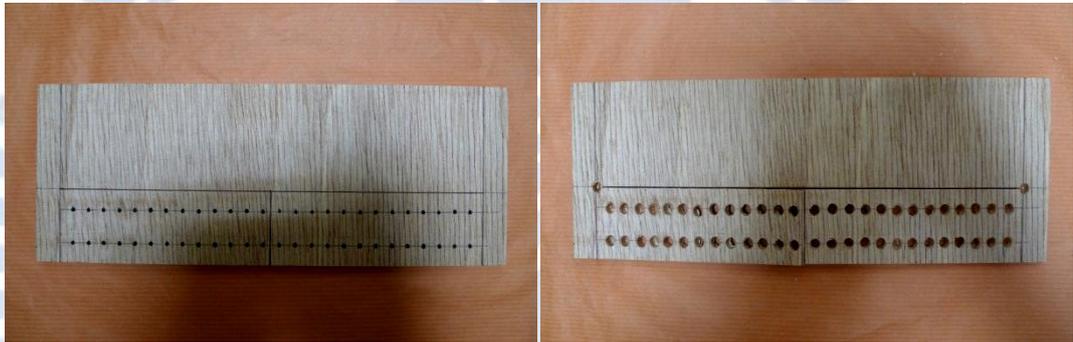


圖 3-11 下弦主單元構件之量測構件

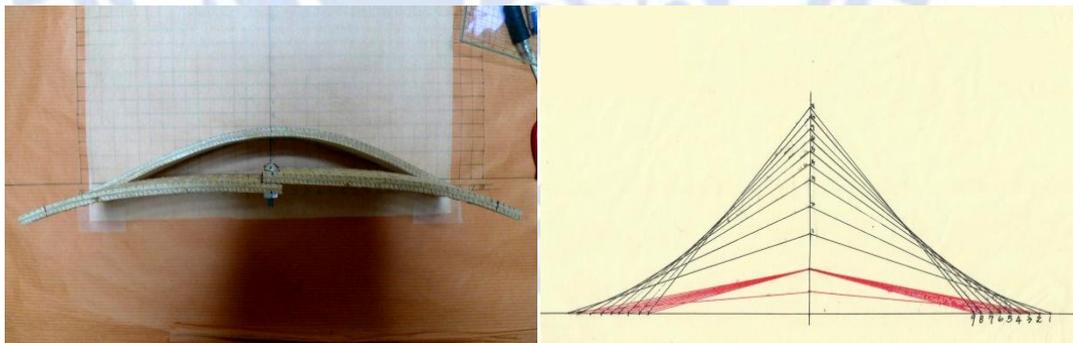


圖 3-12 下弦主單元構件之量測紀錄

圖 3-13 下弦主單元構件表面層與結構層數據

### 3. 上弦次單元構件：

建立上弦次單元構件之量測構件，規格及相關尺寸則依前章節單元設計之規格訂定，並以結構層為控制變因，結構層以 1cm 為間距遞增，而表面層

長度固定為 27cm(圖 3-14)，其二者於二維座標系統內曲線端點與中點距離原點之長度如下表所示(表 3-7)：

表 3-7 上弦次單元構件之量測數據(單位：公分)

| 結構層<br>長度 | 結構層            |                | 表面層            |                | 形體論述                               |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|
|           | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 |                                    |
| 1         | 13.4           | 4.5            | 13.4           | 1.9            | 表面層趨<br>近於拱<br>形；結構<br>層趨近於<br>懸鍊線 |
| 2         | 13.2           | 6.0            | 13.2           | 2.5            |                                    |
| 3         | 13.0           | 7.4            | 13.0           | 2.9            |                                    |
| 4         | 12.8           | 8.4            | 12.8           | 3.3            |                                    |
| 5         | 12.6           | 9.3            | 12.6           | 3.6            |                                    |
| 6         | 12.5           | 10.1           | 12.5           | 3.9            |                                    |
| 7         | 12.4           | 10.9           | 12.4           | 4.2            |                                    |
| 8         | 12.3           | 11.6           | 12.3           | 4.5            |                                    |
| 9         | 12.2           | 12.2           | 12.2           | 4.5            |                                    |

相關數據同上弦主單元構件，即為結構層長度遞增下，表面層曲線中點與原點之距離(圖 3-15)，介在於 0~4.5cm 之間，4.5cm 亦是表面層變化量之最大值；而於形體論述論述下，表面層趨近於拱形，則結構層趨近於懸鍊線。

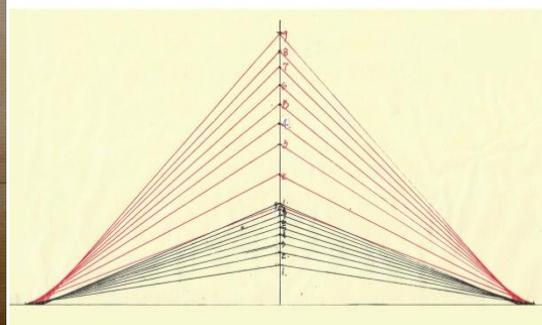


圖 3-14 上弦次單元構件之量測紀錄

圖 3-15 上弦次單元構件表面層與結構層數據

## 4. 下弦次單元構件：

建立下弦次單元構件之量測構件，規格及相關尺寸則依前章節單元設計之規格訂定，並以結構層長度為控制變因，表面層以 1cm 為間距遞增，而表面層長度固定為 27cm(圖 3-16)，其二者於二維座標系統內曲線端點與中點距離原點之長度如下表所示(表 3-8)：

表 3-8 下弦次單元構件之量測數據(單位：公分)

| 結構層<br>長度 | 結構層            |                | 表面層            |                | 形體論述                 |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
|           | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 | 曲線端點與<br>原點之距離 | 曲線中點與<br>原點之距離 |                      |
| 1         | 12.9           | 1.0            | 12.9           | 3.7            | 表面層與<br>結構層趨<br>近於拱形 |
| 2         | 12.2           | 2.0            | 12.2           | 5.0            |                      |
| 3         | 11.6           | 2.0            | 11.6           | 6.2            |                      |
| 4         | 11.0           | 2.0            | 11.0           | 6.9            |                      |
| 5         | 10.5           | 2.0            | 10.5           | 7.6            |                      |
| 6         | 10.0           | 2.0            | 10.0           | 8.2            |                      |
| 7         | 9.5            | 2.0            | 9.5            | 8.6            |                      |
| 8         | 9.1            | 2.0            | 9.1            | 9.1            |                      |
| 9         | 8.7            | 2.0            | 8.7            | 9.6            | 無法分析                 |

相關數據同下弦主單元構件，即為結構層長度遞減，表面層與結構層形體維持趨近拱形之情況下，表面層曲線中點與原點之距離(圖 3-17)，介在於 0~9.1cm 之間，而結構層曲線中點與原點之距離，則以其長度增加 2cm 為中介點，小於 2cm 則曲線中點與原點距離介於 0~2cm 之間；2cm 以上則測得之距離維持 2cm。

當表面層曲線中點與原點之距離大於曲線端點與原點之距離時，結構層形體雖維持趨近於拱形，但表面層脫離可分析之形體(非拱形及懸鍊形)，無法使用上述量測方式之數據分析，故本研究排除此部分數據。

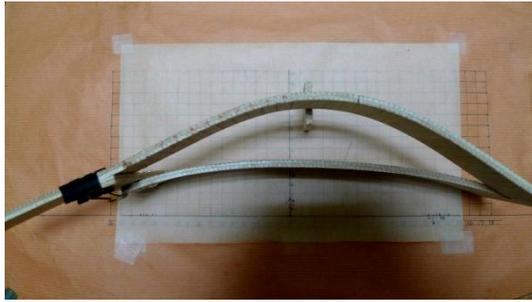


圖 3-16 下弦次單元構件之量測紀錄

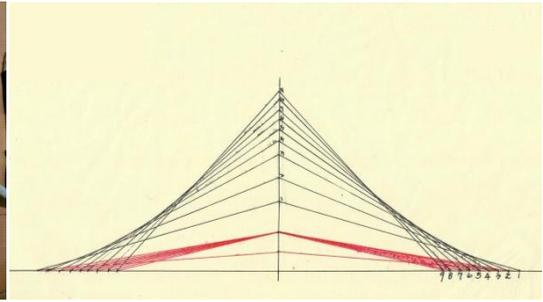


圖 3-17 下弦次單元構件表面層與結構層數據

### 3.4 參數化系統建置

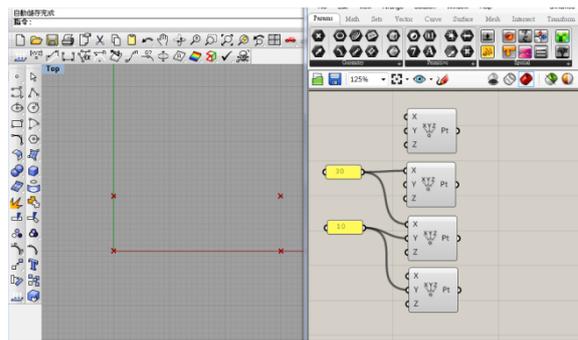
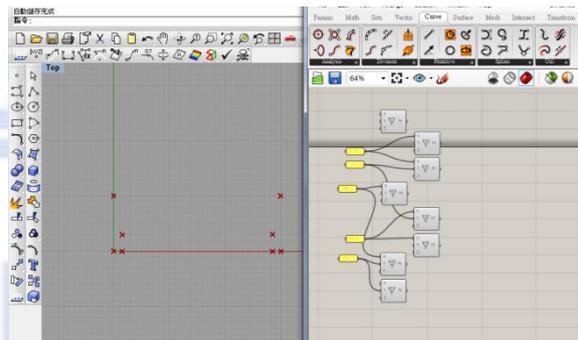
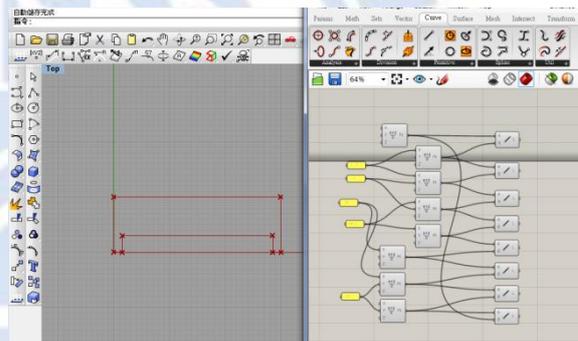
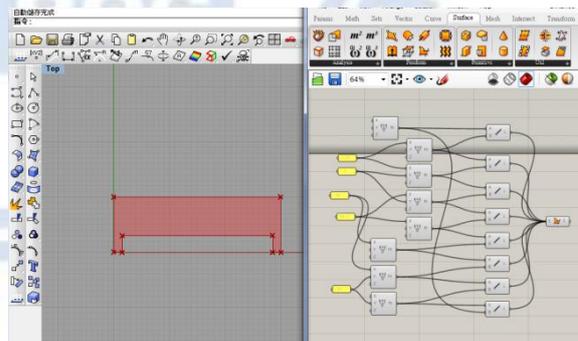
由單元構件設計過程中得知，單向度彎曲單元構件分為五種形態，分別為上弦主單元構件、水平直線單元構件、下弦主單元構件、上弦次單元構件及下弦次單元構件，而根據前章節單元構件表面層與結構層分析下，水平直線單元構件由單獨表面層部位構成，無結構層長度變化之關係，為純粹平板單元構件；上弦主單元構件及下弦主單元構件形態表面層彎曲與結構長度之關係，則分別與其次單元構件相同。

本章節係藉由單元構件表面層與結構層分析結果，於各形態量測分析之相關數據，分別以電腦參數化系統建置模型，利於後續建立 CAD/CAM 技術下外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程研究使用，而依據前段敘述，本章節主針對水平直線單元構件（表 3-9）、上弦主單元構件（表 3-10）及下弦主單元構件（表 3-11）進行電腦模型參數化系統建置，其 3D 參數化系統電腦模型之建置工具則配合使用 Rhinocero 及 Grasshopper 二項電腦軟體。電腦模型參數化系統建置過程如下：

1. 水平直線單元構件參數化系統建置（表 3-9）：

表 3-9 水平直線單元構件之參數化系統建置過程

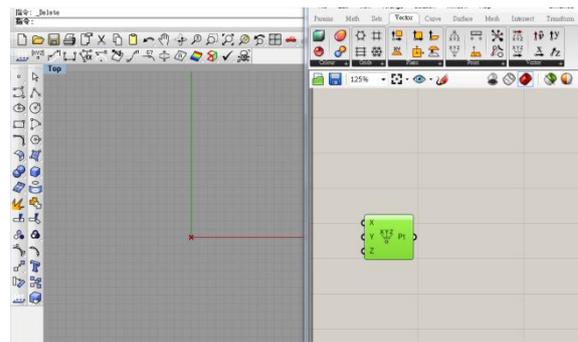
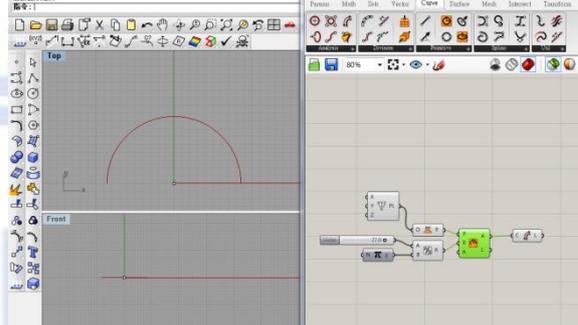
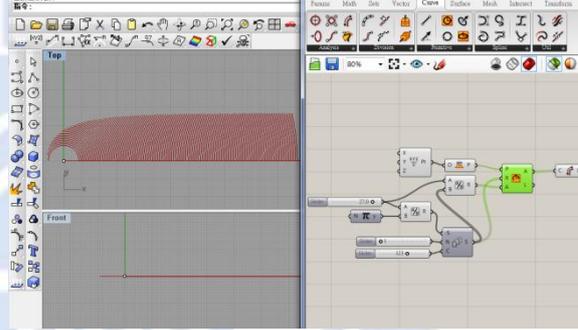
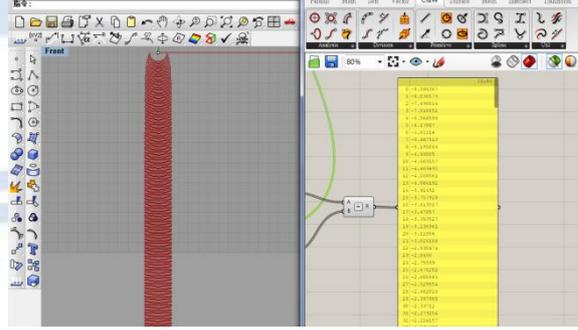
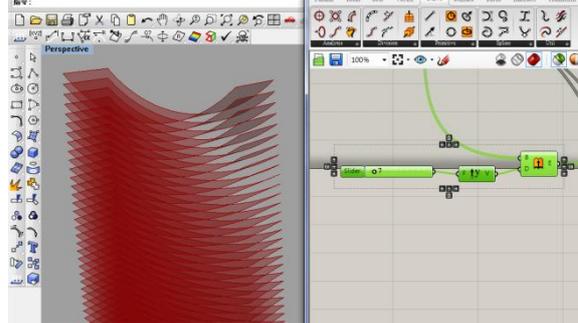
| 說明   | 圖示 |
|--|----|
| <p>於 Rhinocero 模型製作軟體內，引入 Grasshopper 參數式輔助工具，並建立工作起始點，亦即為三維座標系內之 XYZ 數值為 0,0,0。</p> |    |

|   |  |
|---|--|
| <p>由單元構件設計中可知，單元構件原始尺寸長寬 30*10cm，故於軟體中設定原始構件形體之四角點。</p>                                   |    |
| <p>水平直線單元構件形體係去除結構層，故可知表面層之四角點，其三維座標系內 XYZ 數值分別為 1.5,0,0、1.5,3,0、28.5,3,0 及 28.5,0,0。</p> |    |
| <p>電腦軟體內置作模型之順序為點線面體，故將水平直線單元構件之原始構件形體四角點，及結構層四角點以直線連結。</p>                               |   |
| <p>將上步驟點與點間之直線，依序帶入形體構成參數，即可生成水平直線單元構件之參數化系統電腦模型。</p>                                     |  |

2. 上弦主單元構件參數化系統建置 (表 3-10):

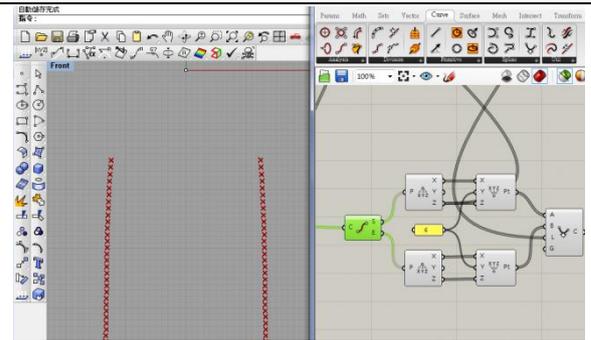
表 3-10 上弦主單元構件之參數化系統建置過程

| 說明      | 圖示 |
|---------|----|
| 表面層形體製作 |    |

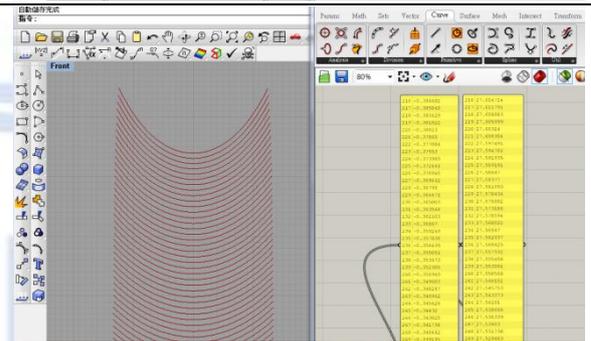
|   |  |
|---|--|
| <p>於 Rhinocero 模型製作軟體內，引入 Grasshopper 參數式輔助工具，並建立工作起始點，亦即為三維座標系內之 XYZ 數值為 0,0,0。</p>                  |    |
| <p>設定表面層形體為拱形進行建置。於極座標系內，弧長 = 半徑 * 倍數π 已知表面層長度為 27cm，並預設弧半徑最大值為半圓弧，半徑為 27cm / π = 8.594367cm。</p>     |    |
| <p>表面層形體曲線之彎曲變化最小值之曲率半徑為無限大（水平直線），故加入序列參數，半徑由 8.594367cm 以間距 1cm 逐漸增加，以模擬各形體曲線彎曲變化。</p>               |   |
| <p>由序列參數製成之曲率半徑，與模擬曲線端點距離 X 軸之長度相減，得出該表面層曲線中點與原點之距離，由前章節分析可知其數值介在於 0~4.5cm 之間，故可排除部分模擬出之皮層部位形體曲線。</p> |  |
| <p>由表面層形體曲線沿其垂直向依指定長度 7cm 擠出，便可取得表面層形體單元構件。</p>   |  |

結構層形體製作

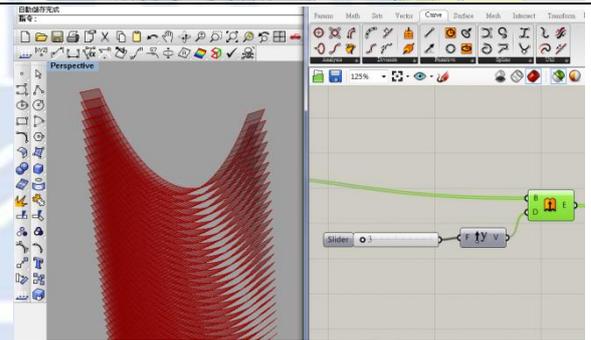
由單元構件表面層與結構層分析可知，結構層形體曲線趨近於懸鍊線，而其形體曲線之端點與表面層形體曲線相同，故其端點以前步驟皮層部位之端點延伸，並採懸鍊線模擬之。



由表面層曲線中點與原點之距離介在於 0~4.5cm 之間，對應結構層曲線長度為 27~35cm 之間，並加入結構層曲線端點，可製成其曲線模擬。

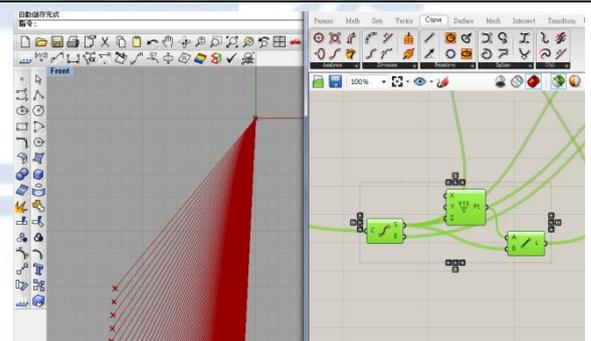


由結構層形體曲線沿其垂直向依指定長度 3cm 擠出，便可取得結構層形體單元構件。

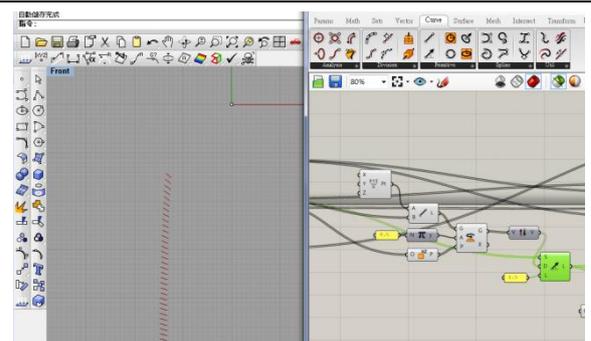


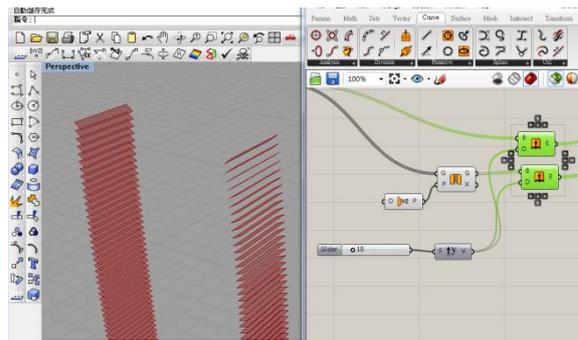
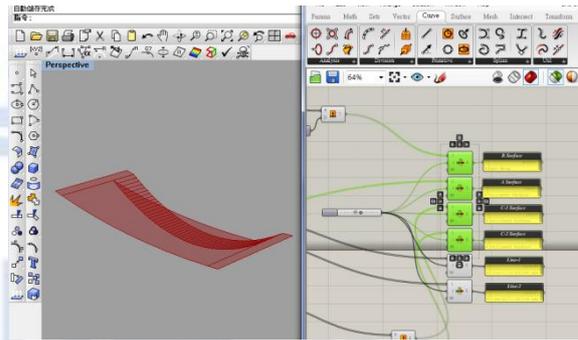
單元接合區位形體製作

依據單元構件表面層與結構層分析可知，單元接合區位形體係由表面層曲線端點向外延伸，故先行取得端點至原點之向量。



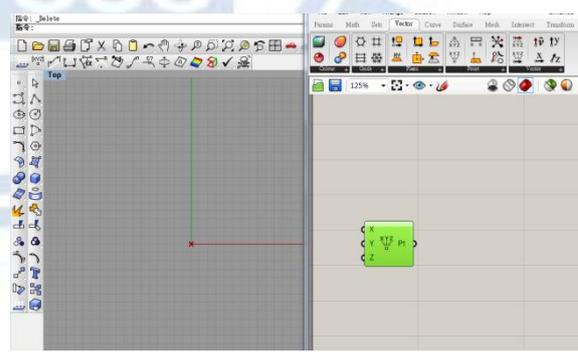
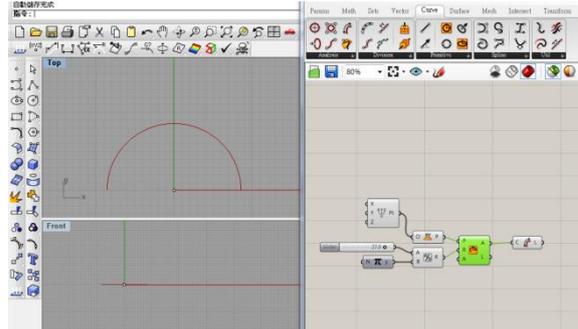
將端點至原點向量逆時針旋轉 90°，並依指定長度 ( 1.5cm ) 延伸，可得單向單元接合區曲線。

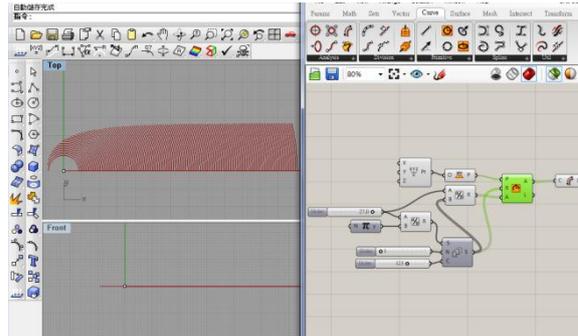
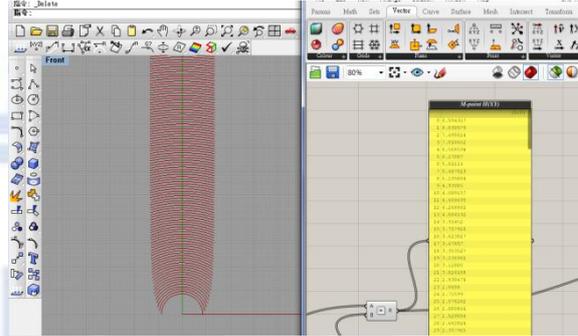
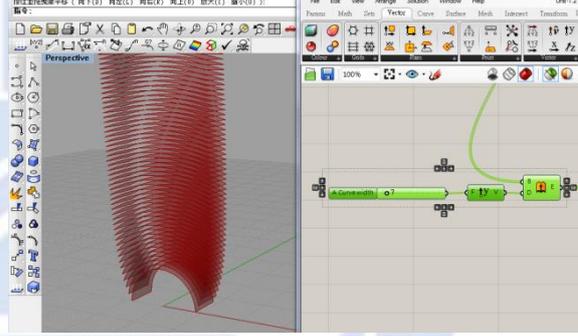
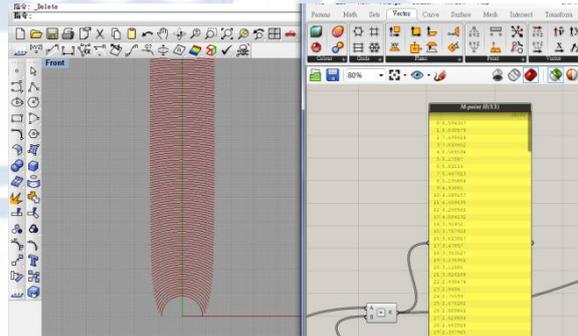
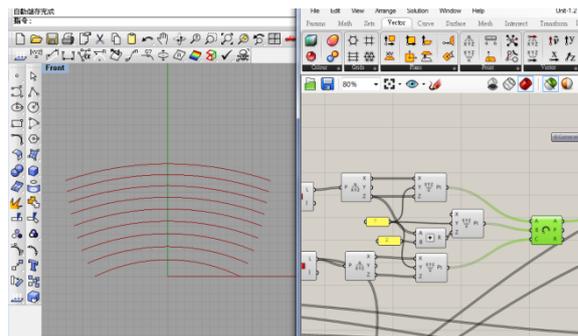


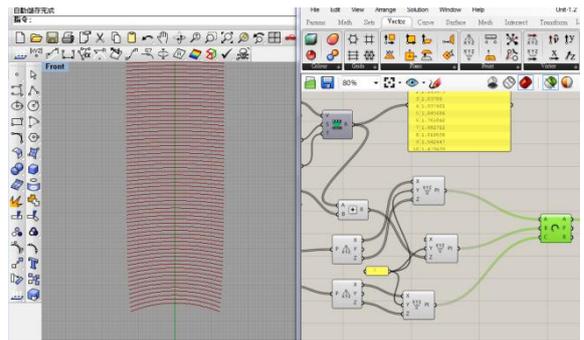
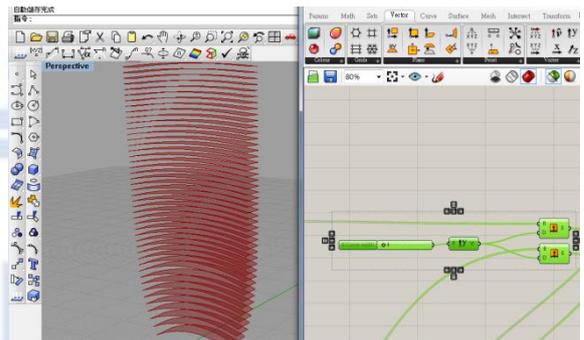
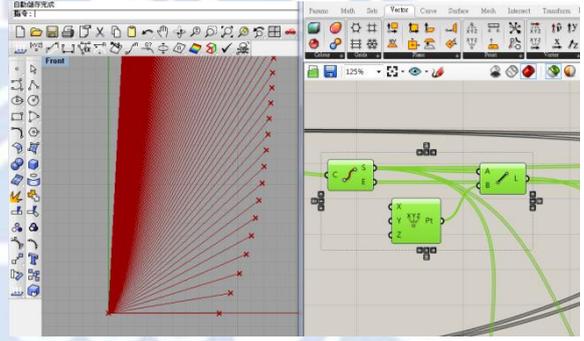
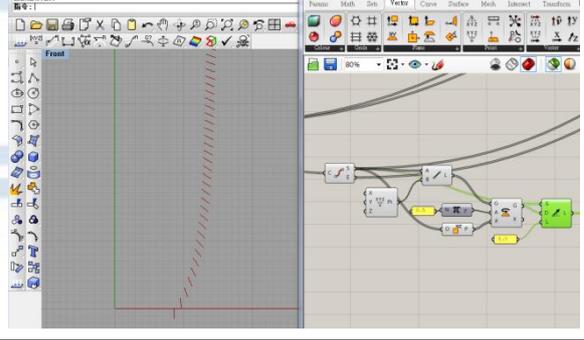
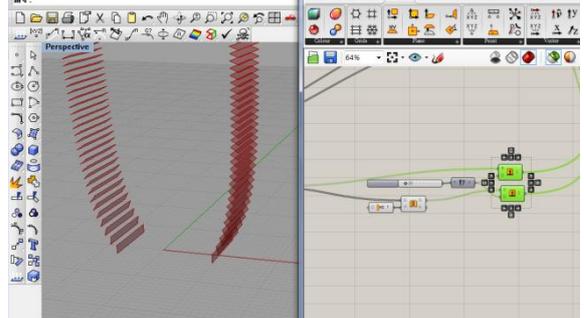
|   |  |
|---|--|
| <p>將上述步驟之單元接合區位曲線，依 YZ 工作平面鏡射，可得另一向單元接合區曲線，並將二向曲線沿其垂直向依指定長度 ( 10cm ) 擠出，便可取得單元接合區位形體單元構件。</p> |  |
| <p>選擇同項目之表面層、結構層及單元接合區位形體，可個別檢視上弦主單元構件。</p>   |  |

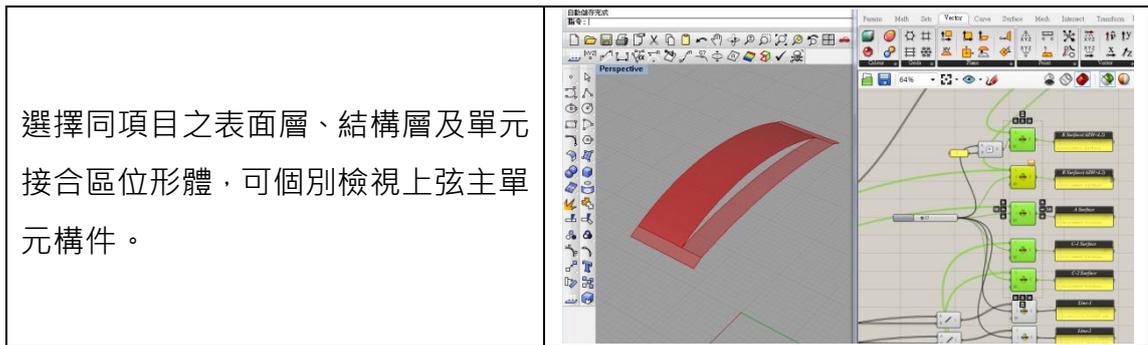
3. 下弦主單元構件參數化系統建置 ( 表 3-11 ):

表 3-11 下弦主單元構件之參數化系統建置過程

| 說明  | 圖示   |
|---|--|
| 表面層形體製作   |  |
| <p>於 Rhinocero 模型製作軟體內，引入 Grasshopper 參數式輔助工具，並建立工作起始點，亦即為三維座標系內之 XYZ 數值為 0,0,0。</p>              |  |
| <p>設定表面層形體為拱形進行建置。於極座標系內，弧長 = 半徑 * 倍數π 已知表面層長度為 27cm，並預設弧半徑最大值為半圓弧，半徑為 27cm / π = 8.594367cm。</p> |  |

|   |  |
|---|--|
| <p>表面層形體曲線之彎曲變化最小值之曲率半徑為無限大（水平直線），故加入序列參數，半徑由 8.594367 cm 以間距 1cm 逐漸增加，以模擬各形體曲線彎曲變化。</p>                                  |    |
| <p>由序列參數製成之曲率半徑，與模擬曲線端點距離 X 軸之長度相減，得出該表面層曲線中點與原點之距離，由前章節分析可知其數值介在於 0~9.1 cm 之間，故可知曲線需小於半圓弧（角度 <math>&lt; \pi</math>）。</p> |    |
| <p>由表面層形體曲線沿其垂直向依指定長度 7cm 擠出，便可取得表面層形體單元構件。</p>   |   |
| <p><b>結構層形體製作</b></p>   |  |
| <p>由單元構件表面層與結構層分析可知，結構層形體受制於表面層形體曲線中點至原點之距離，當其距離大於 5cm，則結構層形體曲線中點至原點之距離為 2cm；反之則距離介於 0~2cm 之間。</p>                        |  |
| <p>結構層形體曲線以拱形設定，而其形體曲線之端點與表面層形體曲線相同，依上步驟原則模擬表面層曲線中點至原點距離大於 5cm 情形下之結構層形體曲線形態。</p>   |  |

|   |  |
|---|--|
| <p>結構層形體曲線以拱形設定，而其形體曲線之端點與表面層部位形體曲線相同，進一步模擬表面層曲線中點至原點距離小於 5cm 情形下之結構層形體曲線形態。</p>          |    |
| <p>由結構層形體曲線沿其垂直向依指定長度 3cm 擠出，便可取得結構層形體單元構件。</p>   |    |
| <p>單元接合區位形體製作</p>   |  |
| <p>依據單元構件表面層與結構層分析可知，單元接合區位形體係由表面層曲線端點向外延伸，故先行取得端點至原點之向量。</p>                             |   |
| <p>將端點至原點向量逆時針旋轉 90°，並依指定長度 1.5cm 延伸，可得單向單元接合區曲線。</p>                                     |  |
| <p>將上述步驟之單元接合區位曲線，依 YZ 工作平面鏡射，可得另一向單元接合區曲線，並將二向曲線沿其垂直向依指定長度 10cm 擠出，便可取得單元接合區位形體單元構件。</p> |  |



選擇同項目之表面層、結構層及單元  
 接合區位形體，可個別檢視上弦主單  
 元構件。

### 3.5 討論

於上述單元構件設計與研究之論述中，分析材料對應於自由形體單元構件之材料性、施作性及經濟性，並由分析結果作為依據，進行單元構件之設計、測試分析及提取單元之相關數據，進而以參數化系統設計之思維，將單元構件以數位化之方式建置。本章節依各階段結論進而討論與分析，如下：

#### 1. 單元構件材料性質：

本階段依據各材料於材料性、施作性及經濟性下，本研究材料選用上，採用 4 尺\*8 尺\*5mm 之易可彎夾板，並利用其自體可彎曲之彈性與相當程度之剛性，進行單元構件設計。

#### 2. 單元構件設計與分析：

本階段依自由形體之構成，分別設計上弦單元構件、水平直線單元構件及下弦單元構件之三種類型，而由單元構件整合分析中可知其形體運用之極限。上弦單元構件之表面層曲線中點與原點之距離介在於 0~4.5cm 之間；而下弦單元構件之表面層曲線中點與原點之距離則介在於 0~9.1cm 之間，而當其曲線中點與原點之距離大於端點與原點之距離時，表面層曲線脫離可分析之形體。

#### 3. 參數化系統建置：

本階段依據上弦主單元構件及下弦主單元構件形態表面層彎曲與結構層長度之關係，將其建置為序列式參數化系統，而其主單元構件分別與次單元構件相同，故上弦主次單元構件及下弦主次單元構件可相互使用；而水平直線單元構件由單獨表面層構成，無骨架長度變化之關係，為純粹平板單元構件，故參數化系統之建置，則直接針對表面層刻畫其單元構件形體。

## 第四章 數位設計建造

本文數位製造方法可分為二個階段：階段一為依單元構件之概念建立外骨骼構造之原型，並建置參數化系統；階段二即進而提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

本章節主要探討數位製造方法之階段二，以單元構件之新構成原型，重新制訂並提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。而本研究係以外骨架構造之單元構件原型定義自由形體施作流程，可預見於施作過程中有產生大量問題之可能，故於沿用現有自由形體設計與施作流程之「建築計畫」與「概念發展」階段下，以實體製作 1:1 模型之方式，將各階段施作過程加以記錄，由實踐面進一步檢討施作之可行性，以提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

於外骨骼構造之初步自由形體製造流程上，可分為單元化分割、自由形體單元構件製作及實體生產組裝之三階段，相關步驟可對應至預設外骨骼系統之自由形體初步設計與製造流程中（圖 4-1），內容敘述如下：

### 1. 單元化分割：

依單元構件形式選擇自由形體，並依循上階段新單元構件之設計作為施作準則，針對自由形體進行單元化分割，以取出自由形體經單元化分割後之單元構件表面層數據。

### 2. 自由形體單元構件製作：

由分割後之單元構件表面層相關數據，導入參數化系統取得其表面層與結構層之關係，進而將單元構件於數位軟體中攤平，以利後續實體輸出作業之施作。

### 3. 實體生產與組裝：

將單元構件於數位化攤平之形體，放樣至實體施作材料上，採手工製成方式進行單元構件生產並組裝為自由形體，並透過實作過程加以驗證外骨骼

系統自由形體初步數位設計與製造過程之可行性。



圖 4-1 預設外骨骼系統之自由形體初步設計與製造流程

## 4.1 自由形體單元化分割

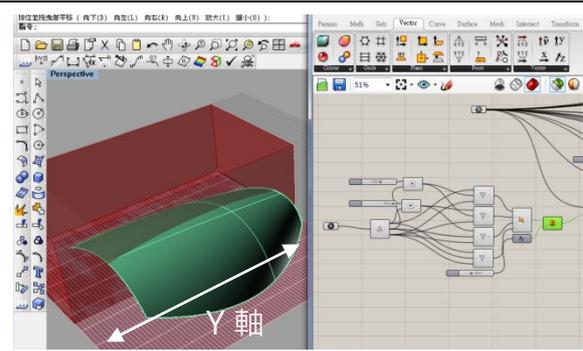
由單元構件之設計與製造可知，單向度彎曲單元構件分為五種形態，分別為上弦主次單元構件、水平直線單元構件及下弦主次單元構件。而自由形體形式之選擇上，則先行確認類圓拱形體（下弦主、次單元構件構成之形體）對應自由形體單元化分割之可行性（表 4-1），再者，進一步以多向度自由形體（五種形態單元構件構成之形體）探究其對應單元化分割之可能性並進行檢討。

本階段自由形體單元化分割採用數位媒材作為其輔助工具，軟體支應用上分別為 Rhinocero 及 Grasshopper 之二項電腦軟體，而相關類圓拱形體之單元化分割過程如下：

表 4-1 類圓拱形體之單元化分割流程

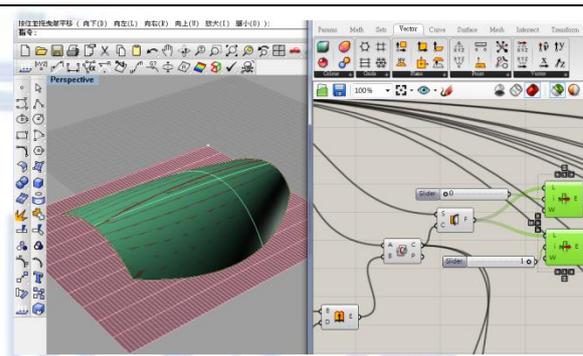
| 型態一：類圓拱形體（下弦主、次單元構件構成之形體）                            |    |
|--|----|
| 說明   | 圖示 |
| 單元構件於自由形體之長短向定位                                      |    |
| 使用 Rhinocero 系統軟體建置類圓拱形數位模型，並導入 Grasshopper 參數式輔助工具。 |    |

由前章節單元設計與製造可知，單元構件形體為長寬 30\*10cm 之矩形。類圓拱形自由形體於 Y 軸向度之彎曲程度較大，故單元構件之排列方式以可乘載大變化量之長向對齊 Y 軸向度；短向對齊 X 軸向度。

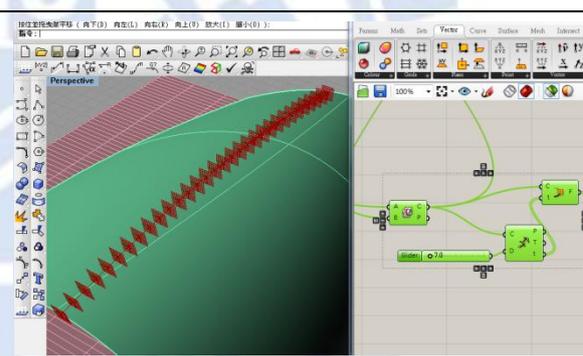


下弦主單元構件於自由形體之單元化分割方式與數據取得

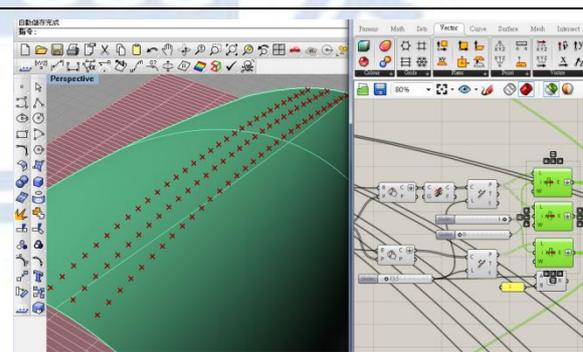
於自由形體單元化分割前，先行制訂單元構件對其 Y 軸向度之組構線，亦即為單元構件長向組構線。



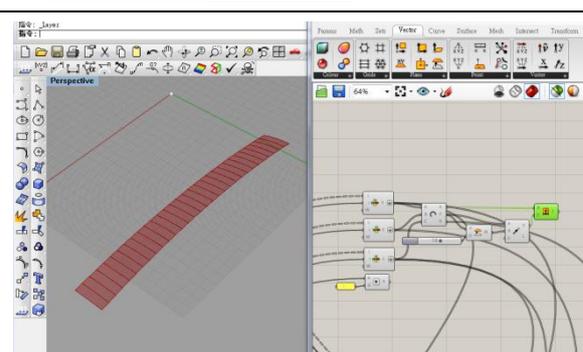
已知單元構件之表面層形體趨近於拱形，且寬度 7cm，而拱形曲線之構成，需含拱形曲線二端點及其上之任一點。故於構件長向組構線上以 7cm 為間距進行分割，可得間距分隔點（拱形曲線上之中點）及各點於曲線上之工作平面。

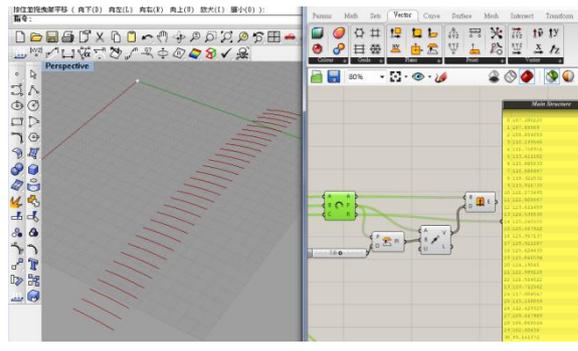
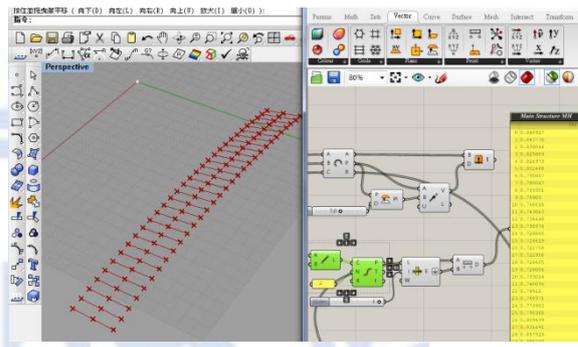
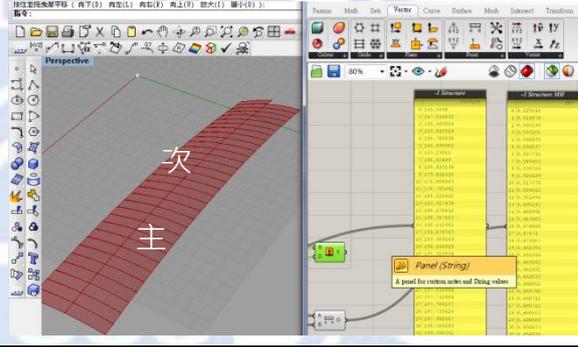
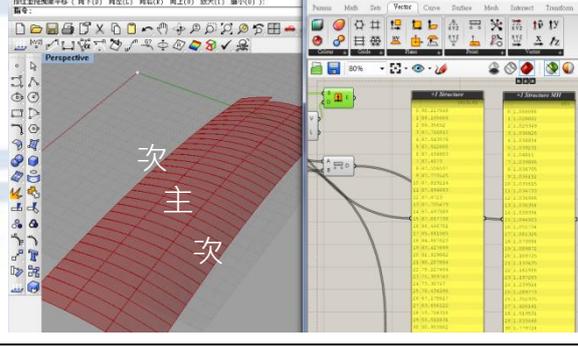
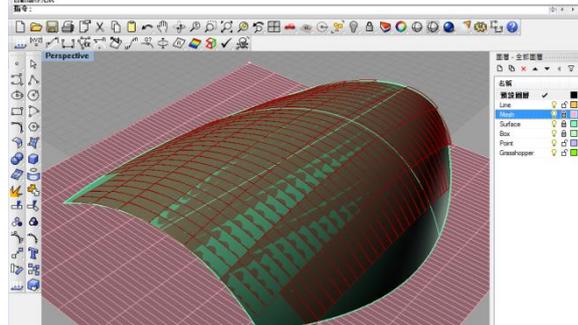


由工作平面與類圓拱形體之交集施作下，可得各點於自由形體上與構件長向組構線垂直之曲線。並已知表面層長度為 27cm，而拱形曲線之二端點，則可由垂直曲線距離組構線 13.5cm 之區位位置得之。



由表面層拱形曲線二端點及其上之中點，可製作表面層形體曲線，並沿其垂直向依指定長度 7cm 擠出，便可得表面層形體之主單元構件。

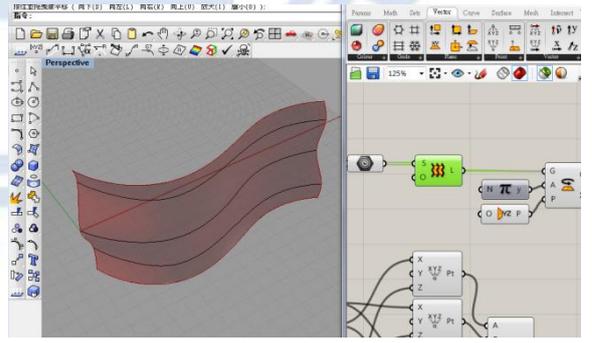
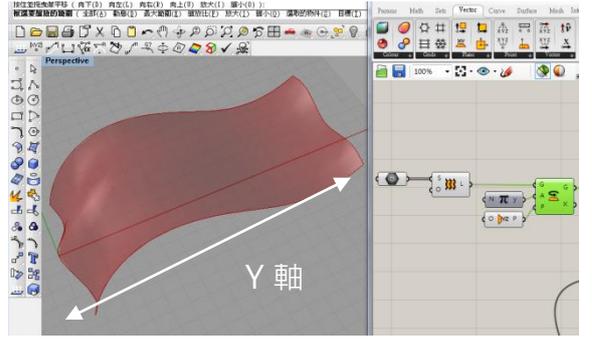


|  |  |
|--|--|
| <p>下弦主單元構件及下弦次單元構件包含三種物件，分別為表面層、結構層位及單元接合部位，而本階段之自由形體單元化分割係針對表面層之生成，其於二部位則須倚賴單元構件參數化系統生成。</p>      |    |
| <p>單元構件參數化系統所需之數據，分別為表面層拱形曲線之曲率半徑長度、表面層曲線中點與相對原點之距離（拱形曲線端點直線距離之中點），及單元構件間之角度。</p>                  |    |
| <p>下弦次單元構件於自由形體之單元化分割方式與數據取得</p>   |  |
| <p>以下弦主單元構件於自由形體之分割方式，進一步針對組構線上側之自由形體作單元化分割，可得下弦次單元構件表面層形體、拱形曲線之曲率半徑長度、其曲線中點與相對原點之距離及單元構件間之角度。</p> |   |
| <p>以下弦主單元構件於自由形體之分割方式，進一步針對組構線下側之自由形體作單元化分割，可得下弦次單元構件表面層形體、拱形曲線之曲率半徑長度、其曲線中點與相對原點之距離及單元構件間之角度。</p> |  |
| <p>藉由電腦模擬自由形體之單元化分割，可得下弦主單元構件及下弦次單元構件於自由形體中之構成形態，並進一步檢視其組成方式。</p>                                  |  |

由類圓拱形體經單元構件長短向定位、主次單元構件單元化分割及數據取得之過程，可知自由形體單元化分割之可行性，並進一步分析歸納三項施作原則，供多向度自由形體單元化分割（表 4-2）及自由形體單元構件製作應用：

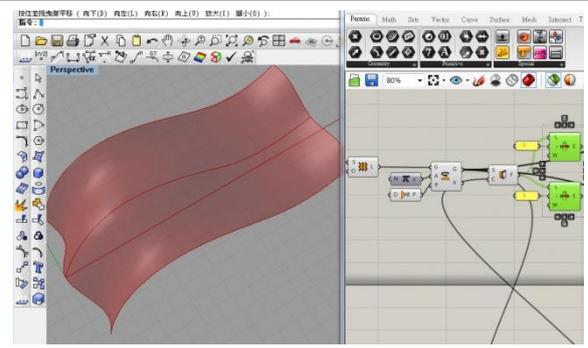
1. 依據自由形體之曲度變化量，定義組構單元構件之長短向位置。由構件之長向對應自由形體曲度變化量較大之向度；而構件形體曲度變化量較小之向度則由單元構件短向對應之，並可配合使用接點墊片輔助單元構件之組合。
2. 下弦次單元構件於自由形體之分割方式與下弦主單元構件相同，故自由形體如由多排下弦次單元構件組成，可沿用主單元構件分割方式，進行次單元構件分割。
3. 本階段之自由形體單元化分割係僅針對表面層之數據取得，其於結構層及單元接合部位則須倚賴單元構件參數化系統取得其構成關係，而其所需之相關數據分別為表面層拱形曲線曲率半徑，及表面層曲線中點與相對原點之距離。

表 4-2 多向度自由形體之單元化分割流程

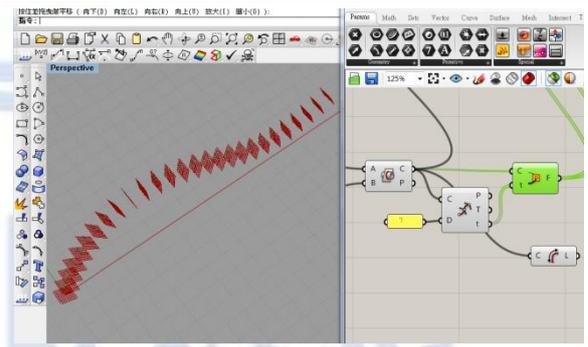
| 型態二：多向度自由形體（五種形態單元構件構成之形體）  |  |
|---|--|
| 說明  | 圖示   |
| 單元構件於自由形體之長短向定位   |  |
| 使用 Rhinocero 系統軟體建置曲線（含上弦、下弦及水平直線三種曲度），並導入 Grasshopper 參數式輔助工具，放樣（Loft）形成自由曲面。                        |  |
| 由前章節單元設計與製造可知，單元構件形體為長寬 30*10cm 之矩形。多向度自由形體於 Y 軸向度之單位彎曲程度較大，故單元構件之排列方式以可乘載大變化量之長向對齊 Y 軸向度；短向對齊 X 軸向度。 |  |

主單元構件於自由形體之單元化分割方式與數據取得

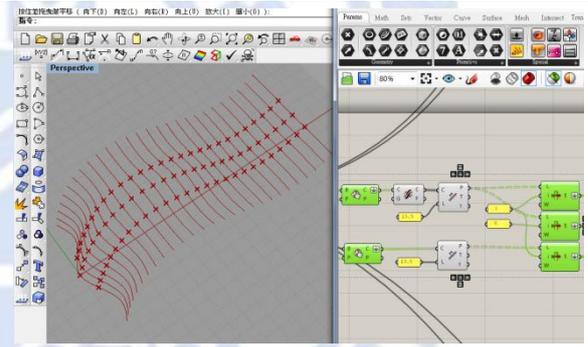
於自由形體單元化分割前，先行制訂單元構件對其 Y 軸向度之組構線，亦即為單元構件長向組構線。



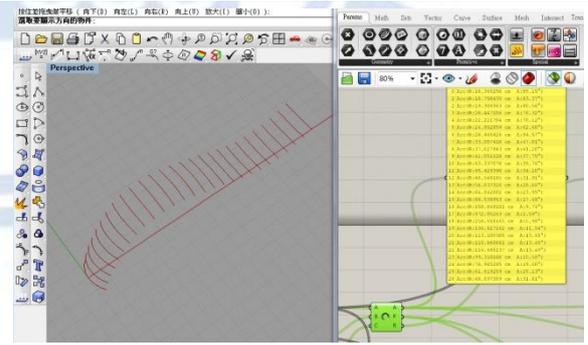
已知單元構件之皮層部位形體趨近於拱形，且寬度 7cm，而拱形曲線之構成，須含拱形曲線二端點及其上之任一點。故於構件長向組構線上以 7cm 為間距進行分割，可得間距分隔點(拱形曲線上之中點)及各點於曲線上之工作平面。



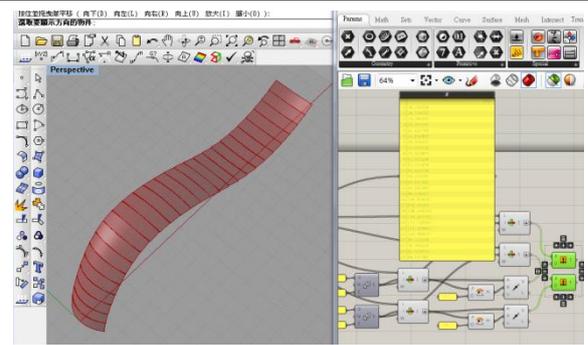
由工作平面與多向度自由形體之交集施作下，可得各點於自由形體上與構件長向組構線垂直之曲線。並已知皮層長度為 27cm，而拱形曲線之二端點，則可由垂直曲線距離組構線 13.5cm 之區位位置得之。



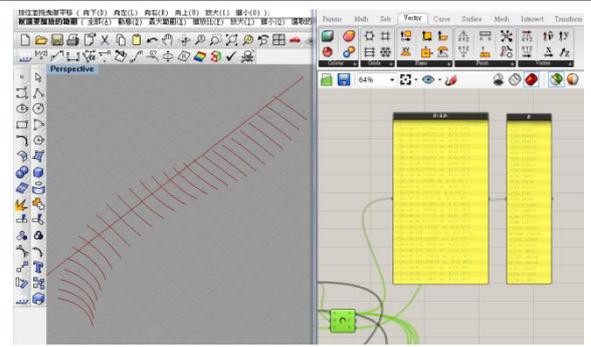
由表面層拱形曲線可知拱弧之曲率半徑與角度，依據數據顯示由左至右，編號 0~16 拱弧為下弦曲度；編號 17 為水平直線；編號 18~26 為上弦曲度。



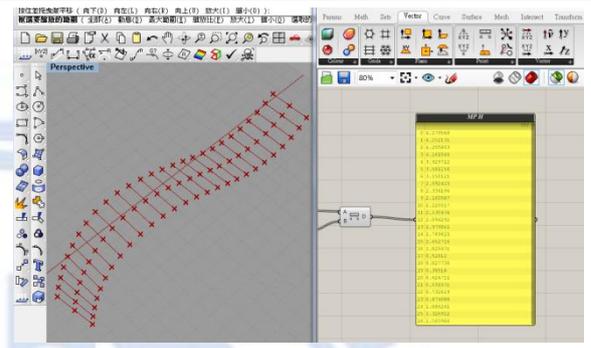
分別以表面層之下弦拱弧、水平直線拱弧及上弦拱弧，沿其垂直向依指定長度 7cm 擠出，便可得皮層部位形體之主單元構件。



形態單元構件包含三種物件，分別為表面層、結構層及單元接合部位，而本階段之自由形體單元化分割係針對表面層之生成，其於二部位則須倚賴單元構件參數化系統生成。

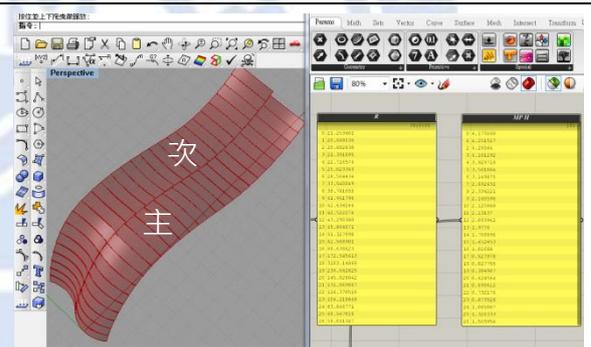


單元構件參數化系統所需之數據，分別為面層拱形曲線之曲率半徑長度、面層曲線中點與相對原點（拱形曲線端點直線距離之中點）之距離，及單元構件間之角度。

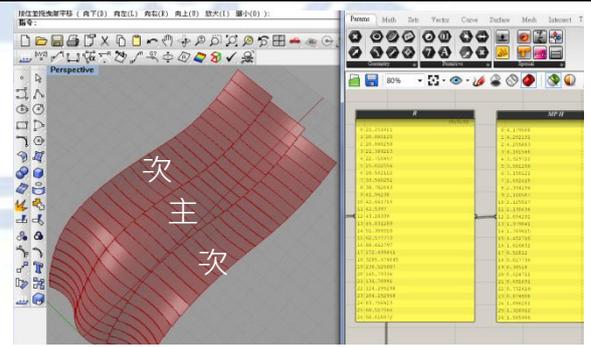


次單元構件於自由形體之單元化分割方式與與數據取得

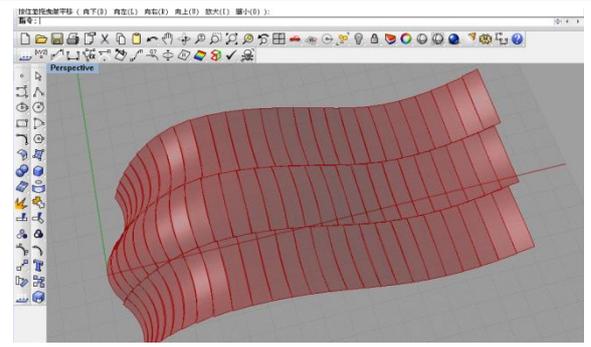
以主單元構件於自由形體之分割方式，進一步針對組構線上側之自由形體作單元化分割，可得次單元構件表面層形體、拱形曲線之曲率半徑長度、其曲線中點與相對原點之距離及單元構件間之角度。



以主單元構件於自由形體之分割方式，進一步針對組構線下側之自由形體作單元化分割，可次單元構件表面層形體、拱形曲線之曲率半徑長度、其曲線中點與相對原點之距離及單元構件間之角度。

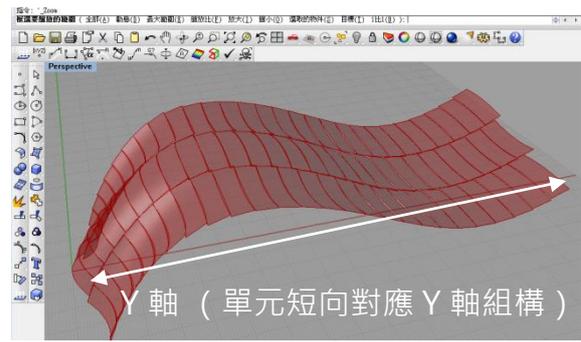


藉由電腦模擬自由形體之單元化分割，可得單元構件於自由形體中之構成形態，並進一步檢視其組成方式。

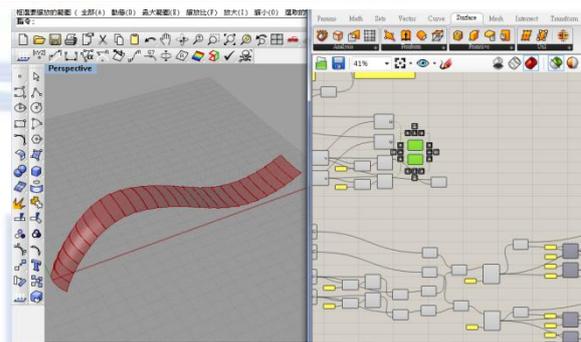


單元構件短向組構之接點墊片生成

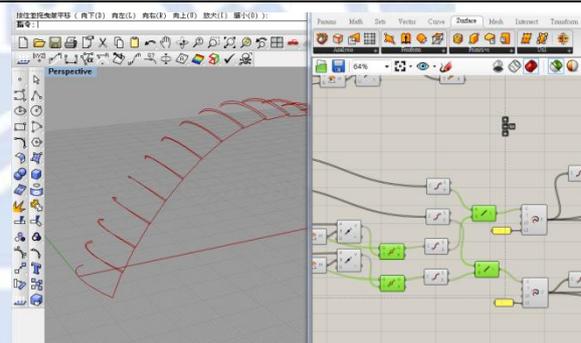
視自由形體彎曲程度而言，X 軸向度自由形體局部彎曲程度較大，單元構件長向對應 X 軸向組構；而 Y 軸向度自由形體局部彎曲程度較小，單元構件短向配合接點墊片對應 Y 軸向組構。



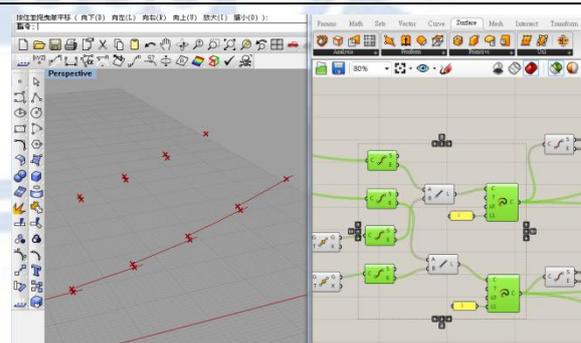
於施作流程上，單元構件沿 Y 軸接合成主架構，而其彎曲程度則由單元間接合之角度與位置控制，故接點套件需承載上述兩項功能。



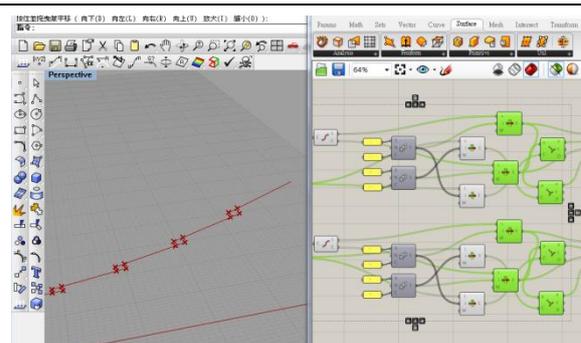
由主架構之單元構件中，擷取各單元構件於 Y 軸向度之邊線，以取得單元間接合之角度與位置。

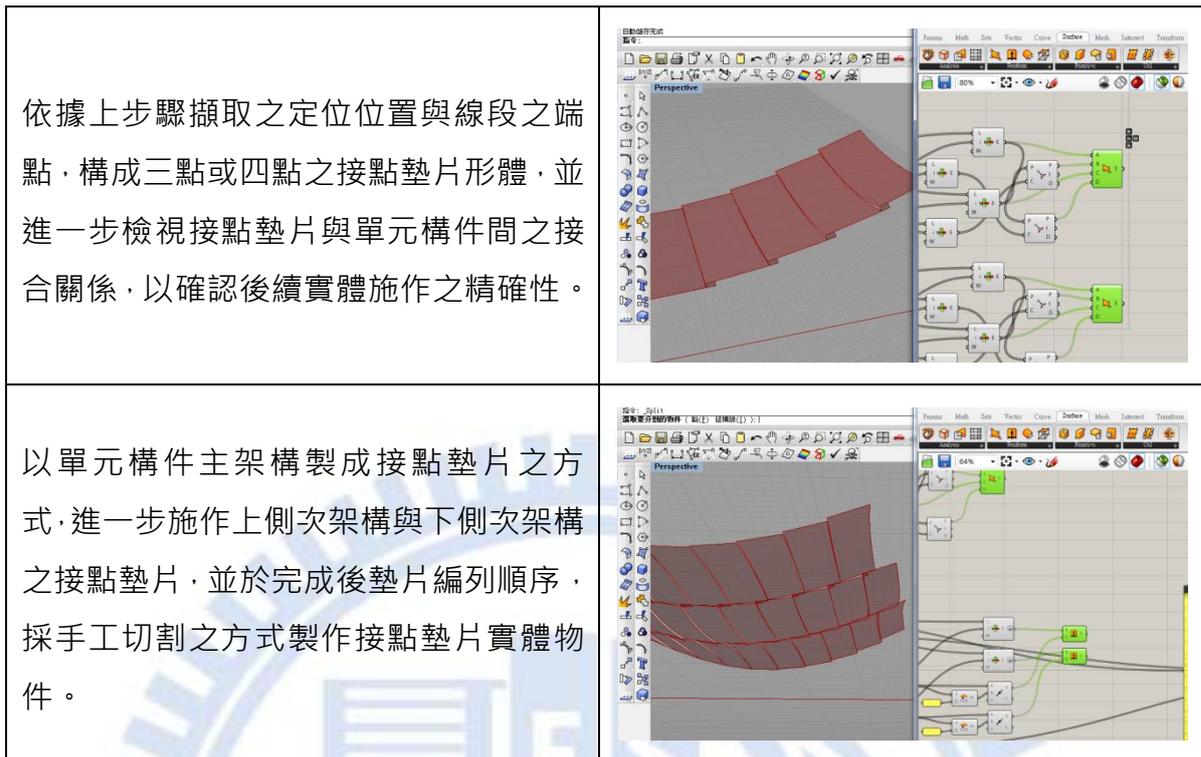


由於單元構件之皮層部位間重疊部位過於狹小，故將表面層下方之曲線加以延伸，增加接點墊片之寬度，以利後續實體施作之便利性。



接點墊片需為三點或四點構成之形體，故由各線段端點對應相鄰曲線，擷取線段上與端點距離最近之定位位置。





## 4.2 自由形體單元構件製作

上述步驟論述可知，自由形體分割為單元構件表面層之組構關係，而其於結構層及單元接合部位則須倚賴單元構件參數化系統取得其構成關係。本階段研討重點為自由形體可否有效以表面層之數據導入單元構件參數化系統，製作結構層及單元接合部位之形體，加以攤平輸出，故選用組構上較為複雜之多向度自由形體，加以進行單元構件製作。

於多向度自由形體單元化分割後之皮層部位數據可知，其數據可分為主架構、上側次架構及下側次架構之三種類型，與本研究於前章節單元設計與研究之參數化系統分類方式相異，故表面層數據於導入參數化系統前，需進一步加以分析定義。

### 4.2.1 表面層數據分析

以表面層相關數據藉由數據變化及電腦模型對照下，需進一步將其數據定義為上弦單元構件、水平直線單元構件及下弦單元構件之三種類型數據（表 4-3~4-5），以利應用於單元構件參數化系統使用，相關皮層部位數據定義如下：

表 4-3 主架構表面層數據之定義與分析

| 編號 | 表面層之曲率半徑   | 曲線中點與相對原點之距離 | 構件分析  |
|----|------------|--------------|---|
| 1  | 18.366158  | 4.841669     | 下弦單元構件<br>曲線中點與相對原點距離介於 0.57~4.84 cm 之間·小於 0~9.1cm。 |
| 2  | 18.750435  | 4.747384     |   |
| 3  | 19.386963  | 4.598607     |   |
| 4  | 20.447106  | 4.369775     |   |
| 5  | 22.221704  | 4.03252      |   |
| 6  | 24.852859  | 3.616906     |   |
| 7  | 28.466426  | 3.167206     |   |
| 8  | 33.007418  | 2.738377     |   |
| 9  | 37.627843  | 2.406288     |   |
| 10 | 41.051128  | 2.207837     |   |
| 11 | 43.337078  | 2.092623     |   |
| 12 | 45.429398  | 1.997162     |   |
| 13 | 48.540185  | 1.870176     |   |
| 14 | 54.037326  | 1.68109      |   |
| 15 | 64.642002  | 1.40654      |   |
| 16 | 88.538963  | 1.027917     |   |
| 17 | 158.848181 | 0.573419     |   |
| 18 | 972.05263  | 0.093743     | 水平直線構件  |
| 19 | 258.666165 | 0.352248     | 上弦單元構件<br>曲線中點與相對原點距離介於 0.35~1.86 cm 之間·小於 0~4.5cm。 |
| 20 | 134.027162 | 0.679576     |   |
| 21 | 113.100305 | 0.805132     |   |
| 22 | 115.060861 | 0.791429     |   |
| 23 | 114.680137 | 0.794085     |   |
| 24 | 99.310168  | 0.916827     |   |
| 25 | 78.985265  | 1.152209     |   |
| 26 | 61.619259  | 1.475644     |   |
| 27 | 48.697389  | 1.864723     |   |

表 4-4 上側次架構表面層數據之定義與分析

| 編號 | 表面層之曲率半徑   | 曲線中點與相對原點之距離 | 構件分析  |
|----|------------|--------------|---|
| 1  | 21.253481  | 4.179168     | 上弦單元構件<br>曲線中點與相<br>對原點距離介<br>於 0.53~4.26<br>cm 之間·小於<br>0~4.5cm。 |
| 2  | 20.888038  | 4.251517     |   |
| 3  | 20.882838  | 4.25544      |   |
| 4  | 21.391095  | 4.161292     |   |
| 5  | 22.716574  | 3.929718     |   |
| 6  | 25.023369  | 3.581084     |   |
| 7  | 28.564434  | 3.149875     |   |
| 8  | 33.540049  | 2.692431     |   |
| 9  | 38.781655  | 2.334221     |   |
| 10 | 41.941796  | 2.160596     |   |
| 11 | 42.634144  | 2.125888     |   |
| 12 | 42.522274  | 2.13137      |   |
| 13 | 43.290388  | 2.093942     |   |
| 14 | 45.864671  | 1.9776       |   |
| 15 | 51.327098  | 1.768896     |   |
| 16 | 62.588901  | 1.452453     |   |
| 17 | 88.638623  | 1.02688      |   |
| 18 | 172.545613 | 0.527978     |   |
| 19 | 3283.14866 | 0.027755     | 水平直線構件  |
| 20 | 236.642825 | 0.384987     | 下弦單元構件<br>曲線中點與相<br>對原點距離介<br>於 0.38~1.57<br>cm 之間·小於<br>0~9.1cm。 |
| 21 | 145.828042 | 0.624564     |   |
| 22 | 131.869867 | 0.690612     |   |
| 23 | 124.370516 | 0.732176     |   |
| 24 | 104.210848 | 0.873528     |   |
| 25 | 83.846771  | 1.085087     |   |
| 26 | 68.547816  | 1.326333     |   |
| 27 | 58.011347  | 1.565954     |   |

表 4-5 下側次架構表面層數據之定義與分析

| 編號 | 表面層之曲率半徑    | 曲線中點與相對原點之距離 | 構件分析  |
|----|-------------|--------------|---|
| 1  | 21.251811   | 4.179568     | 上弦單元構件<br>曲線中點與相<br>對原點距離介<br>於 0.53~4.26<br>cm 之間·小於<br>0~4.5cm。 |
| 2  | 20.885125   | 4.252131     |   |
| 3  | 20.880258   | 4.255863     |   |
| 4  | 21.389213   | 4.161546     |   |
| 5  | 22.716457   | 3.929722     |   |
| 6  | 25.022554   | 3.581256     |   |
| 7  | 28.562112   | 3.150121     |   |
| 8  | 33.540251   | 2.692415     |   |
| 9  | 38.782643   | 2.334194     |   |
| 10 | 41.94238    | 2.160587     |   |
| 11 | 42.641716   | 2.125517     |   |
| 12 | 42.5397     | 2.130434     |   |
| 13 | 43.28339    | 2.094292     |   |
| 14 | 45.831289   | 1.979041     |   |
| 15 | 51.306018   | 1.769615     |   |
| 16 | 62.577773   | 1.452716     |   |
| 17 | 88.642797   | 1.026831     |   |
| 18 | 172.499441  | 0.52812      |   |
| 19 | 3285.474045 | 0.027736     | 水平直線構件  |
| 20 | 236.525007  | 0.38518      | 下弦單元構件<br>曲線中點與相<br>對原點距離介<br>於 0.39~1.57<br>cm 之間·小於<br>0~9.1cm。 |
| 21 | 145.79334   | 0.624711     |   |
| 22 | 131.78991   | 0.691031     |   |
| 23 | 124.295298  | 0.732619     |   |
| 24 | 104.152948  | 0.874008     |   |
| 25 | 83.756423   | 1.086261     |   |
| 26 | 68.517566   | 1.326912     |   |
| 27 | 58.010872   | 1.565966     |   |

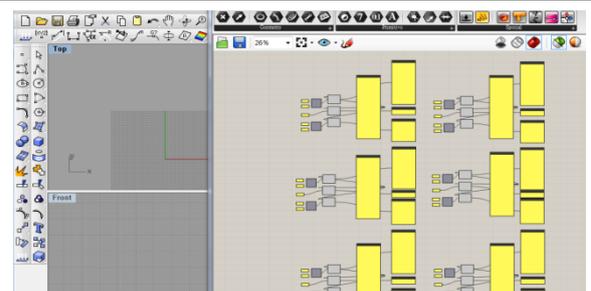
藉由主架構及上、下側次架構表面層數據分析可知，其皮層部位數據可進一步定義為上弦單元構件、水平直線單元構件及下弦單元構件之三種類型，個別單元構件分析如下：

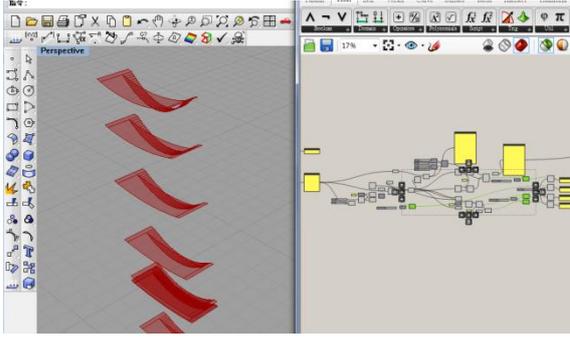
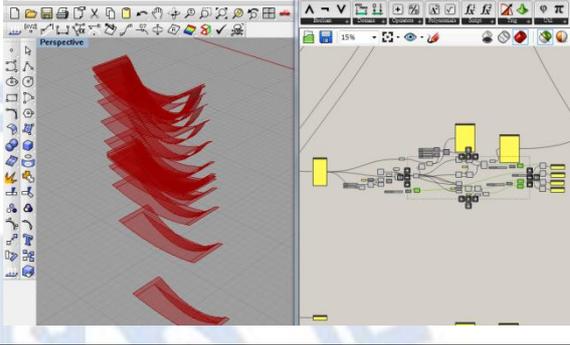
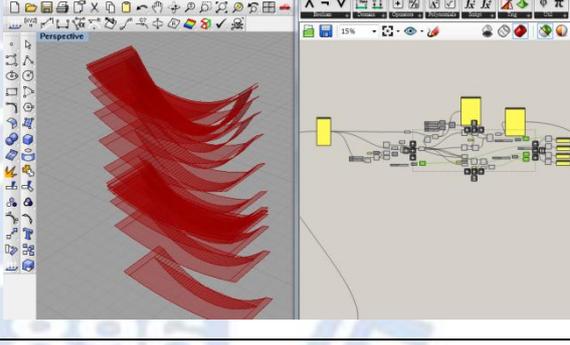
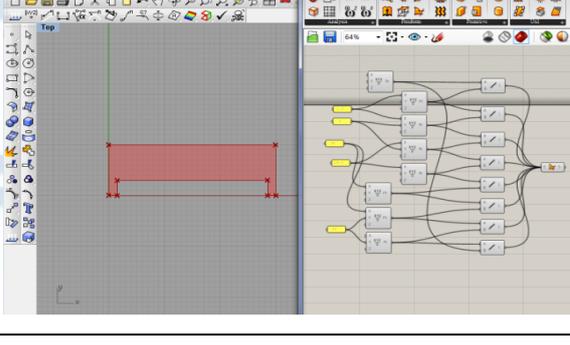
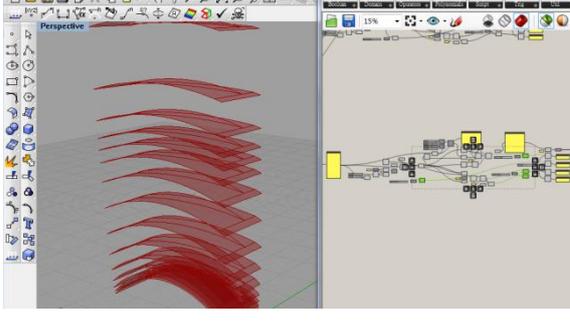
1. 上弦單元構件：依數據顯示，主架構及上、下架構之表面層曲線中點與相對原點之距離，分別介在於 0.35~1.86 及 0.53~4.26 cm 之間，小於上弦單元構件施作表面層之限制 0~4.5 cm。
2. 水平直線單元構件：依數據顯示，主架構及上、下架構之表面層曲線中點與相對原點之距離，分別為 0.093743、0.027755 及 0.027736cm，皆趨近於 0，故定義為水平直線單元構件。
3. 下弦單元構件：依數據顯示，主架構及上、下架構之表面層曲線中點與相對原點之距離，分別介在於 0.57~4.84、0.38~1.57 及 0.39~1.57 cm 之間，小於上弦單元構件施作表面層之限制 0~9.1 cm。

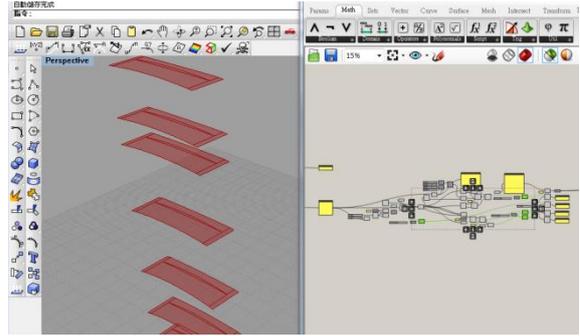
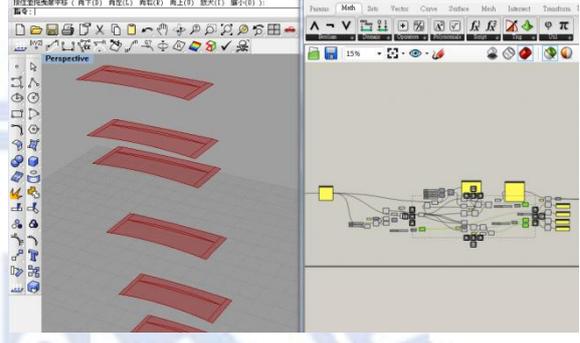
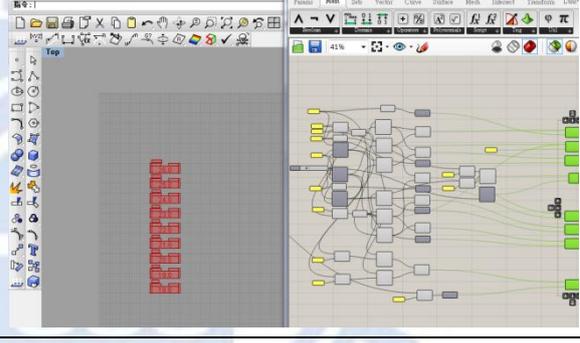
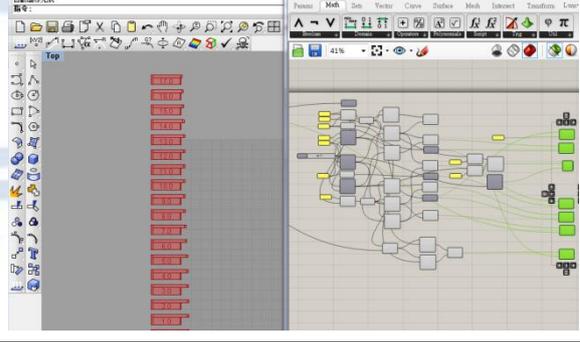
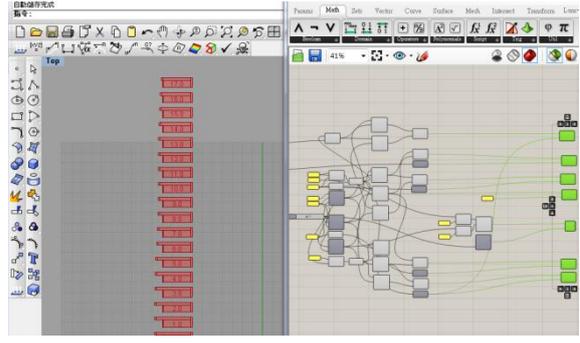
#### 4.2.2 單元構件形體生成與攤平

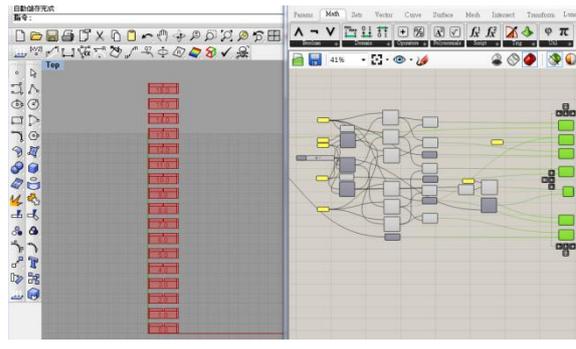
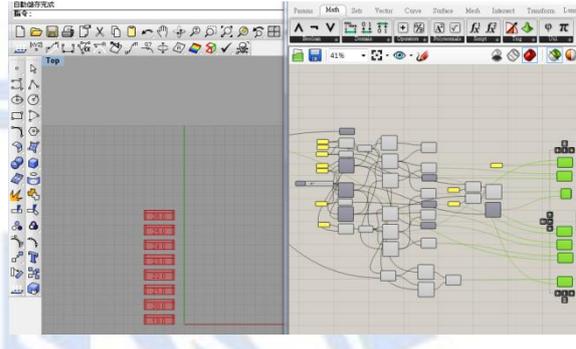
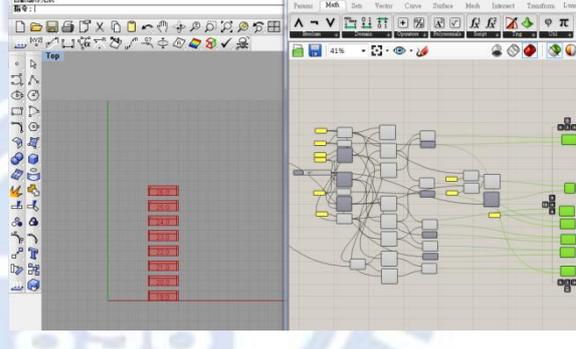
於單元構件中，水平直線單元構件由單獨表面層構成，無結構層長度變化之關係，為純粹平板單元構件，僅需導入參數化系統即可生成之物件；而上弦單元構件及下弦單元構件形態表面層彎曲與結構層長度之關係，則需導入參數化系統生成形態，並進行攤平作業始可生成物件，下列流程將敘述各構架之單元構件導入參數化系統並進行攤平作業方式（表 4-6）：

表 4-6 單元構件導入參數化系統並進行攤平作業之流程

| 單元構件導入參數化系統  |  |
|--|--|
| 說明   | 圖示   |
| 於 Rhinocero 模型製作軟體內，導入 Grasshopper 參數式輔助工具，並將主架構及上、下架構之表面層數據，區分為上弦、下弦及水平直線之三種類型數據。 |  |

|   |  |
|---|--|
| <p>以主架構上弦單元構件之曲率半徑及曲線中點與相對原點距離，導入參數化系統，可得上弦單元構件之表面層、結構層及單元接合部位形體。</p> |    |
| <p>同等方式導入參數化系統，可得上側次架構上弦單元構件之表面層、結構層及單元接合部位形體。</p>                    |    |
| <p>同等方式導入參數化系統，可得下側次架構上弦單元構件之表面層、結構層及單元接合部位形體。</p>                    |   |
| <p>水平直線單元構件由皮層部位構成，無骨結構層長度變化之關係，僅需導入參數化系統即可。</p>                      |  |
| <p>以主架構下弦單元構件之曲率半徑及曲線中點與相對原點距離，導入參數化系統，可得下弦單元構件之表面層、結構層及單元接合部位形體。</p> |  |

|   |  |
|---|--|
| <p>同等方式導入參數化系統，可得上側次架構下弦單元構件之表面層、結構層及單元接合部位形體。</p>  |    |
| <p>同等方式導入參數化系統，可得下側次架構下弦單元構件之表面層、結構層及單元接合部位形體。</p>  |    |
| <p>單元構件攤平作業</p>   |  |
| <p>單元構件尺寸長寬 30*10cm，其中固定值為表面層尺寸 27*7cm、單元接合部位尺寸 1.5*10cm 及結構層寬度 3cm。依參數化系統生成結構層之長度，導入主架構上弦單元構件。</p> |   |
| <p>同等方式依參數化系統生成結構層之長度，導入上側次架構之上弦單元構件。</p>   |  |
| <p>同等方式依參數化系統生成結構層之長度，導入下側次架構之上弦單元構件。</p>   |  |

|   |  |
|---|--|
| <p>單元構件尺寸長寬 30*10cm，其中固定值為表面層尺寸 27*7cm、單元接合部位尺寸 1.5*10cm 及結構層寬度 3cm。依參數化系統生成結構層之長度，導入主架構下弦單元構件。</p> |    |
| <p>同等方式依參數化系統生成結構層之長度，導入上側次架構之下弦單元構件。</p>   |    |
| <p>同等方式依參數化系統生成結構層之長度，導入下側次架構之下弦單元構件。</p>   |   |
| <p>藉由電腦進行單元構件攤平作業，可得個別單元構件於攤平後之構成形態，並進一步檢視其組成方式，以手工切割之方式製成單元構件。</p>                                 |  |

### 4.3 實體生產與組裝

基於前階段依單元構件形式選擇自由形體，針對自由形體進行單元化分割，以獲取表面層之相關數據，進而將其導入參數化系統生成單元構件表面層、結構層及單元

接合部位之形體構成，並於數位軟體中攤平；本階段則以攤平之形體構成，放樣至 4 尺\*8 尺\*5mm 之易可彎木夾板中，採用手工製程方式依序進行單元構件生產、主架構個別單元構件組裝、主架構單元構件之組合、次架構單元構件之組合，及整體檢視自由形體穩定度等步驟，相關敘述如下表 (表 4-7)：

表 4-7 實體生產與組裝流程

| 說明   | 圖示 |
|--|----|
| <b>單元構件形體放樣及生產</b>   |    |
| <p>為增加施作上位置對應之識別性，由上階段攤平作業之單元構件形體導入 AutoCAD 電腦軟體，區分為與下弦單元構件群，並進行編號。</p>  |    |
| <p>以實線與虛線定義個別構件之皮層部位、骨架部位及單元間接合部位位置。實線代表切割線；虛線代表區位分隔線。</p>   |    |
| <p>由上階段可知下弦及水平直線單元構件計 36 枚；主構架上弦單元構件計 9 枚；次構架上弦單元構件計 36 枚。故單元構件 10*30cm 計 45 枚；10* 40cm 計 36 枚；主構架上弦單元構件骨架計 9 枚。</p> |    |
| <p>以上步驟之 4 尺*8 尺原始板材進行規劃分割，取得單元構件之基本構材，進而依個別單元區位分隔放樣至構材上，以利單元構件製程。</p>   |    |

| 主架構個別單元構件組裝  |  |
|--|--|
| <p>依放樣之基本構材進行切割，並區分主架構單元構件之表面層、結構層及單元接合部位，而為達成單元構件自體支承之原則，則以金屬螺栓接合骨架部位，以完成主上弦單元構件之組裝</p> |    |
| <p>對應 AutoCAD 電腦軟體之編號，依序排列主架構上弦單元構件，以確認下階段主架構組合上之個別單元構件施作位置。</p>                         |    |
| <p>依放樣之基本構材進行切割，並區分主架構單元構件之表面層及單元間接合部位，即完成水平直線單元構件之組裝</p>                                |   |
| <p>依放樣之基本構材進行切割，並區分主架構單元構件之表面層、結構層及單元接合部位，而為達成單元構件自體支承之原則，則以金屬螺栓接合骨架部位，以完成主下弦單元構件之組裝</p> |  |
| <p>對應 AutoCAD 電腦軟體之編號，依序排列主架構下弦單元構件，以確認下階段主架構組合上之個別單元構件施作位置。</p>                         |  |

| 主架構單元構件之組合  |  |
|---|--|
| <p>於主架構之組構上，需保持形體外觀完整並趨近於平順，以單元構件間表面層曲線之中點為參考點進行組構，減少單元構件組構細縫之產生。</p> |    |
| <p>於接點墊片輔助下，固定主架構單元架構側向之曲度，以確保自由形體組構上之精準度。</p>                        |    |
| <p>依編號順序組構上弦主單元構件、水平直線單元構件及下弦主單元構件，以完成主架構單元構件之組裝。</p>                 |   |
| 次架構單元構件之組合  |  |
| <p>自由形體單元構件組構中，應產生以最少之接合點，而單一接點需承載四種物件之接合，分別為相鄰主架構與次架構之表面層與結構層。</p>   |  |
| <p>於安裝次架構之單元構件時，需反覆對照電腦 3D 模型與配合使用接點墊片，以達成自由形體上、下側次構架之組構。</p>         |  |

| 整體檢視自由形體穩定度   |  |
|---|--|
| <p>自由形體於結構上則需符合自體支承之原則，故以形體四個向度單獨站立之方式，測試物件承載自重之結構穩定性。此向度係以次架構邊緣曲線為站立支點，表面層向外；結構層向內方式，測試物件承載自重之結構穩定性。</p> |    |
| <p>此向度係以結構層側作次為站立支點，表面層向上；結構層向下方式，測試物件承載自重之結構穩定性。</p>   |    |
| <p>此向度係以次架構邊緣曲線為站立支點，表面層向內；結構層向外方式，測試物件承載自重之結構穩定性。</p>  |   |
| <p>此向度係以表面層側作次為站立支點，表面層向下；結構層向上方式，測試物件承載自重之結構穩定性。</p>   |  |

#### 4.4 討論

由上述流程於「自由形體單元化分割」、「自由形體單元構件製作」與「實體生產與組裝」階段施作下可驗證外骨骼構造之初步自由形體製造流程可行性；而於自由形

體設計上之論述，沿用現有自由形體設計與施作流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，可進一步建立外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程，有關製造流程之分析如下：

#### 1. 自由形體單元化分割：

本階段依據施作順序可分為四步驟，分別為「單元構件於自由形體之長短向定位」、「主單元構件於自由形體之單元化分割方式與數據取得」、「次單元構件於自由形體之單元化分割方式與數據取得」與「單元構件短向組構之接點墊片生成」。

#### 2. 自由形體單元構件製作：

本階段依據施作順序可歸納為三步驟，分別為「表面層數據分析」、「單元構件形體生成」與「單元構件攤平」。

#### 3. 實體生產與組裝：

本階段依據施作順序可歸納為五步驟，分別為「單元構件形體放樣及生產」、「主架構個別單元構件組裝」、「主架構單元構件之組合」、「次架構單元構件之組合」與「整體檢視自由形體穩定度」。

#### 4. 綜合討論：

基於自由形體製造流程之各階段歸納分析下，並沿用現有自由形體設計與施作流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，可進一步建立外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程（圖 4-2）：

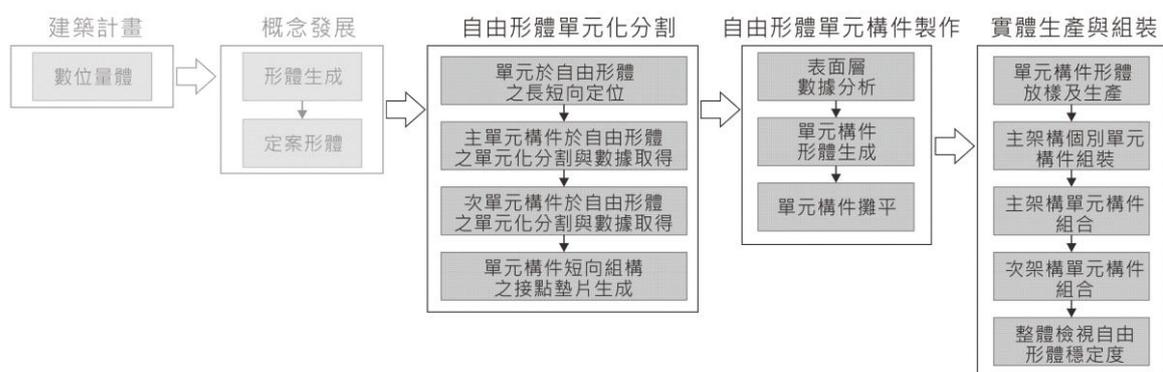


圖 4-2 外骨骼構造之初步自由形體數位設計與製造流程

## 第五章 結論

### 5.1 研究結論

本研究著重探討外骨骼構造之單元構件設計與自由形體製造流程，藉由沿用現有自由形體設計流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，可發展出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。而本文數位製造方法可分為二個階段：階段一為依單元構件之概念建立外骨骼構造之原型，並建置參數化系統；階段二即進而提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。研究之結果可分為「單元構件設計」與「數位設計建造」兩方面論述（圖 5-1），敘述如下：

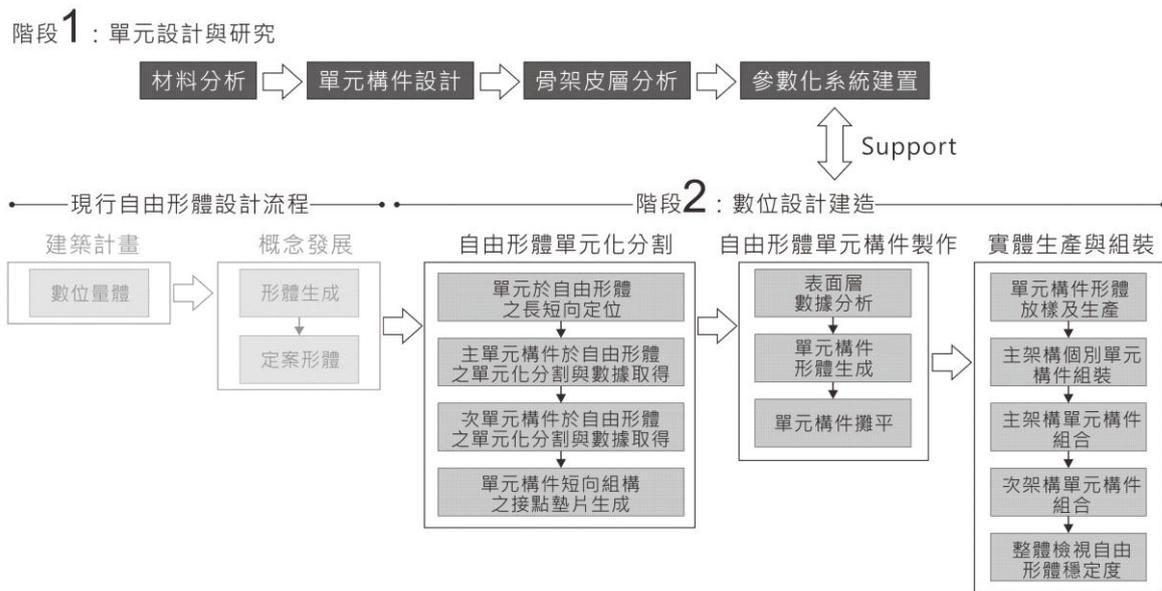


圖 5-1 單元構件設計步驟與初步自由形體數位設計製造流程

「單元構件設計」係以外骨骼構造為基礎，配合材料性質分析與利用其既有材質可彎曲原理，設計單元構件原型，並將其組構為自由形體之方式，透過實體單元構件製造及組裝過程中，檢視單元構件於材料上之適用性，並由過程中測試的結果探究單元構件本身與其組構上之問題，進一步分析歸納單元構件之構成關係，以應用數位媒材完整記錄並建置參數式系統，使其製作之流程更加精準。此驗證過程可了解單元構

件適用之處及其組構之原理。

「數位設計建造」係以外骨骼構造為基礎，由單元構件設計所發展出之組構概念，以實體製作 1:1 模型之方式，將各階段施作過程加以記錄，驗證單元構件對應於自由形體之組構可行性，並於沿用現有自由形體設計流程之「建築計畫」與「概念發展」階段，進一步提出外骨骼構造之初步自由形體設計與製造流程。

CAD/CAM 技術的便捷性解放了設計與建造的極限，自由形體數位設計與製造流程更使數位設計達到另一個展新的境界，同時也是一條創新的道路，一條使設計者自由創作的思維能藉由建築實現無限可能的道路。

## 5.2 研究貢獻

近年來 CAD/CAM 技術之應用已成為自由形體數位設計與製造之主流，本研究透過一系列的整合研究分析與驗證步驟，由外骨骼構造中發展出單元構件之設計與參數化系統製程，並進一步以單元構件之新原型對應於自由形體上，制訂其初步數位設計與製作流程。本文針對研究問題之「外骨骼構造之單元構件設計方法與步驟」、「外骨骼構造之自由形體設計與製造流程」與「數位媒材應用」，進一步歸納三者影響後續發展之內容與方式，相關敘述如下：

### 1. 外骨骼構造之單元構件設計方法與步驟：

本研究於外骨骼構造自由形體之思維下，建立了單元構件數位設計的方法與步驟，其中包含「材料分析與檢討」、「單元構件設計」、「單元構件表面層與結構層分析」及「參數化系統建置」之四階段。此種設計方法與步驟可提供設計者有效設計案例，進而發展出更多數位設計方法與構成自由形體之新可能性。

### 2. 外骨骼構造之自由形體設計與製造流程：

本研究採用模矩化單元構件之形體原型，以實體製作 1:1 模型之方式，建構「自由形體單元化分割」、「單元構件製作」及「實體生產與組裝」之系統流程，並配合沿用現有自由形體設計流程之「建築計畫」與「概念發展」

階段，建構外骨骼構造之自由形體初步數位設計與製造流程上。此流程提供設計者與施工單位於應用自由形體上，以更為便捷之方式施作木構自由形體，減低 CAD/CAM 技術流程施作下耗材之產生，亦減少材料之使用降低施作成本，配合市場機制使木構自由形體設計與施作流程更易於普遍應用。

### 3. 數位媒材應用：

本研究針對設計之單元構件，以一系列之分析研究，歸納單元構件於材料使用上，個體骨架部位與皮層部位之組構關係，並以其分析之數據鍵入數位軟體中建置參數式系統模組，於自由形體之建構上，提供施工單位數位化製程模組，以相關數據導入單元構件參數式系統模組後，便可取得單元構件形式，可有效大量生產製造。

## 5.3 研究限制與未來研究

依據本研究之結果，於材料性質與尺寸之選擇、單元構件設計與自由形體數位製造流程方面，可歸納整理出研究之限制，種種議題則需要更為長遠之研究計畫以進行釐清，進而提高單元構件應用範圍，成為更為有效與實際之構築方式，以供空間設計之應用。相關限制及未來研究如下：

### 1. 材料性質與尺寸之選擇：

#### (1) 研究限制：

本研究於材料種類、性質、尺寸與價格之選擇上，係採用具自體可彎曲彈性之易可彎夾板，此材料以 4 尺\*8 尺\*5mm 之尺寸於市場使用率較高，但市場使用性與普遍施作物件之尺度有極大之關係，如增加施作物件之尺寸，勢必於材料之選擇上需採用自體結構性與耐候性較高之材料性質與尺寸，故本研究未完整考量自由形體於空間使用上之性質及其尺度。

#### (2) 未來研究：

未來研究將以此定位為中小尺度木構自由形體之範例，進一步考量自由形體於空間使用上之性質及其尺度，定義單元構件與材料性質尺寸之關係，以提高單元構件設計，與其對應於自由形體數位設計製造流程之實踐性。

## 2. 單元構件設計：

### (1) 研究限制：

於單元構件設計上，本研究依自由形體之構成，分別設計上弦單元構件、水平直線單元構件及下弦單元構件之三種類型，而由單元構件設計整合分析中可知其限制為，上弦單元構件皮層部位曲線中點與原點之距離介在於 0~4.5cm 之間；而下弦單元構件則依皮層部位曲線中點與原點之距離，大於曲線端點與原點之距離時，皮層形體脫離可分析之形體。

### (2) 未來研究：

未來研究於單元構件設計皮層部位形體之整合分析上，可跳脫拱形與懸鍊線形之限制，進一步明確歸納單元構件皮層部位與骨架部位之關係，以提高單元構件之應用性。

## 3. 自由形體數位製造流程：

### (1) 研究限制：

A. 於自由形體單元化分割上，自由形體形式係依據單元構件矩形形體，其外圍曲線與曲線間之角度趨近於正交，故於單元構件組構後可完整呈現自由形體之形態。但如以自由形體設計與施作流程中，以其形體為起始進而分割單元化，其自由形體外圍曲線與曲線間之角度未必趨近於正交，而形體之尺寸亦未必為本單元構件可整除之倍數，則藉由單元構件構成之自由形體，無法完整呈現設計中自由形體之形態。

B. 於實體生產與組裝上，本研究礙於時程進度未將初步數位設計與建造流程，推導至 CAM 實體施作流程上，進而外骨骼構造之自由形體數位設計製造流程。

### (2) 未來研究：

A. 未來研究將以單元構件組構為基礎，進一步研究自由形體單元化分割下，形體邊界與單元構件之組成關係。

B. 未來研究將以此初步數位設計與建造流程，進一步進行 CAM 實體施作流程，於電腦輔助製造下，歸納並記錄自由形體實體生產與組裝之成果，以提出完整外骨骼構造之自由形體數位設計製造流程。

### 參考文獻：

- Friedman, M. (ed). 2002. Gehry Talks: Architecture + Process. New York, NY: Universe Publishing.
- Glymph, J., Shelden, D., CECCATO, C., MUSSEL, J. AND SCHOBBER, H. 2004. A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets. Automation in Construction 13. pp.187-202.
- Griffith, Kenfield; Sass, Larry and Michaud, Dennis 2005, A strategy for complex-curved building design: Design structure with Bi-lateral contouring as integrally connected ribs.
- Groover, M. P. and Emory W. Zimmers, J. 1984. CAD/CAM Computer-aided design and manufacturing . Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-hall Inc.
- Kocaturk, T., Veltkamp, M. and Tuncer, B. 2003. Exploration of Interrelationships between Digital Design and Production Processes of Free-Form Complex Surfaces in a Web-Based Database. CAAD FUTUTE. Tainan, Taiwan. Kluwer Academic. pp. 445-455.
- Kolarevic, B. 2001. Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. ACADIA 20. New York: Buffalo. pp. 268-278.
- Kolarevic, B. 2003a. Architecture in the Digital Age: design and manufacturing. New York: Spon Press.
- Kolarevic, B. 2003b. Design fabrication: from digital discourse. Indianapolis, Indiana. U.S.A. Bookmaster, Inc. pp. 54-55.
- Lee, Y. Z. 2005. A study on the process of free form design and construction. Hsinchu, Taiwan.
- Lim, C. K. 2007. A better digital design and construction process using CAD/CAM media. Hsinchu, Taiwan.

- Lin, C. Y. 1999. The representing capacity of physical models and digital models' . CAADRIA. pp. 53-62.
- Lindsey, 2001 B. Lindsey, Digital Gehry: material resistance digital construction, Birkhäuser,
- Liu, Y. T. (ed.): 2001, Defining Digital Architecture 2000 FEIDAD Award, Birkhäuser, Berlin.
- Liu, Y. T. and Lim, C. K.2008 New tectonics: a preliminary framework involving classic and digital thinking
- Liu, Y. T. 1996. Understanding of Architecture in the Computer Era. Taipei: Hus.
- Luca, F. D. and Nardin, M. 2002. Behind the Scene: Avant-garde Techniques in Contemporary Design. Basel, Boston, Berlin: Birkhauser.
- Lynn, G. 1995. Folding in architecture: John Wiley & Sons.
- Million, H. A. 1994. The Renaissance from Brunelleschi to Michaelangelo. New York: Rizzoli.
- Mitchell, W. J. and McCullough, M. 1995. Digital Design Media. New York: John Wiley & Sons.
- Mitchell, W. J.1977, Computer-Aided Architectural Design. New York: John Wiley & Sons.
- Mitchell, W. J.:1998.a, Antitectonics : The Poetics of Virtuosity, In. J. Beckmann, (ed), The Virtual Dimension: Architecture, Representation and Crash Culture, Princeton Architectural Press, New York, pp.205-217.
- Mitchell, W. J.:1998.b, Articulate Design of Free-Form Structures, In I. Smith, (ed), Artificial Intelligence in Structural Engineering: Information Technology for Design, Collaboration, Maintenance, and Monitoring, Springer Verlag, Berlin. pp.223-234.
- Mitchell, W. J. 2004. Beyond the Ivory Tower: Constructing complexity in the digital age. Science and Society. Ryder, G., Ion, B., Green, G., Harrison, D. and Wood, B. 2002. Rapid design and manufacture tools in architecture. Automation in Construction. 11: pp.279-290
- Ryder, G., Ion, B., Green, G., Harrison, D. and Wood, B. 2002. Rapid design and manufacture tools in architecture. Automation in Construction. 11: pp. 279-290.
- S. Bengtson (2004). "Neoproterozoic- Cambrian Biological Revolutions", *Paleontological*

*Society Papers* 10: 67–78.

Steiner, R. 2003. *Architecture - An Introductory Reader*. The Square, Forest Row: Rudolf Steiner Press.

Sapaun, S.M., 2005, " Concurrent design and manufacturing process of automotive composite components" , *Assembly Automation*, pp.146-152

Schmiedhofer ,H. 2008. *Design and Panelization of Architectural Freeform-Surfaces by Planar Quadrilateral Meshes*.

Schon, D. A. and Wiggins, G. 1992. Kinds of seeing and their functions in designing. *Design Studies*. 13(2): pp.135-156.

Seely, J. C. 2004. *Digital fabrication in the architectural design process*. Master Thesis. MIT.

Shelden, D, (2003), " Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry's Architecture." Diss. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2003

Turkiyyah, G.M ,1997,An accelerated triangulation method for computing the skeletons of free-form solid models.

Welch, W. and Witkin, A. 1994, *Free-Form Shape Design Using Triangulated Surfaces*

Zevi, B. 1981. *The modern language of architecture*: Van Nostrand Reinhold. 2.1.1. pp. 12

劉育東. (ed.): 2006. *數位建築與東方實驗*

### 參考網站：

Dragon Skin Pavilion - <http://www.archdaily.com/>

Enneper Loop - <http://prototypingideas.blogspot.tw/2011/03>

Teagloo - <http://procedural-architecture.net/>

New Prosthesis: Bent Wood Exoskeletons - <http://www.joelletkemann.com/>

Plywood - [http://interiordesignidea4u.blogspot.tw/2009/07/blog-post\\_19.html](http://interiordesignidea4u.blogspot.tw/2009/07/blog-post_19.html)