

第三章 案例研究

如第一章所述，李元榮(2005)從幾小個型室內設計案—公信大廳設計、銘傳新藝術中心、北美館遠東建築獎數位展區、竹北大廳櫃檯先推論與驗證出「小型自由形體設計與建造過程」，再基於此過程操作一個中型的室內設計案例—深圳大連電子大廳設計，來驗證與修正過程中的步驟。由於他參與執行這些設計案例的設計與建造過程，因此可以從完整與大量的資料中進行分析，最後歸納出一個「初步自由形體設計與建造過程」(圖 3-1)。但此過程比較偏重於建構階段的操作步驟，而且僅有台灣與大陸設計案例所整合，但由於本研究目的是希望可以提出一個從設計到建造所有階段(建築計畫、概念發展、設計發展、細部設計與施工圖、數位建構)應用 CAD/CAM 媒材的完整過程，因此，如第一章所述，將在此章節分析國際案例利用 CAD/CAM 技術輔助自由形體設計與建造之過程。

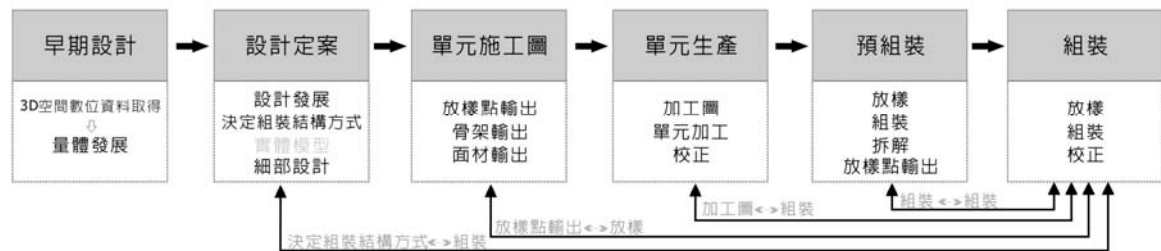


圖 3-1 「初步自由形體設計與建造過程」(李元榮, 2005)

3.1 案例選擇

對於自由形體設計案例的選擇，因為目前具有從設計到建造完整公開資料的案例並不多，因此本研究選擇的案例較少，但選擇上都挑選較常被研究者討論 CAD/CAM 應用的代表性案例。本研究挑選四個國際自由形體設計案例，作品規模包含大型自由形體建築及小型室內自由形體設計案。

首先選擇了國際知名的美國建築師 Frank Gehry 的設計案來分析，主要是因為 1992 年他運用 CAD/CAM 技術的輔助，成功在巴塞隆納製作出形體自由的魚型雕塑，此後他吸取了運用數位工具設計與製作魚型雕塑的經驗，開始大量運用 CAD/CAM 媒材建造出許多自由形體建築作品，最知名的代表作為西班牙畢爾包古根漢美術館。本研究挑選了他建築作品中不同規模的兩個案例，來分析他運用 CAD/CAM 技術輔助設計與建造的過程：

1. 建築設計案，畢爾包古根漢美術館，畢爾包 1991-1997 (圖 3-2)
2. 室內設計案，Conde Nast 咖啡廳，紐約 1996-2000 (圖 3-3)



圖 3-2 畢爾包古根漢美術館



圖 3-3 Conde Nast 咖啡廳

除了 Gehry 外，另外挑選了專長於新媒材及參數設計的德國建築團隊 ABB Architekten 合夥人 Bernard Franken 的設計案，因為他於 1999~2001 年連續三年都為 BMW 汽車公司設計自由形體的汽車展示館(BMW pavilion)，而且都是利用 CAD/CAM 新媒材輔助整個設計與建造過程，其中包含了室內裝置到戶外的建築形體，他嘗試利用不同材料製作自由形體，因此對數位媒材的操作與運用也很熟悉。本研究挑選了他所設計的 BMW pavillion 其中兩個設計案來分析他的數位設計過程：

1. 室內設計案，「波浪」展示館 (“Wave” Pavillion)，慕尼黑 1999-2000 (圖 3-4)
2. 建築設計案，「動態形體」展示館 (“Dynaform” Pavillion)，法蘭克福 2001 (圖 3-5)



圖 3-4 「波浪」展示館



圖 3-5 「動態形體」展示館

3.2 案例分析

3.2.1 畢爾包古根漢美術館

此設計案基地位於西班牙畢爾包一個河岸邊的工業都市的入口處，因此有「城市的入口」之稱。1991 年 Gehry 從競圖贏得設計，1993 年開始建造，1997 年 3 月完工。設計面積為 26,000m²，是一棟包含了三種不同展示空間(永久性典藏展示空間、臨時展示空間、定期藝術家展示空間)、可容納 300 人演講廳、餐廳及店面的大型美術館。Gehry 選用了耐久性的鈦金屬(titanium)及玻璃帷幕作為主要自由形體的外牆材料，另外對於底層方形建築外牆則採用西班牙的石灰石(limestone)，讓美術館看起來有如一座大型雕塑品。對於此大型複雜形體結構與流線型外牆的建造，他大量依賴 CAD/CAM 技術來輔助，以下分析其設計與建造過程。

建築計畫

Gehry 看完基地及跟業主溝通後，就開始快速勾勒出規畫草圖(圖 3-6)來決定設計配置；同時也製作量體模型(圖 3-7)。在此階段中，他著重於設計量體與環境之間的關係，考慮如何將設計配置於具有河川，道路，及都市空間的基地涵構中。當量體配置計畫定案後，才會開始設計概念發想。

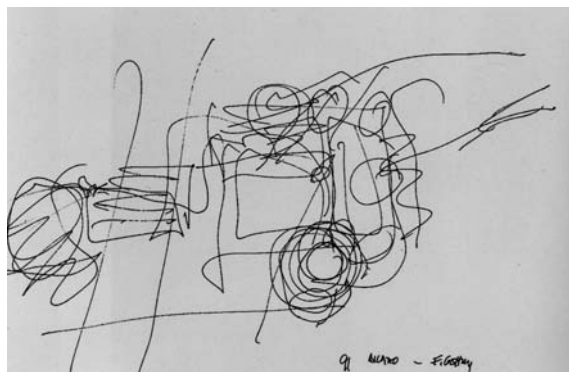


圖 3-6 規劃草圖 (1991)

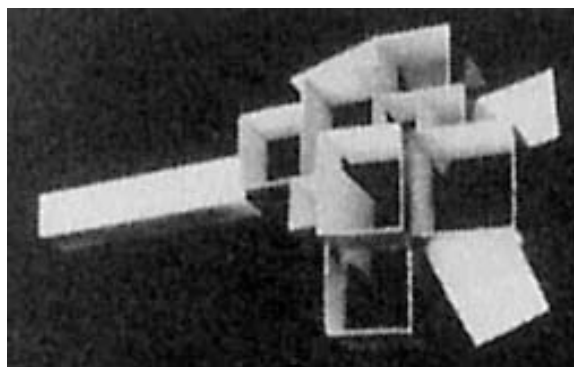


圖 3-7 量體模型

概念發展

Gehry 用大量的手繪草圖及實體模型進行設計的概念發展。他的草圖都是快速勾勒出來的，可以從自由的線條中看出他對設計形體的構想，如圖 3-8 中的螺旋狀的斜坡道與高塔之帆船造型及圖 3-9 草圖呈現他希望美術館立面具有漂在河上的船之意象。同時他也從定案後的量體模型發展出基於設計構想的形體，為了可以快速及容易製作複雜曲面形體，Gehry 選用厚的水彩紙來製作草模型(圖 3-10)。從這些構想草圖及模型，再加上他的一些姿勢或動作，Gehry 與事務所的主要設計師(Edwin Chan)溝通設計想法，再交由他們製作設計整體的實體模型。圖 3-11 為概念發展定案後製作的模型，也是 1991 年參加競圖時的模型。

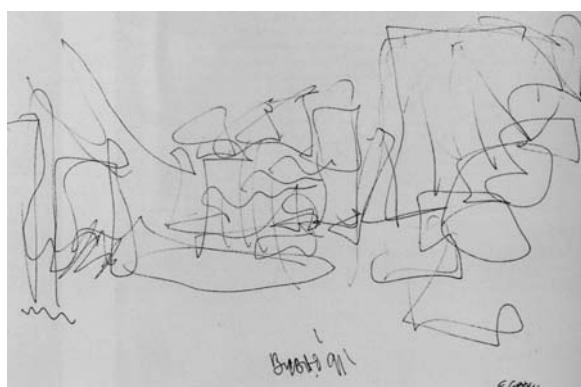


圖 3-8 草圖呈現螺旋狀斜坡道及帆船型(1991)

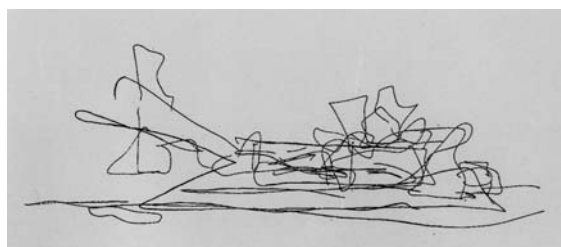


圖 3-9 草圖呈現船意象之立面

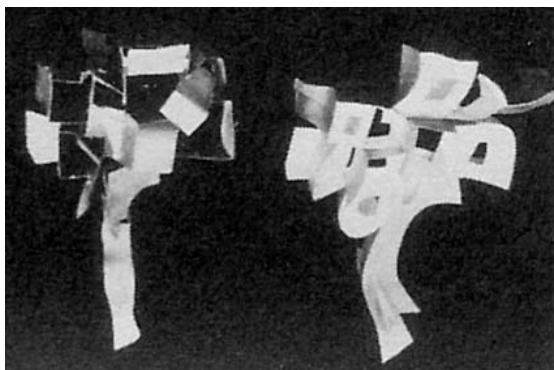
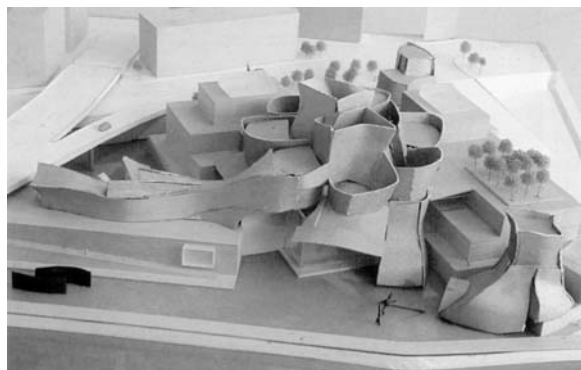


圖 3-10 紙作構想模型圖



3-11 手工實體模型(1991)

設計發展

Gehry 開始應用數位媒材輔助此階段的設計發展，他將概念設計定案後的所做的實體模型(圖 3-11)利用 CAD/CAM 技術數位化成 CATIA 數位模型進行電腦編修。數位化過程先用 3D 點觸式掃描器將所有實體模型的曲面資料輸入(圖 3-12)，再將掃描器所儲存的點雲資料轉成 CATIA 曲面模型(圖 3-13)，Gehry 為了要檢視所輸入的數位模型與當初的手作模型之間的精準性，再將曲面編修及順滑的後 CATIA 模型，由 CAM 技術的 CNC milling 直接輸出成精準的實體模型(圖 3-14)。由於 CNC milling 可以快速製作精準的實體模型，從圖 3-15 中大量的 CNC 實體模型可見，不管是對於整體或局部形體，Gehry 反覆在 CAD 虛擬模型與 CAM 實體模型中發展設計，模型的使用在此階段中佔了非常重要的角色，主要設計過程如圖 3-16 所示。

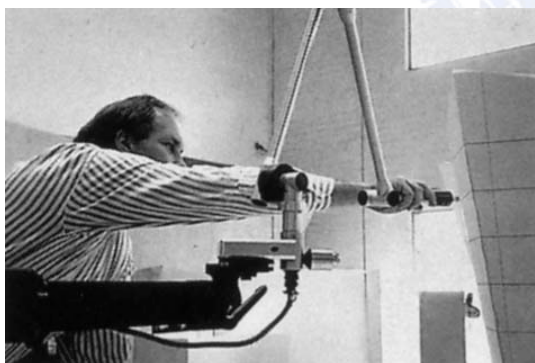


圖 3-12 利用 3D 點觸式掃描器將實體模型輸入電腦

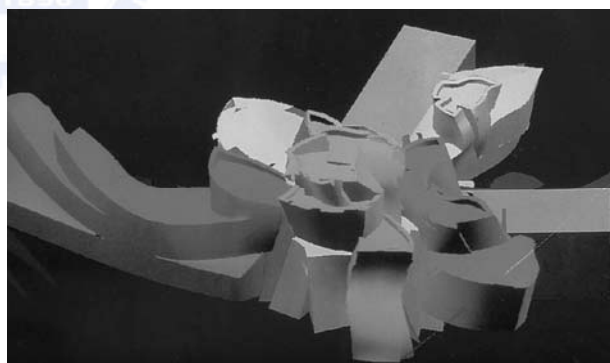


圖 3-13 CATIA 模型

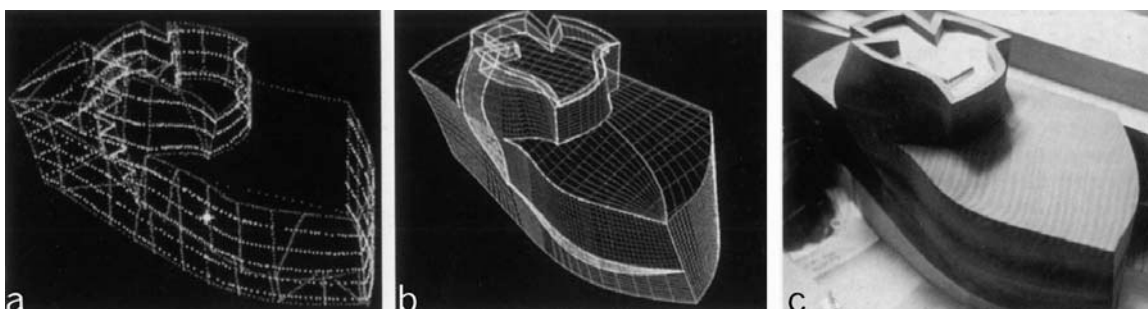


圖 3-14 數位化模型製作過程 (a: 掃描點雲資料, b: CATIA 曲面模型, c: CNC milling 模型)



圖 3-15 整體或局部的 CNC milling 模型

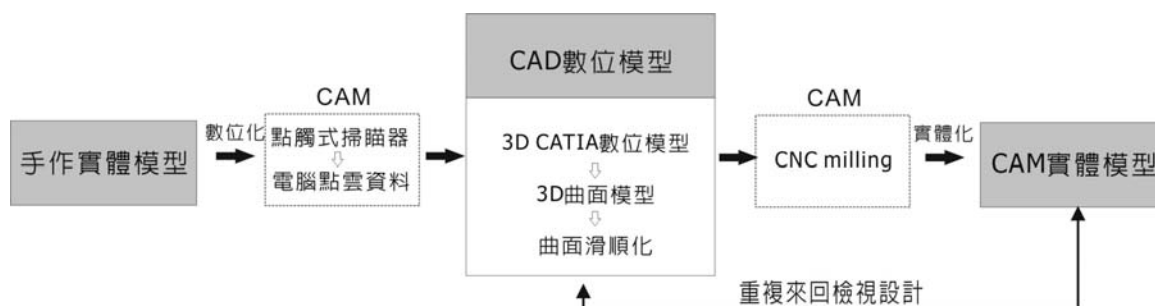


圖 3-16 「設計發展」階段 CAD/CAM 操作過程

一向用傳統手繪草圖呈現思考的 Gehry 從電腦 CATIA 模型呈現的複雜自由線條圖中，看出他概念發展階段所勾勒的線條與設計形體(圖 3-17, 3-18)，他認為藉由數位媒材的輔助，設計可以從草圖到設計發展達到一致性，甚至到最後的建造。由於設計形體複雜，主要設計圖面都直接由包含了許多資訊的 CATIA 數位模型輸出，Gehry 在輸出的圖面上進行修改。反覆檢視及調整設計後，最後從定案的 CATIA 主要模型(圖 3-19)，製作定案的設計模型(圖 3-20)。

除了形體發展外，Gehry 也從 CAD/CAM 技術輔助設計發展的過程中，更精準掌控了設計預算，他從一開始用掃描器輸入曲面資料時，就開始計算施做所需用到的材料面積與費用，加上這些元件都是直接數位制作，更讓他可以精確掌控設計所需的經費。同時在 CAD/CAM 模型製作過程中，複雜曲面進行合理化再製造，也讓 Gehry 從中思考未來施作的方式。

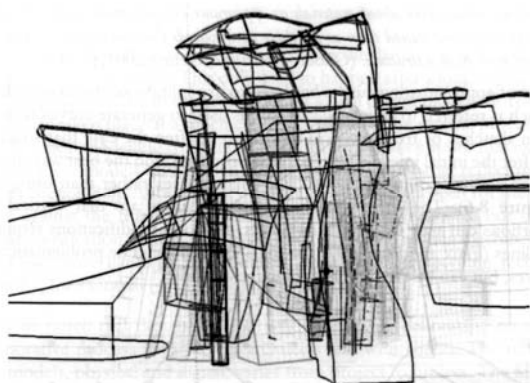


圖 3-17 CATIA 數位模型線條與草圖相似

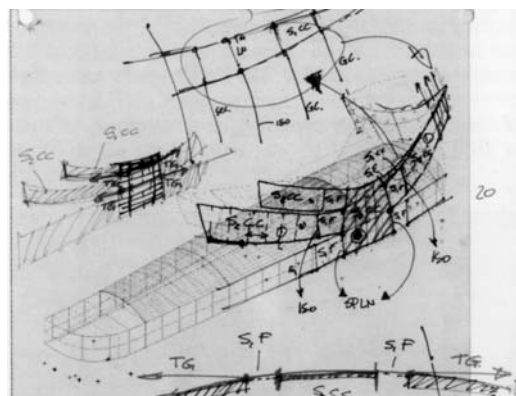


圖 3-18 Gehry 於輸出圖面上做修改

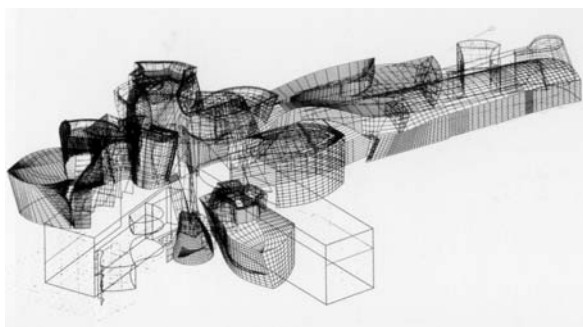


圖 3-19 設計定案 CATIA master model

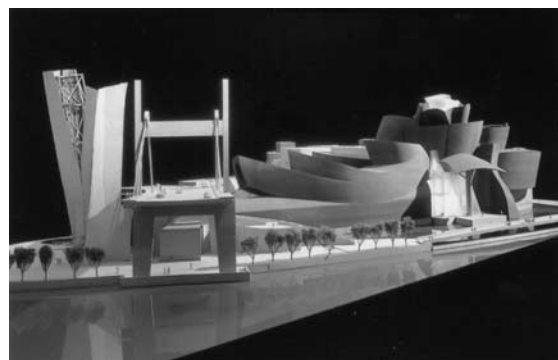


圖 3-20 設計定案 CAD/CAM 模型

細部發展與施工圖

當設計定案後，Gehry 事務所將 CATIA 主要模型(圖 3-17)交由施工單位的廠商進行分析與製作細部施工圖面。由於形體過於複雜，整座 24000 平方米面積龐大的建築物沒有兩個結構元件是一樣的，如果沒有 CATIA 模型中所包含許多可供施工的資訊，以傳統方式必須花上 60000 小時電腦操作來製作 50000 張元件施工圖。設計的主要結構為 3m*3m 的鋼骨格子系統，當時合作的西班牙當地鐵工廠商(Urssa)利用電腦 BOCAD 鐵件細部程式，分析 CATIA 模型所拆解的骨架元件後，快速製作出結構骨架的細部施工圖(圖 3-21)，降低了 18%的預算。其實施工廠商仍非常依賴 2D 施工圖面來建造，因此從 3D 模型拆解成 2D 元件，再製作元件細部施工圖面的過程很重要(圖 3-22)，但這些過程都很繁瑣，除了有些電腦系統如上述 BOCAD 可以針對某細部元件簡化此過程外，CATIA 系統也已經可以對複雜形體直接切割 3D 模型後自動轉成 2D 圖面的資訊，再直接交由施作廠商製作細部施工圖，縮短了製圖的時間與人力。

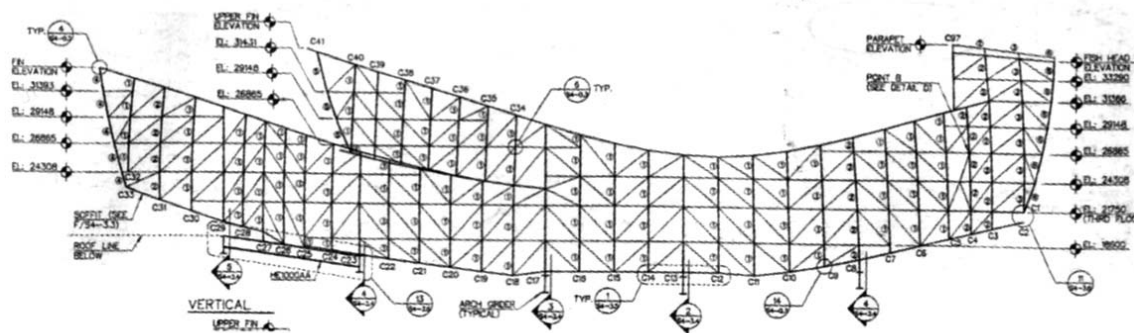


圖 3-21 BOCAD 細部系統所繪製的骨架細部施工圖



圖 3-22 「細部設計與施工圖」階段 CAD 圖面操作過程

數位建構

在數位建造過程中，除了參照 2D 平面的施工圖，各施工廠商大量依賴設計定案的 3D CATIA 主要模型(master model) 與建築師一起溝通與討論，此模型具有全部施作與建造過程所需要的尺寸與資訊，Gehry 設計團隊笑稱美術館數位建造過程中 CATIA 模型已經取代以前傳統的捲尺。為了利用數位過程來建造龐大而造型自由的建築，施工團隊向航太承包商租借了 18 個 CATIA 工作站來製作美術館自由造型的外牆。CATIA 模型中具有拆解的主體骨架結構與表皮結構，這些結構元件都利用 CAM 設備生產。以下分別說明與分析骨架及表皮的數位建構過程：

1. 骨架單元

在單元生產前，建築主要鋼骨結構先在 CATIA 模型中進行 FEA 結構分析(Finite element structural analyses, FEA) (圖 3-23)。圖面分析完再直接由 CNC 雷射切割製作每一跟骨架單元，雖然主結構的每根單元都是直的，但並不是垂直水平格子系統的組裝，組裝過程中，由於骨架的數位生產非常精準，因此不需靠其他支撐，每根具有電腦條碼編號的骨架單元相互固定就可順利完成整個架構(圖 3-24)。除了主結構外還有另一層可讓曲面表皮鈦金屬固定的次結構。此次結構利用 6cm 金屬圓管以水平系統構成支撐曲面牆的結構，以萬象接頭固定於主構架上，可依表皮組裝時作調整。製作過程也和主結構相同。

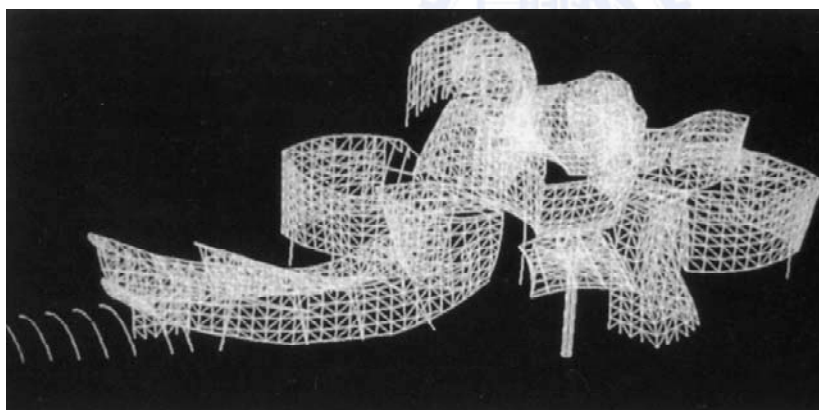


圖 3-23 骨架進行 FEA 結構分析



圖 3-24 骨架單組裝

2. 表皮單元

美術館主要表皮材料為特性堅固耐久及輕巧的鈦金屬，其他為部分玻璃及石灰石。表皮製作比骨架複雜，因為都是自由曲面。為了將鈦金屬曲面單元標準化以降低製造成本，Gehry 第一次應用 CATIA 模型中的高斯曲面分析(Gaussian analysis)(圖 3-25)，同時加上合理化分割系統(CATIA patterning optimization program)，將 80%的鈦金屬曲面歸納出四種標準單元，其餘變化較大的利用 16 種單元製作。至於玻璃表皮則從 CATIA 模型中先分割後進行三角化，共分割出 2200 片不同的三角形玻璃。另外，由於第一次使用鈦金屬材料，製作廠商(Permasteelisa)還製作出 1:1 的鈦金屬表皮 mock-up，用航太風力模擬系統作外牆風力測試(圖 3-26)。

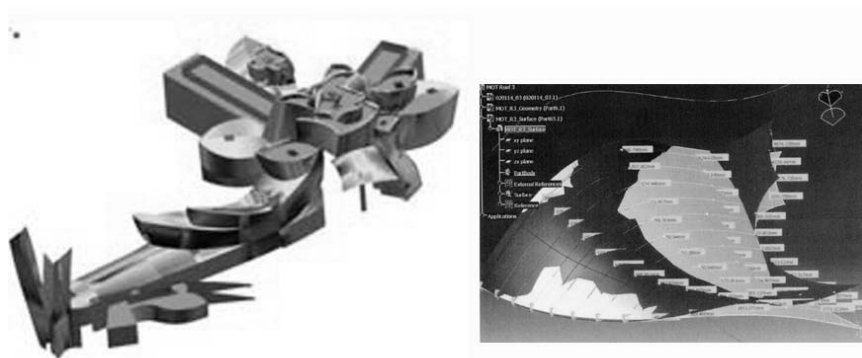


圖 3-25 CATIA 高斯曲面分析&合理化分割系統



圖 3-26 鈦金屬外牆風力測試

當圖面分析與模擬測試實驗後，製作廠商就開始將 CATIA 模型轉成的 2D 資料輸至 CAM 設備大量生產表皮單元。四種大小約為 60*80cm(0.38mm 厚)的標準鈦金屬面板單元由 CNC 雷射切割機精準切出(圖 3-27)；另外平面的三角形玻璃面板則是由 CNC router 切割；而對於每片不同曲度的石灰石面板，西班牙當地施工廠商(Balzola)利用特製的 CNC router，每天 24 小時切割，共耗費了兩年才切割完成(圖 3-28)。

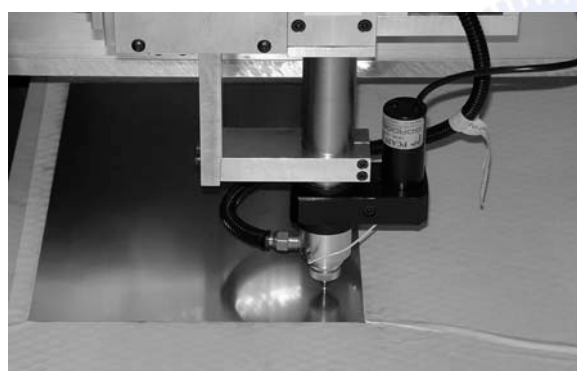


圖 3-27 標準鈦金屬表皮以 CNC 雷射切割



圖 3-28 每片不同形體石材由 CNC router 切割

最後，這些切割好的單元會編上施工順序編號，再運到現場組裝。由於數位製造的過程精準性高，因此現場可以快速組裝，如圖 3-29 輕巧的鈦金屬表皮一片一片依序由工人安裝於主骨架的防水層外，而三角形玻璃及石材也得以在預期工期內完成組裝(圖 3-30, 3-31)。



圖 3-29 鈦金屬表皮組裝過程



圖 3-30 三角玻璃組成的自由形玻璃帷幕



圖 3-31 石材自由形外牆

從上述分析的骨架與表皮單元製作過程，可以歸納出在數位建構階段中 Gehry 與施工廠商共同協調下的重要建造過程，如圖 3-32 所示。

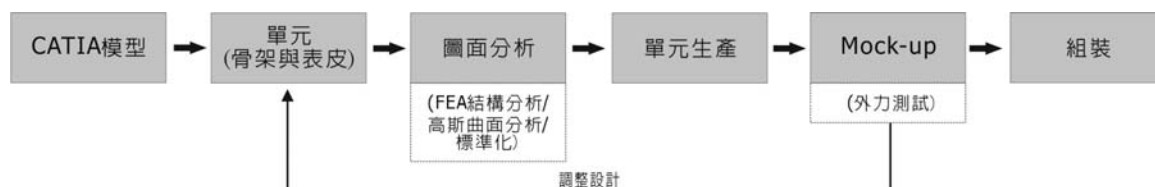


圖 3-32 「數位建構」階段之 CAD/CAM 操作過程

小結

從上述設計過程分析可以得知，Gehry 於設計早期還是以傳統草圖及手作模型為主要設計媒材，屬於非數位設計過程；到了設計發展階段開始才大量應用數位媒材的輔助，主要以 CAD 的 CATIA 虛擬模型與 CAM 設備製作的不同比例實體模型來回檢視設計。當設計定案後將 3D CATIA 主要模型(CATIA master model)交由合作的施工廠商進行討論，開始發展細部設計及利用快速的電腦細部程式繪製複雜形體的細部施工圖。這些細部圖主要從 3D 模型的資料轉成 2D 的施工圖面資料。在數位建造過程中，複雜的 3D 模型拆解成兩個主要單元：骨架與表皮，以 CAD/CAM 數位過程來製造：開始先進行圖面分析(結構分析，曲面分析)及合理化成標準單元過程，同時也製作 1:1 mock-up 作為結構風力等測試。分析及測試完後才開始大量單元生產，最後再到現場組裝。從整個過程中統一使用的 CATIA 模型資料讓建築師與各施工廠商保持良好的溝通與協調，而且數位建造過程精準，以致工期及預算都可以掌控。圖 3-33 為整個設計與建造的過程。

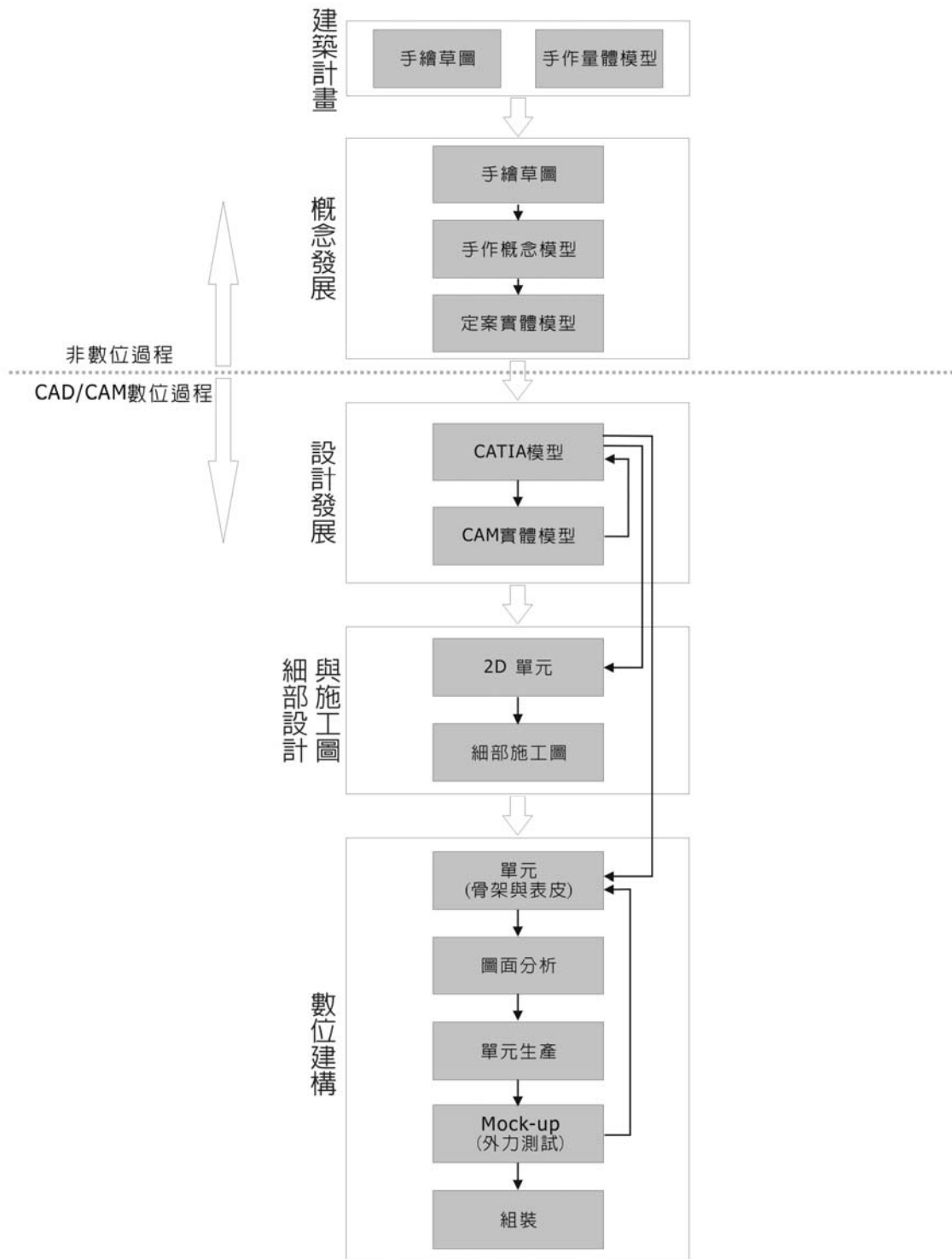


圖 3-33 畢爾包古根漢美術館設計與建造過程

3.2.2 Conde Nast 咖啡廳

此為在紐約市一棟 Fox 及 Fowle 設計的辦公大樓內的咖啡廳室內自由形體的設計案。設計面積為 1000 平方米，主要包括可提供 260 座位的餐飲區（含四個私密包廂）及廚房。在此設計案中，Gehry 利用不同曲面玻璃及鈦金屬作為自由形體空間之牆面材料，應用 CAD/CAM 技術來製作每一片都具有不同曲度的自由牆面。以下以其設計與建造過程作分析。

建築計畫

在設計前期，Gehry 以草圖及手作的實體量體模型與業主進行建築計畫的討論，確認不同空間的使用與面積大小(圖 3-34, 3-35)。如圖 3-35，在沒有明確的設計形體前他主要以量體先決定空間量與配置關係。

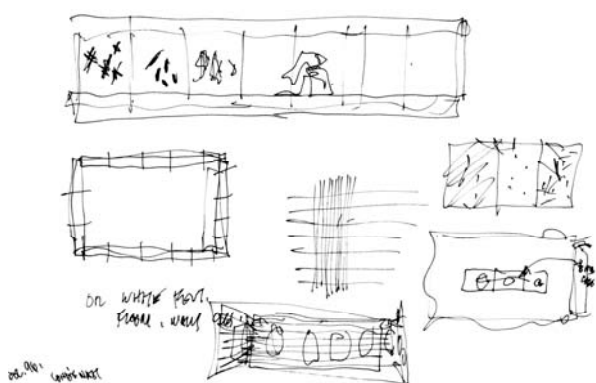


圖 3-34 規劃配置草圖

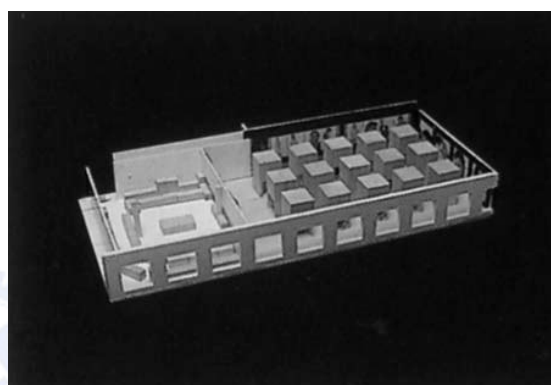


圖 3-35 木作量體模型

概念發展

接著就開始繪製設計概念草圖(圖 3-36)及製作設計概念的發展模型(圖 3-37~3-39)，Gehry 為了保留咖啡廳整個空間的完整性，但卻可以讓每一 4~6 人座位區可以被區隔開來，希望於咖啡廳中間區域做一個透明包庇的島形餐飲區，主要利用透明的玻璃材料來做區隔，但卻希望剛硬的玻璃可以象布料一樣呈現柔軟的形體(圖 3-38)。至於對設計需求中的私密性包廂，Gehry 則利用藍色的鈦金屬作為牆面，於天花上做了具有雲意象的燈飾，也將餐飲空間的隔間上方都加上雲狀的收邊(圖 3-39)。從這些利用羊皮紙(Vellum) 及乙烷基(vinyl)等材料所做不同比例的整體或局部實體概念模型可見，Gehry 從整體設計形體一直到傢俱設計，都是以一連貫的設計概念來發展。直到設計概念發展定案後，就做定案實體模型(圖 3-40)。



圖 3-36 概念草圖

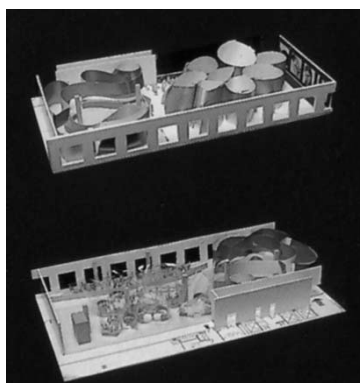


圖 3-37 概念發展模型

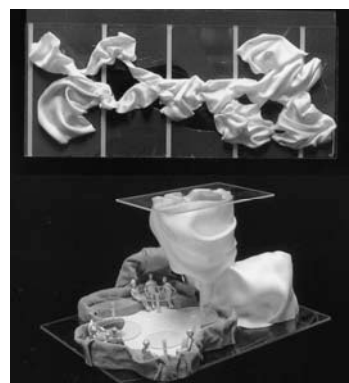


圖 3-38 餐飲空間概念模型

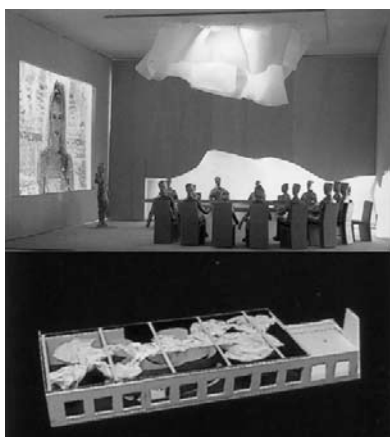


圖 3-39 天花裝飾概念模型



圖 3-40 設計定案模型

設計發展

其實在此設計中，有些設計形體如鈦金屬的自由形牆面主要衍生自畢爾包美術館的表皮經驗。但這個設計案最具挑戰的是尺度上的改變，室內設計需考慮的設計因素與大型建築體不同，即使同樣是鈦金屬曲面牆，但卻為了考慮室內小尺度的精準性及不同材料之間的結合方式，Gehry 必須在設計上增加固定鈦金屬表皮的次骨架系統及思考材料收邊的設計。

另外，設計中的玻璃曲面牆包含了 52 片不同曲面的玻璃及 25 片毛玻璃。對於曲面玻璃的製作是 Gehry 的新挑戰，前述 Bilbao 玻璃外牆的經驗是利用 CNC router 切割 2D 的三角形玻璃，但這個設計中卻是希望作曲面的玻璃。Gehry 設計團隊將定案實體模型中的玻璃曲面，利用三點式的觸控掃描器輸入電腦，再將輸入的點雲資料轉成可以編輯的 CATIA 電腦 3D 模型。成為電腦模型後，這些曲面開始進行順化(smooth)及合理化(optimized) (圖 3-41)，為了確認所輸入的電腦模型與原來設計定案的模型是否會有很大差異，加上 Gehry 本身不喜歡盯著電腦而比較習慣用實體模型來檢視設計的空間感，因此他將調整過的數位模型再輸出成實體模型。輸出過程開始從 CATIA 的 3D 數位模型，轉進 AutoCAD 中進行斷面橫切成許多 2D 的平面(圖 3-42)，直接將 2D 資料轉到 CNC 輸出，並做出更大比例的實體模型。Gehry 稱這些模型為檢視模型(checked model) (圖 3-43)，利用 CAD/CAM 實體與虛擬模型來回檢視設計成為他設計發展的重要過程(圖 3-45)。最後設計定案再製作完整的 CNC 模型(圖 3-44)。

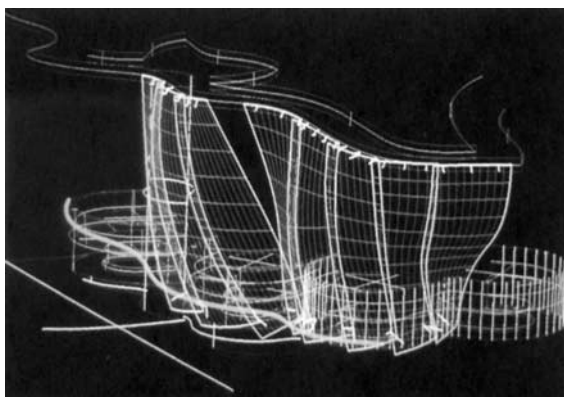


圖 3-41 CATIA 模型曲面順化與合理化

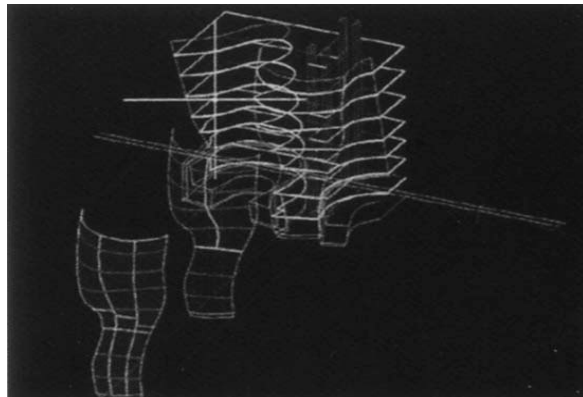


圖 3-42 AutoCAD 曲面斷面分割

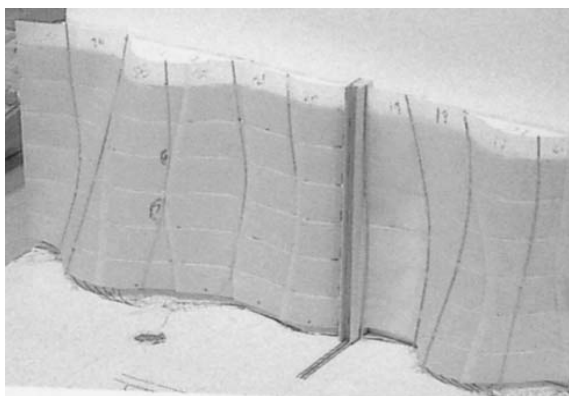


圖 3-43 CNC 模型進行修改



圖 3-44 CNC 製作定案模型

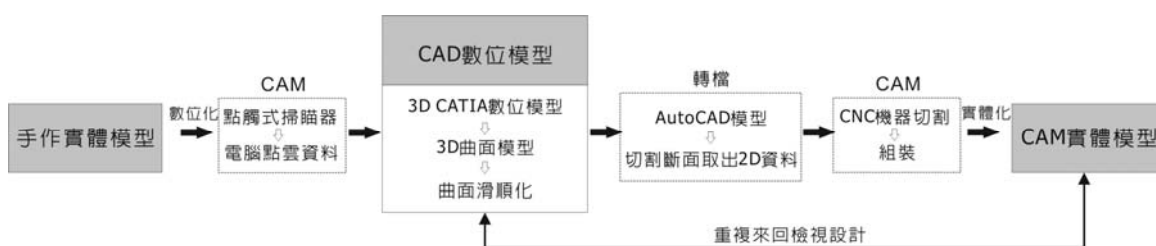


圖 3-45 「設計發展」階段 CAD/CAM 操作過程

從這些模型製作過程中，Gehry 已經在思考如何在預算內施作每一片都不一樣曲度的玻璃隔間。他將 3D 模型切割成 2D 斷面製作曲面牆的模型的方式，主要為了嘗試新工法。最後他也將此方法跟施工廠商溝通並嘗試實作，詳細過程將在數位建造中敘述。

細部設計與施工圖

室內設計著重於許多接頭的細部設計，Gehry 設計了固定曲面玻璃的抓勾。由於玻璃具有多向度彎曲，因此為了讓抓勾可以精準固定於玻璃上，必須重複修改數位模型及製作 1:1 mock-up 來檢視。一開始設計好的瓜勾 CATIA 數位模型轉給施工廠商 TriPyramid 來製作數個 1:1 模型，用來測試安裝方式及測試耐用度。當發現抓勾位置有誤，就回到電腦 CATIA 模型來做調整，調整完的模型再轉成 AutoCAD 標出抓勾位置的空間座標，到現場組裝時再進行調整。這樣利用數位模型及實體 1:1 mock-up 來回測試及修正好幾次，最後才製作出可以精準固定在曲面玻璃的抓件 (圖 3-46, 3-47)，抓件數位模型與實體 mock-up 來回檢視如圖 3-48。除了製作 mock-up，施工廠商也直接從 3D CATIA 模型細部設計繪製 2D 及 3D 施工圖面(圖 3-49)。

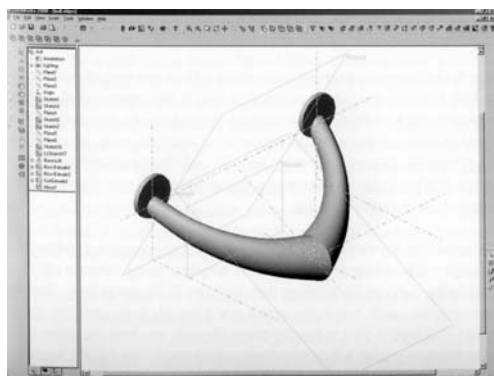


圖 3-46 抓勾數位模型



圖 3-47 抓勾 1:1 mock-up

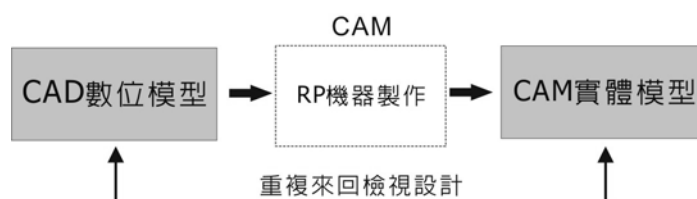


圖 3-48 抓件 mock-up 製作過程

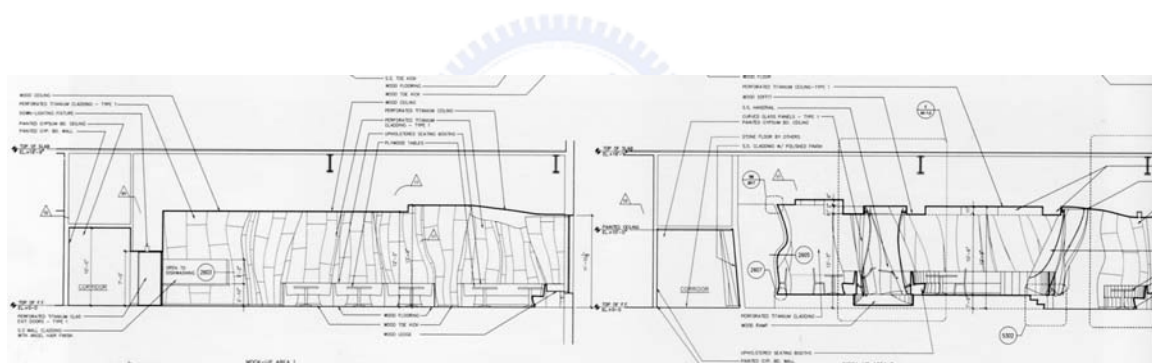


圖 3-49 2D 細部施工圖

數位建構

Gehry 設計團隊將定案的 CATIA 主要模型(master model)，拆解成主要的骨架與表皮單元，交由義大利製作廠商 Permasteelisa 進行分析及製作單元元件原型(prototype)，最後再大量製造與組裝。對於經費因素考量，Gehry 於此階段提出新的表皮單元製作工法，以下分別說明骨架與表皮單元製造過程。

1. 骨架單元

設計中鈦金屬曲面牆的骨架製作方式與之前畢爾包外牆相同，也是以 CNC 製作主結構主要支撐，外加次結構作為固定鈦金屬表皮的系統。但在此小尺度的設計案他必須將次結構加密，讓固定在上方的曲面可以更滑順。

2. 表皮單元

製作廠商拿到 CATIA 數位模型後，用高斯曲面分析(Gaussian analysis)分析數位模型中每片

曲面玻璃的曲度是否合理，同時也分析出一些會出現問題的形體再轉由建築師修改，而 Gehry 對施工方式也提出建議，廠商再去執行。以往要作曲面玻璃必須用 CNC 作不銹鋼模，然後再利用模來製作玻璃，但由於每一片玻璃必須獨立開模，每片不銹鋼模大約 2 萬~3 萬美金，而設計中具有將近 80 片玻璃，如果全部都須開模將是個可觀的費用。因此 Gehry 提出另一種較便宜的製作方式，主是將製模的程序簡化，他建議以可活動的“釘床”(pin mold) 來作模板(圖 3-50)，這些上下可活動的釘子可以依曲面的頂點數邊改變成不同的曲面，如此一來就可以一直重複使用，解決了每一片玻璃必須製作一片模板的麻煩，也省了許多經費。由於每一片 2cm 厚的曲面玻璃的尺寸很大，製作廠商於真實建造前製作了多片 1:1 mock-up 來作結構測試(圖 3-51, 3-52)，經過多次測試與改良後再大量生產，最後才將編號好的 77 片玻璃單元運至現場組裝(圖 3-53)。由於所有結構與細部單元都是數位生產，因此抓件與多向曲度變化的曲面玻璃所預留抓孔位置精確無誤的固定，讓組裝得以順利進行(圖 3-54~3-55)。

另外鈦金屬曲面表皮作法吸取畢爾包的經驗，先將自由曲面在電腦中攤平於 90cm*210cm 的鈦金屬板上，由 CNC 雷射切割後再將這些單元安裝於骨架上。此外 Gehry 為了避免金屬材料的邊緣於室內的尺度會太稅利，因此於每一片曲面牆邊緣設計收邊(圖 3-56)。

從上述骨架與表皮單元製作過程，可以歸納出此數位建構階段的主要過程(圖 3-57)。



圖 3-50 可重複製作模板的“釘床”(pin mold)



圖 3-51 曲面玻璃 1:1 mock-up



圖 3-52 結構測試



圖 3-53 現場組裝



圖 3-54 抓勾精準與多向度曲面玻璃結合



圖 3-55 完工玻璃曲面牆

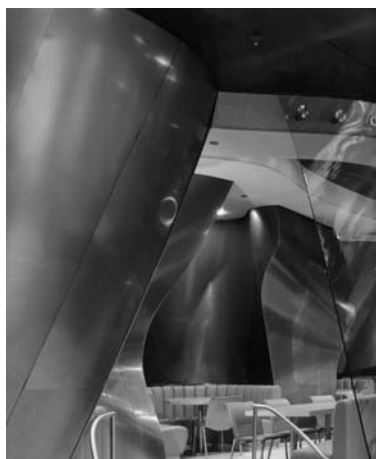


圖 3-56 完工鈦金屬曲面牆



圖 3-57 「數位建構」階段之 CAD/CAM 操作過程

小結

此設計案雖小，但卻給 Frank Gehry 設計團隊帶來許多新挑戰。Gehry 的設計因複雜度太高已經無法用建築傳統熟悉的建造方式，他的每個設計都是發展設計過程的設計，除了設計形體 Gehry 還親自建議建造方式，必須從不斷的實驗中吸取經驗來解決新問題。這是繼畢爾包完成後所作的設計案，由於室內設計考慮的設計因素有別於象畢爾包如此大型的建築體所會面臨的問題，大尺度與小尺度的設計案改變了設計師在設計過程中一些設計步驟與過程。室內設計要求精確的程度必須依賴更多的「預建構」(pre-fabrication)過程，如重複來回修改數位模型再輸出不同比例模型或 1:1 mock-up，原型(prototype)等。

從上述各過程分析可總結出 Gehry 於此室內設計案的設計過程(圖 3-58)。建築計畫、概念設計都完全屬於傳統設計而非數位過程，因為 Gehry 於此兩個階段中都不會用數位媒材來輔助，他只是大量畫草圖及製作手工實體模型，直到設計形體定案後，進入設計發展階段才開始大量運用 CAD/CAM 電腦輔助。尤其到了後期的數位建構過程更需精準的 CAD 電腦模型及利用 CAM 輸出實體模型來回作設計檢視。而建造時的骨架與表皮元件，甚至細部抓勾也必須從修改過的數位模型直接由 CAM 設備輸出，再到現場組裝。

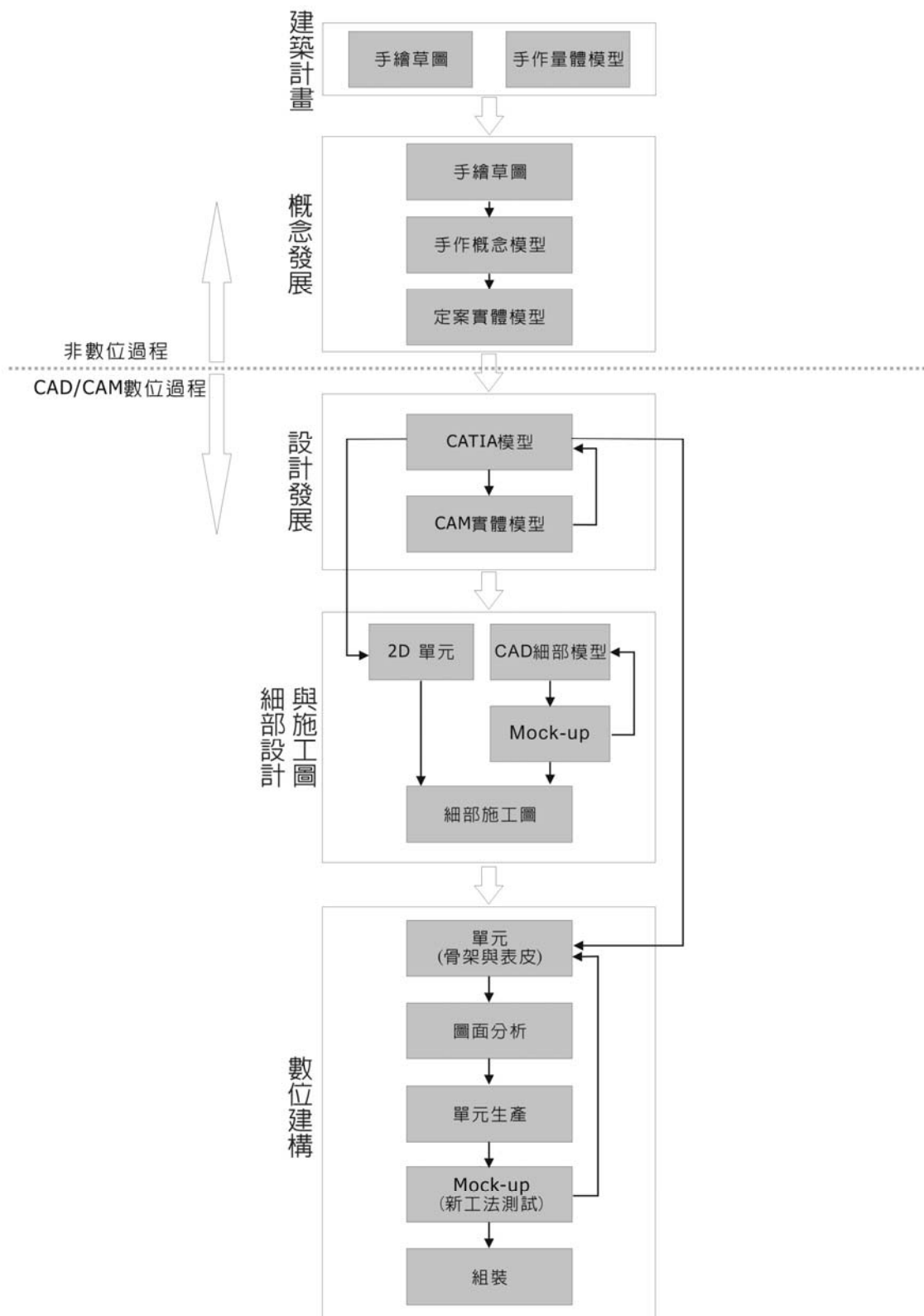


圖 3-58 Conde Nast 咖啡廳設計與建造過程

3.2.3 「波浪」展示館

此為 2000 年在德國慕尼黑的 BMW 國際汽車博覽會中 BMW 的展示館，主要推廣與展示當時 BMW 新款的「氫氣能汽車」(hydrogen-powered car)。設計主題為「波浪」(wave)，是一個置於舊建築物大廳，具有雙曲面變化的室內空間結構(space-frame)展示空間。Franken 利用金屬彎管及雙層鋁製圓管作為自由形體的主要結構體，另加上薄膜作為表皮及可供室內展示投影的材料，以下以其設計與建造過程作分析：

建築計畫

由於 BMW 展示館主是在設計汽車推廣與展示的空間，設計團隊於此階段中比較著重與業主溝通如何在展示中對產品推廣及設計的方式。雙方對於空間計畫與需求比較不重視，反而是討論如何可以創造出類似電影情節般的空間體驗。

概念發展

Franken 為了表現出 BMW「氫氣能汽車」的氫氣動能技術，以動態能量(kinetic energy)作為設計概念發想的主軸。設計構想如圖 3-59，全部能量源自於太陽，但無形的能量只能藉由其對週遭的影響力才能被視覺化，因此 Franken 以「波浪」所呈現的動態能量形體，作為設計的主要隱喻(metaphor)。

設計 metaphor 決定後，Franken 就開始以參數式設計過程(parametric design process)操作設計形體的發展。他利用動畫軟體 Maya 中的動能模擬，在舊建築物展場空間中，以光束能量及水能量的參數變化，讓空間形體產生形變(圖 3-60)。主要設計形體的形變由電腦參數持續改變的動態過程產生，Franken 只是決定何時停止參數變化而選擇所要的形體，再將之成為設計發展的「主要形體」(master geometry)。Franken 認為他的概念發展設計階段是一種「過程」(process)，一開始沒有預定或想像的設計形體，而是由一連串的數位操作過程中控制參數的變化來形成。

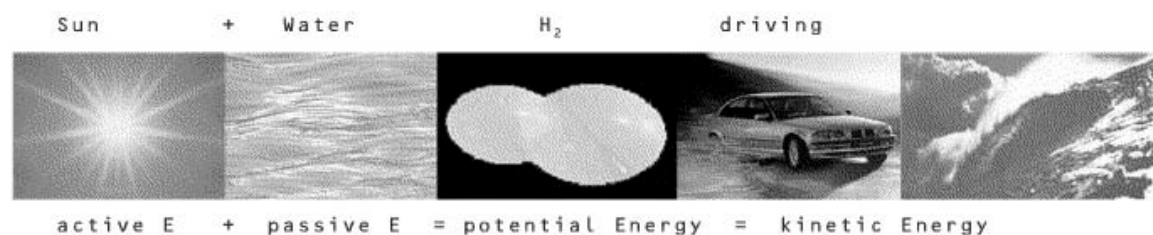


圖 3-59 概念圖

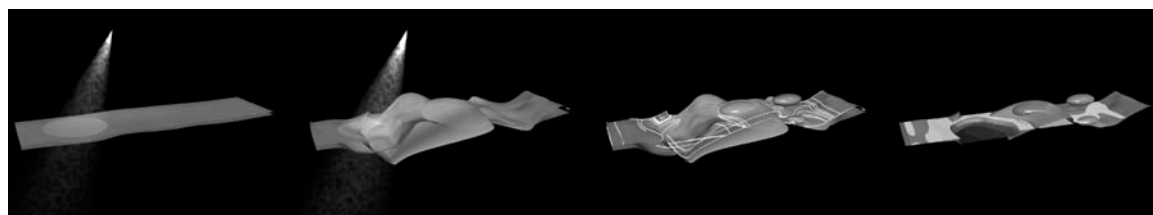


圖 3-60 參數化設計過程 (Maya 動態模擬)

設計發展

Franken 將 Maya 軟體中決定的「主要形體」模型轉到其他 3D 軟體如 Rhinoceros, CATIA 繼續發展設計：考慮設計曲面與空間機能關係(圖 3-61)，順化曲面得到最佳設計形體。為了讓設計形體可以表現出類似 3D 模型的線架構(wireframe)，他取出曲面上的同位線(isoparm)作為設計骨架系統(圖 3-62)。同時以調整後的形體進行空間模擬(simulation)，來檢視設計的空間感(圖 3-63)。除了數位的虛擬模型外，Franken 也將 3D 數位模型(圖 3-64)資料直接輸入 CNC milling 設備製作 CAD/CAM 實體模型(圖 3-65, 3-66)。為了製作圖 3-58 的骨架模型，Franken 必須先將 3D 骨架模型拆解成 2D 骨架單元的圖面，再交由 CNC 製作廠商製作模型。從製作模型過程中，讓他可以先測試利用 CAD/CAM 輔助建造的過程(圖 3-67)。在設計發展階段，Franken 主要微調「主要形體」以讓設計形體可以真正被建造。

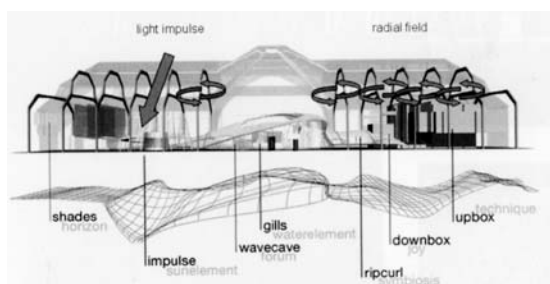


圖 3-61 設計主要形體與空間機能關係

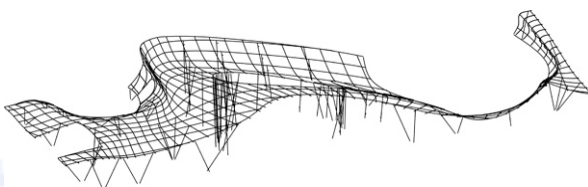


圖 3-62 設計主要形體之同位線(isoparm)線架構



圖 3-63 空間模擬

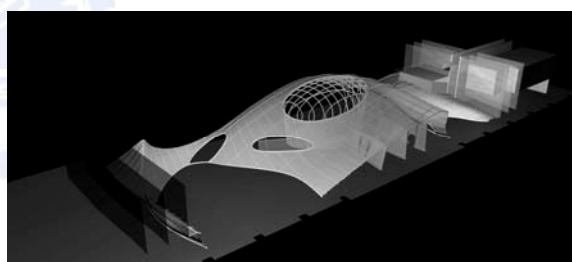


圖 3-64 3D 主要形體模型(master geometry)

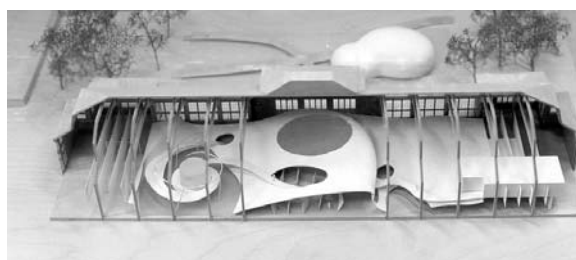


圖 3-65 曲面 CAD/CAM 實體模型

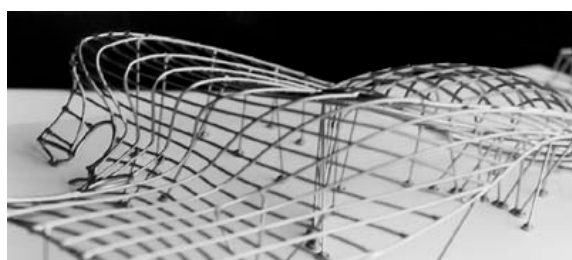


圖 3-66 骨架 CAD/CAM 實體模型

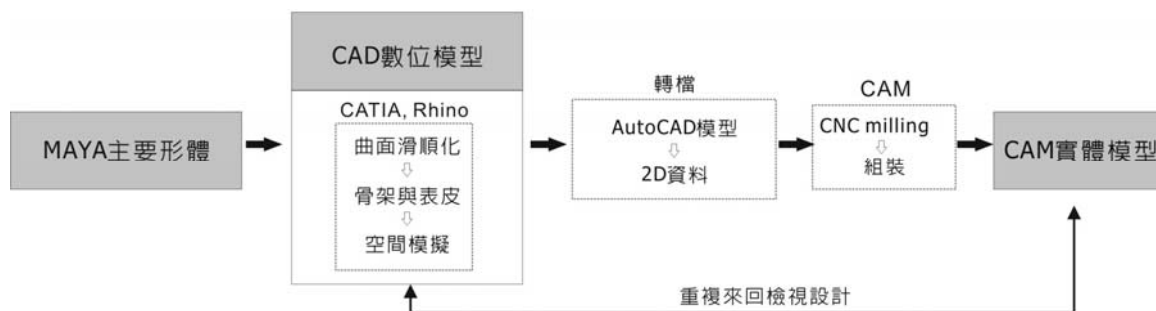


圖 3-67 「設計發展」階段 CAD/CAM 操作過程

細部設計與施工圖

此設計是由多向度彎曲的圓管組構而成，而每根不同曲度的圓管單元須靠接頭來銜接。為了讓每根圓管單元可以精準的接合，Franken 設計了一種萬用接頭 (圖 3-68)，可以結合來自不同方向的管子。另外為了讓薄膜可以固定於三向度彎曲的圓管骨架上，Franken 也設計了圓管細部，製作雙層圓管(圖 3-69)，外層具有凹槽可以讓薄膜的抓件固定。這些細部設計在電腦 CAD 3D 軟體設計完成後，直接由 CNC milling 及 CNC rolling 設備製造 1:1 mock-up 作為測試模型。除了細部設計，Franken 也將「主要形體」檔案轉到 AutoCAD 及 PK stahl 細部軟體繪製所有需要的施工圖面。不管是細部設計或施工圖，都是由從「主要形體」模型來進行製作(圖 3-70)。

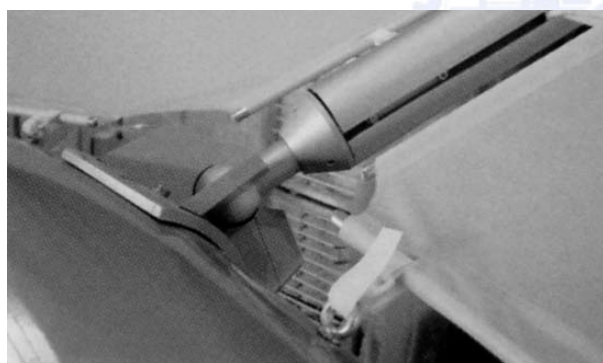


圖 3-68 接頭細部

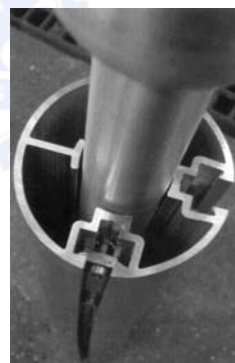


圖 3-69 可固定薄膜的雙層圓管細部



圖 3-70 「細部設計與施工圖階段」之操作步驟

數位建構

從設計到建造過程，Franken 都大量利用 CAD/CAM 數位媒材輔助。在數位建構過程，他將「主要形體」模型交由結構工程師 Bollinger+Grohmann 及施作廠商進行分析及生產結構單

元。設計形體主要是由主結構，次結構及表面薄膜組成。以下分別以骨架單元與表皮單元說明其數位建造過程。

1. 骨架單元

設計形體主要由圓管以三向度的彎曲組合而成，以直徑約 30cm 的金屬圓管作為主結構支撐，內部次結構則是由直徑 9cm 特別訂製的雙層鋁管組成。製作廠商於施工前先對「主要形體」進行高斯曲面分析與 FEA 結構分析(圖 3-71)，檢測設計的結構合理性。接著為了製作空間三向曲度彎曲、口徑大及剛性強的金屬彎管，必須將 3D 曲線拆解成 2D 資料，才可供 CNC 彎管機器製造。圖面拆解過程先將數位模型中 3D 變化曲線分割成 2D 曲度的弧形線段，而且每段弧線的半徑必須控制在 CNC 彎管機器可施作的半徑範圍內(圖 3-72)。分段單元圖面製作完後便直接送至 CNC 滾彎機製作(圖 3-73)，最後每段金屬彎管再編上編號以方便組裝(圖 3-74)。至於次結構的鋁管因口徑小，材料特性易彎曲，則由 CNC 滾彎機製作每段長 100cm 的 2D 曲度單元(圖 3-75)，再到現場以特殊萬用接頭固定於主結構上，構成三向曲度的結構。

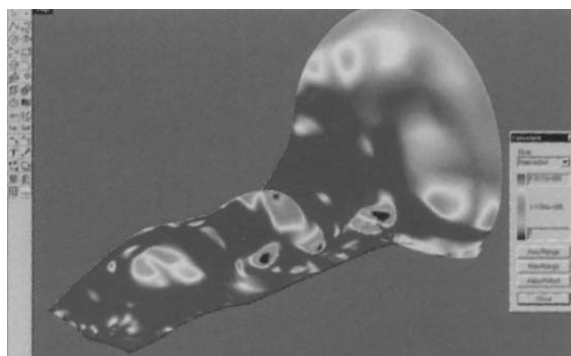


圖 3-71 高斯曲面分析

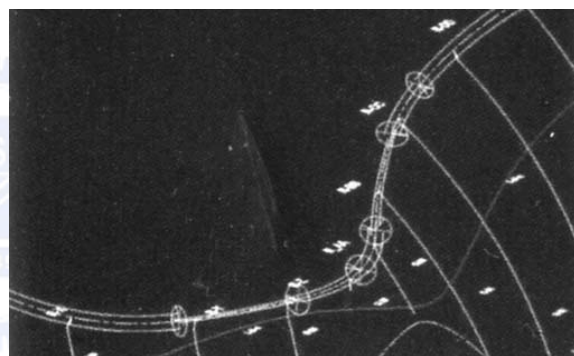


圖 3-72 將 3D 變化曲線分割成 2D 曲度之弧線



圖 3-73 CNC 滾灣機



圖 3-74 每段具有編號的彎管單元



圖 3-75 每段 100m 鋁管

每一小段 2D 曲度的金屬彎管製作完後，就進入較困難及花費人力的組裝過程。工人必須藉由外加空間定位的假支撐，及從電腦取得每段彎管精確的旋轉角度，才能將每一小段的彎管精準焊接成完整的三向曲度彎管結構(圖 3-76, 3-77)。為了測試組裝程序及檢視彎管整體結構穩定性，施作廠商先在工廠進行預組裝，整座結構體於工廠預組裝完後，再依卡車可乘載的尺度大小作局部拆解運至現場組裝(圖 3-78, 3-79)。由於從預組裝過程中已經了解施

工程序，讓現場組裝非常順利，得以在展覽所給的有限施作時間內完成。



圖 3-76 工廠預組裝(空間定位假支撐)



圖 3-77 工廠預組裝(計算旋轉角度)

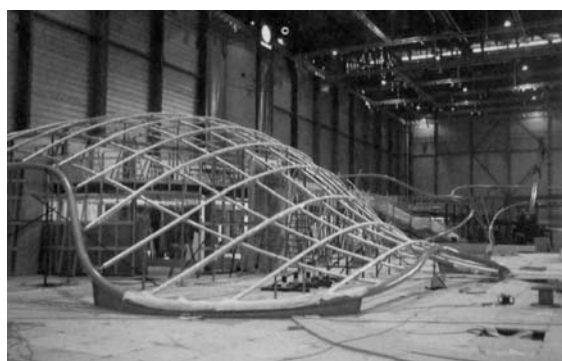


圖 3-78 工廠預組裝完成



圖 3-79 局部拆解運至現場

2. 表皮單元

Franken 利用薄膜作為設計形體的表皮結構及展示空間投影材料。薄膜製作廠商從「主要形體」模型中的表皮進行載荷計算及材料面積計算，同時將 3D 表皮攤平成 2D 平面切割資料，再由 CNC 機器切割每一片不同形狀的薄膜。這些薄膜藉由 Franken 所設計的特殊萬用接頭及雙層鋁圓管外層固定細部，可以精準固定於整座結構體上(圖 3-80, 3-81)。



圖 3-80 薄膜固定於特殊接頭上



圖 3-81 薄膜表皮

從骨架與表皮單元製造過程，可以看出每一元件都是由「主要形體」進行圖面分析與拆解成 CAM 可接受的資料後，直接由 CNC 設備製造。當單元生產後，先進行工廠預組裝了解施工程序，再拆解成局部組件運至現場組裝，整個數位建造過程如圖 3-82。



圖 3-82 「數位建構」階段之 CAD/CAM 操作過程

小結

從上述設計與建造過程分析中，可看出 Franken 從設計一開始概念發展階段持續到建造過程都運用 CAD/CAM 數位媒材輔助，他稱此設計過程為「數位持續性」(digital continuity)。他以數位操作設計與建造過程，將設計概念中所要表達的物理現象「動態能量」視覺化，成為一種有別於靜態展示的動態空間體驗。

綜合各過程的詳述與分析，Franken 於此設計案中利用 CAD/CAM 設計與建造過程可以歸納成圖 3-83。一開始於建築計畫階段與業主密集溝通設計策略，接著概念發展階段用參數式設計的數位操作過程來產生設計形體，最後決定出「主要形體」。而此形體於設計發展階段除了進行空間模擬外，也利用 CAM 設備輸出實體模型檢視設計與測試製作程序與方法。Franken 也在設計細部設計與施工圖階段利用 CAD/CAM 製作各細部的 1:1 mock-up 來測試；同時也利用細部軟體將 3D 模型資料製成 2D 的施工圖面。最後在數位建構過程中分別以骨架與表皮單元進行數位生產，再進行工廠預組裝，了解施工程序後才將組件運至現場快速組裝完成。從設計到建造過程中，Franken 利用動態參數式設計過程所產生的「主要形體」，同時提供設計過程與建造過程所需的 3D 與 2D 圖面資訊。這些資訊靠數位化過程轉換成實體空間，可以精確控制時間與預算。

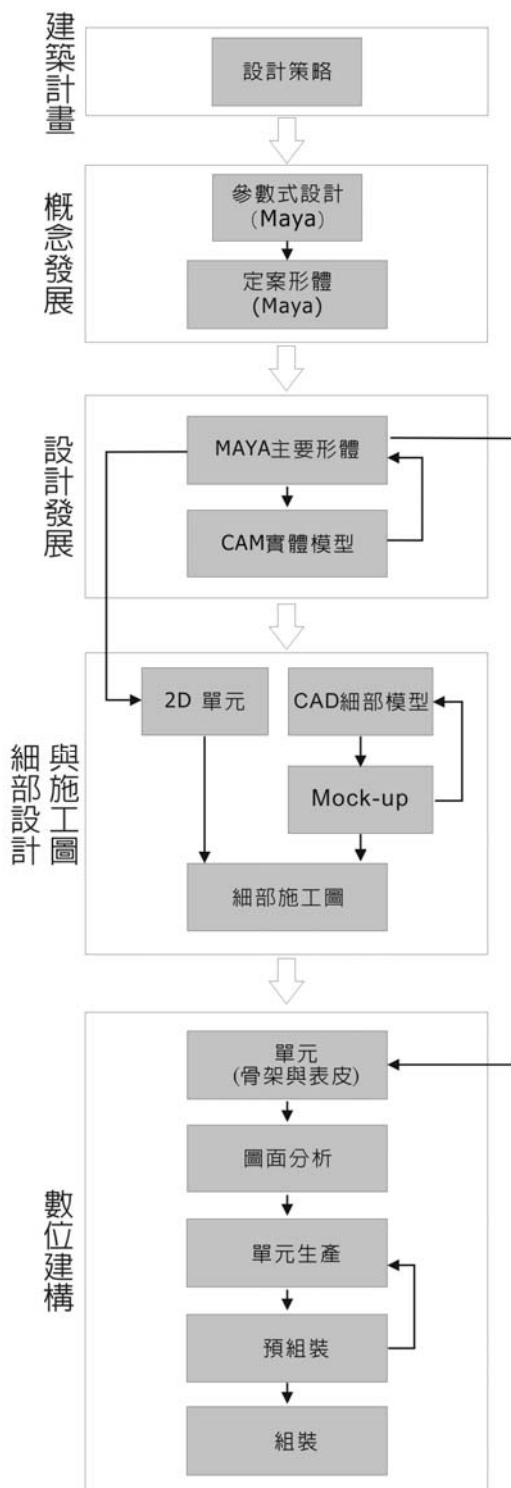


圖 3-83 「波浪」展示館設計與建造過程

3.2.4 「動態形體」展示館

此為 2001 年在德國法蘭克福 BMW 國際汽車博覽會中 BMW 的展示館，主要推廣與展示 BMW-7 系列新款汽車。設計建築體座落於 100m 長的基地上，而且面對著 Nicholas Grimshaw 所設計的巨大展示廳(Fair Hall 3)。設計主題為「動態形體」(Dynaform)，是一棟具有純粹流線外型，內部包含三個連續展示空間，辦公空間及會客廳的自由形體建築。Franken 利用造型特殊的金屬骨架及白色 PVC 張力薄膜表皮作為建築體的主要材料。以下以其設計與建造過程作分析：

建築計畫

在此過程中，與前述設計案例「波浪」相同，Franken 主要與業主溝通如何對新款汽車推廣的方式，討論設計摘要(briefing)。為了能在傳統汽車展的靜態展現方式中，表現汽車“Auto-Mobile”的動態本質，Franken 希望呈現新的展示空間概念，主張空間的加速度、動態及張力，讓參觀者體驗動態的空間情境。

概念發展

在此階段 Franken 主要操作參數式設計過程(parametric design process)來呈現設計概念。他應用動畫軟體 Maya 中的動態模擬來視覺化物理現象中的「能量」對形體產生的型變(deformation)。如圖 3-84 所示，於設計基地中，疾駛而過的 BMW 汽車與週遭因加速度而擾動的氣流，成為空間形體生成(form finding)的基本參數。過程中運用電腦模擬所有的資訊及力量，在幾何框架與加速度的互動中產生形體的形變，最後從此動態參數變化過程所產生的曲面形體決定出想要的設計形體。Franken 與此設計中強調設計形體來自於外力 (form follow force)，「動態形體」(Dynaform)因此而誕生。

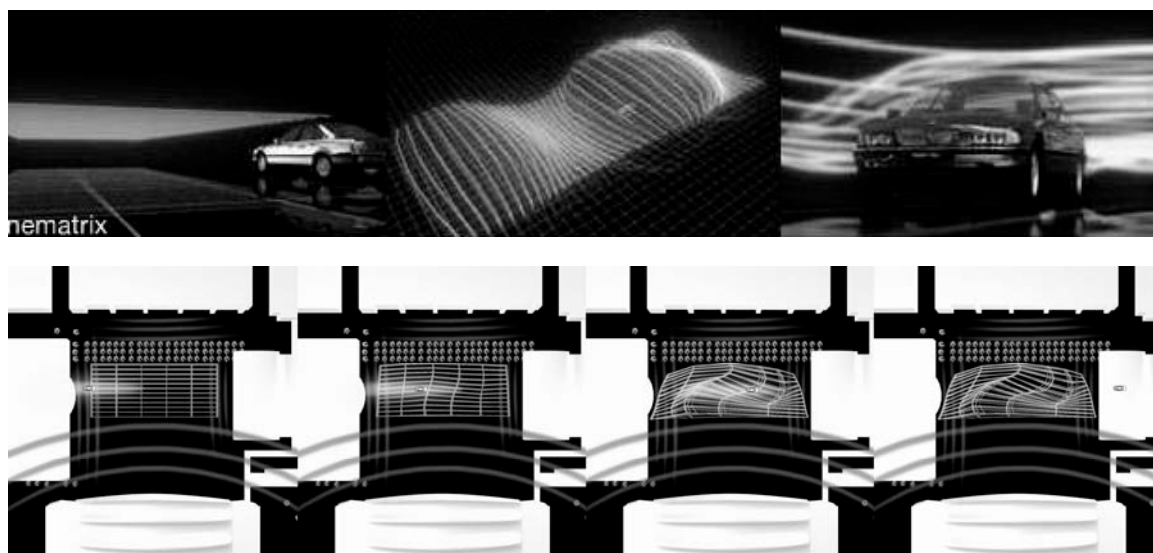


圖 3-84 Maya 動態模擬操作過程

設計發展

從 Maya 動態模擬操作中決定的設計形體，也就是 Franken 所謂的「主要形體」(圖 3-85)，會轉到其他 3D 軟體(Rhino, CATIA)進行曲面平滑化及空間模擬(圖 3-86)。除了用虛擬模型檢

視設計，Franken 也製作 CAD/CAM 實體模型。他於此階段就先將設計形體拆解成骨架與表皮：他將設計模型中的曲面作為表皮結構；對於骨架的分割，Franken 則在 Maya 中將「主要形體」分割成 15 斷面，但並非平行分割，而是從動態模擬中因外力變形的格子系統中取出線段來切割，造成所切割的斷面具有不同形狀，他將這些特殊形狀的骨架斷面稱為「動態框架」(Dynaframe)(圖 3-87)。主要是希望參觀者在連續自由形狀的「動態框架」空間中，可以體驗出動態情境。接著，Franken 將骨架與表皮的完整 3D 模型，匯出 .iges 檔案到 RP 設備(laser sintering, SLS 及 stereo-lithography, SLA)，直接輸出實體骨架模型與量體模型(圖 3-88, 3-89)。利用 RP 技術可以不用花時間與人力將 3D 模型拆解成 2D 圖面，模型可以由 3D 模型檔案直接輸出，因此可以快速輸出設計過程的檢視模型(check model)。對於此設計發展階段，Franken 主要以修正設計形體(form) 為主及決定骨架與表皮的分割方式，設計操作過程可以歸納如圖 3-90。

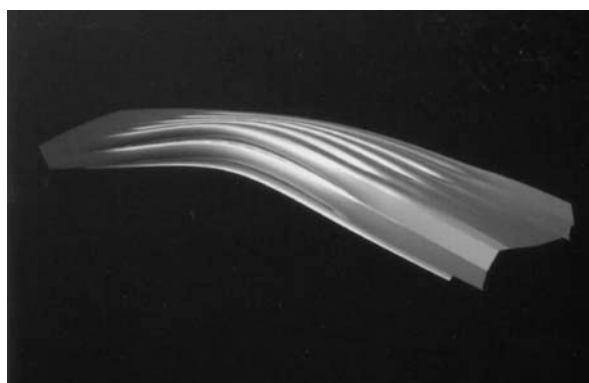


圖 3-85 「主要形體」曲面模型

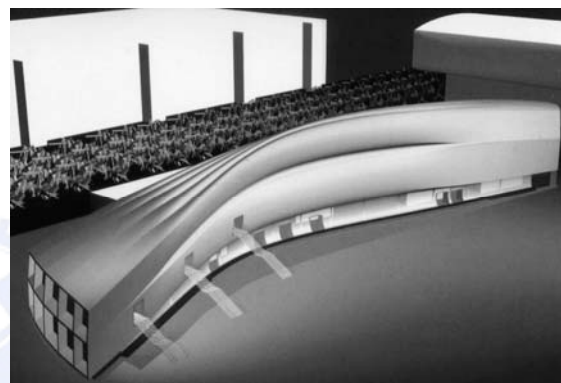


圖 3-86 設計空間模擬

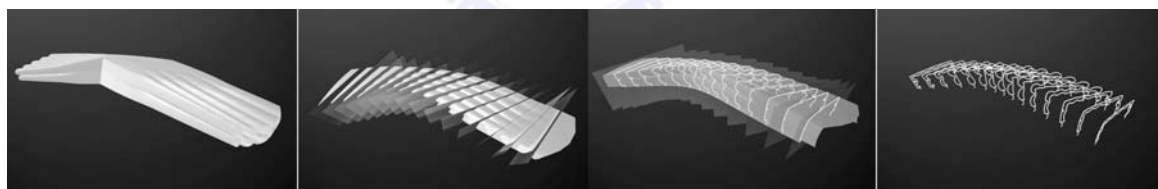


圖 3-87 Dynaframe 設計過程



圖 3-88 RP 骨架實體模型(SLA)

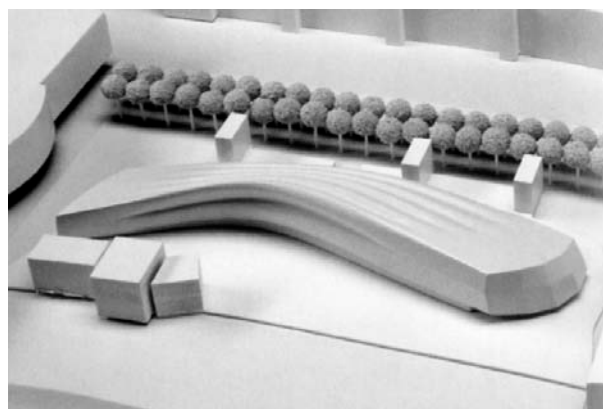


圖 3-89 RP 量體實體模型(SLS)

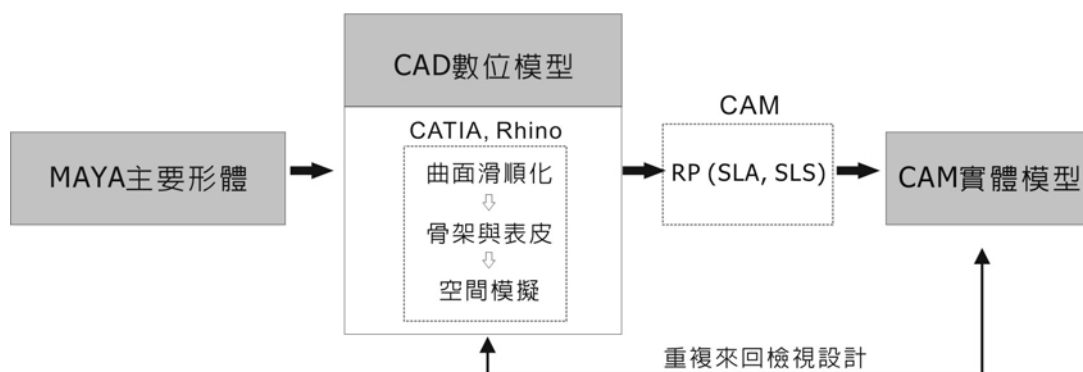


圖 3-90 「設計發展」階段 CAD/CAM 操作過程

設計細部與施工圖

為了克服設計上所希望製作的單向度張力薄膜系統，Franken 必須與製作廠商協調，設計特殊的固定爪件，讓薄膜可以固定於骨架上。對於這種特製的細部，製作廠商先以 CNC milling 製造 1:1 mock-up 來做測試(圖 3-91)。另外，為了將設計的複雜形體建造，Franken 設計團隊與製作廠商用 AutoCAD 及 PK stahl 細部軟體從設計 3D「主要形體」拆解成 2D 與 3D 施工圖面，共製作了將近 5000 張施工圖，其中複雜的骨架細部施工圖就有 800 張，而且較複雜的骨架細部接頭施工圖必須以 3D 圖面表示(圖 3-92)。從上述可知 Franken 在細部設計與施工圖階段中，必須密切與施作廠商協調溝通，過程中除了必須大量依賴 CAD 系統製作施工圖面外，還需要製作 CAM 細部 mock-up 來做測試，主要過程與設計案例「波浪」相同(圖 3-70)。



圖 3-91 薄膜固定爪件 1:1 mock-up

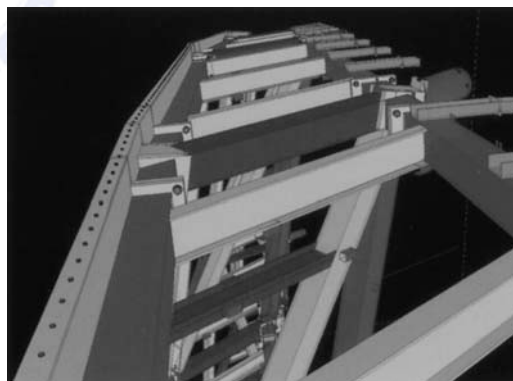


圖 3-92 骨架 3D 施工圖

數位建構

當設計「主要形體」決定後，由於自由形體的結構複雜，Franken 直接密集與結構工程師 Bollinger+Grohmann 合作，除了工程師對模型進行分析外，雙方共同協調討論材料應用及施作方式，之後再由施作廠商生產結構單元。此設計案主要由雷射切割的骨架單元及 PVC 張力薄膜表皮單元組成，以下分別以骨架與表皮單元分析其數位建構過程。

1. 骨架單元

由於此設計的骨架—Dynaframe 形體特殊，因此結構工程師先將「主要形體」的骨架單元模型轉至 FEA 結構分析軟體進行壓力分析(圖 3-93)，分析每一跟骨架的結構力量，計算出骨

架所需要的材料厚度。

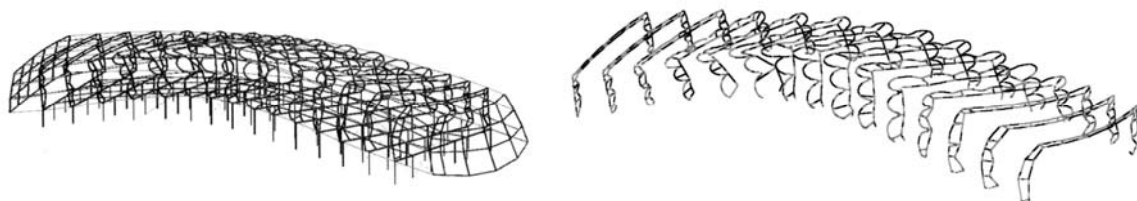


圖 3-93 骨架進行 FEA 壓力結構分析

圖面分析完後才進行骨架單元的生產，為了支承建築體本身重量，Dynaframe 骨架結構須為中空方型管，但形體特殊無制製的金屬鋼管，必須每一跟特別製作。製作方式將骨架形體的 2D 圖面資訊(圖 3-94)，送至 CNC 平床雷射切割機切割出具有骨架外框形狀的鋼板(圖 3-95)，再將切割好的 30000 片鋼板焊接成斷面為方形的骨架結構單元(圖 3-96)。但因機器手臂無法操作如此大型的骨架，因此焊接過程以人工方式取代，焊接過程必須掌控精確度以不讓整根完整骨架變形。

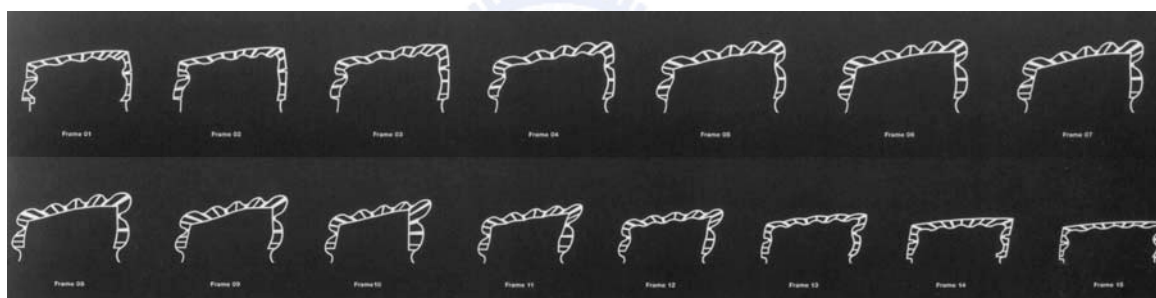


圖 3-94 Dynaframe 骨架形體



圖 3-95 CNC 雷射切割骨架單元



圖 3-96 Dynaframe 骨架單元切割完後進行焊接

骨架單元製作好後，Franken 先請製作廠商先進行局部骨架的預組裝，主要作為結構測試，接和準確性的調整，組裝程序的研究，時間的掌控及施工問題的解決(圖 3-97)。當預組裝將問題都解決後，再將改良的單元運至現場，以 3D 雷射空間定位器放樣後進行精確又快速的組裝工程(圖 3-98)。



圖 3-97 Dynaframe 預組裝



圖 3-98 Dynaframe 現場組裝

2. 表皮單元

在表皮設計上，Franken 為了呈現純粹的設計外觀及提供空間投影來增加空間體驗，他選用的表皮材料為白色透明的 PVC 張力薄膜。在表皮單元製作前，結構工程師先對「主要形體」進行高斯曲面分析及空間向量架構分析(spatial vector framework)，檢測曲面的合理性(圖 3-99, 3-100)。



圖 3-99 高斯曲面分析

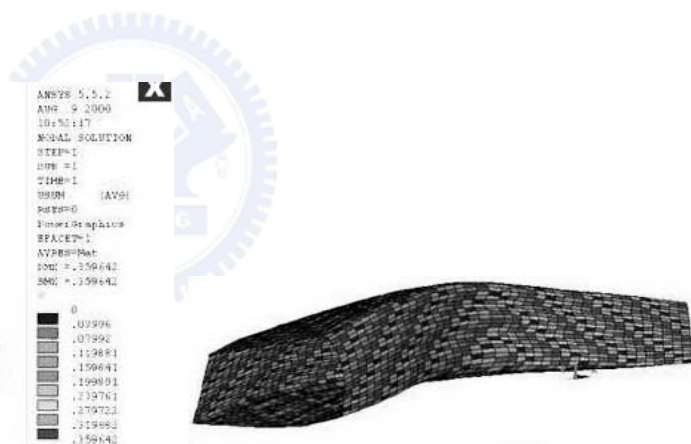


圖 3-100 空間向量架構分析

但在表皮單元製作過程中，Franken 與結構工程師面臨新工法的新挑戰。這是由於 Franken 「主要形體」的表皮單元都是 2D 曲度的表面，但是對於一般薄膜系統是 3D 曲度的製作。為了不改變設計的原始形體，與 Franken 合作的德國薄膜結構專家 Dr. Wilhelm，於每段骨架的間距設計 2D 曲度的薄膜，CNC 切割後結合成大片薄膜單元，還增加了薄膜強度及使用 8000 個固定抓具，才能在兩根主骨架之間拉起一片完整的薄膜。由於這是第一次測試單向曲面的薄膜作法，施工團隊於開幕前三個月製作了數個局部 1:1 mock-up 來測試薄膜的施作方式及檢視所呈現的效果(圖 3-101)。最後再到現場施工，以每兩根骨架為一個單元，請專業登山人員吊掛於骨架上將薄膜以特殊抓件固定於骨架上(圖 3-102)，當全部薄膜都固定後，再將薄膜拉緊，連續而具張力的白色薄膜表皮更突顯了建築的流線形體(圖 3-103)。Franken 為了對設計形體的堅持而嘗試新的建造工法，讓他成功製作了世界上第一座以單向曲度拉張的薄膜系統(圖 3-104)。



圖 3-101 薄膜 1:1 mock-up



圖 3-102 登山隊將薄膜固定於骨架上



圖 3-103 薄膜表皮



圖 3-104 單向曲度拉張的薄膜系統建築

從上述的骨架與表皮單元製作過程，可以清楚看出 Franken 在此設計案與「波浪」設計案的數位建構過程相似，即使一個為室內設計案而此為建築設計，他都有一套清楚的建構過程，只是過程中會因設計材料應用的不同而面對不同挑戰。過程中他都是先請結構工程師分析「主要形體」，再將骨架與表皮單元拆解成 CAM 可接受的資料，分別生產單元。接著再進行預組裝及製作 1:1 mock-up 來檢視施工程序與解決問題。但於此設計案中，他大量製作 1:1 mock-up 來檢測第一次嘗試的薄膜新工法。另外當結構單元尺度太大時，基於機器可操作的範圍限制，讓 Franken 必須以數位及人工相互搭配製作，此時他更需要預組裝來解決人工施作時產生的誤差。當預組裝及測試 mock-up 都完成後，再到現場組裝。此數位建構階段的主要過程如圖 3-105。

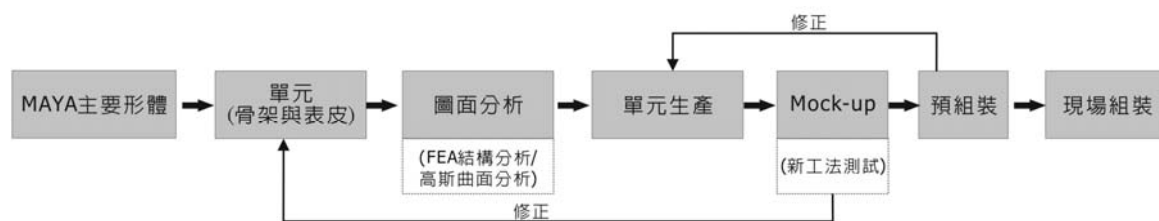


圖 3-105 「數位建構」階段之 CAD/CAM 操作過程

小結

透過以上對 Dynaform 設計案從設計至建造過程詳述與分析，圖 3-106 歸納出 Franken 在設計此設計案時利用 CAD/CAM 新媒材輔助設計與建造過程。從設計一開始與業主溝通設計策略，訂出構想與情境。接著操作參數式設計過程，將設計概念以數位操作來衍生成設計形體，從動態的形體演變中，最後決定出「主要形體」。而 Franken 將形體於設計發展階段中決定出骨架與表皮的分割並進行空間模擬。此外也利用此 3D 模型資料直接輸出 CAM 實體模型來檢視設計。在這個設計案中，Franken 挑戰了新的薄膜製作方式，他必須設計不同的固定薄膜抓具細部，因此在設計細部設計與施工圖階段中，他利用 CAD/CAM 輔助製作 1:1 mock-up 來做測試。此外由於此設計案結構元件都很特殊，與他合作的廠商必須利用細部軟體繪製大量 2D/3D 施工圖。最後在數位建構階段，設計形體分別以骨架與表皮單元數位生產。但過程中大量製作 mock-up 及進行預組裝，主要為了測試新工法的施作程序及解決施工問題，同時也掌握施工時間。當問題都解決後，再運至現場進行組裝。



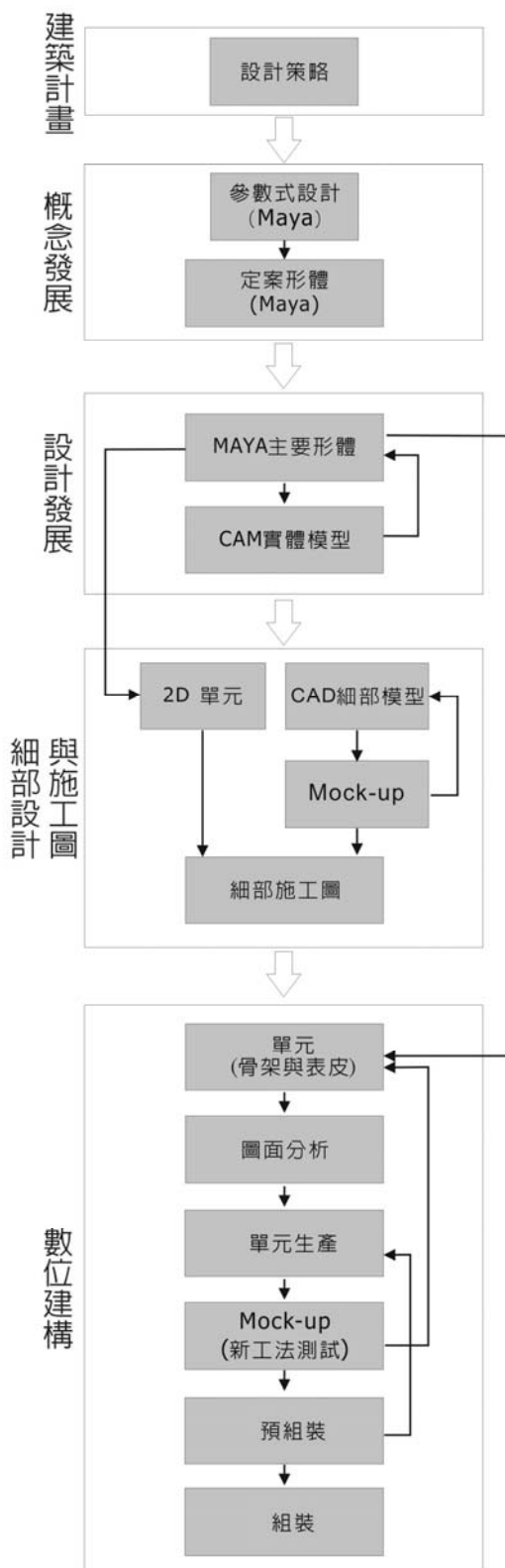


圖 3-106 「動態形體」展示館設計與建造過程

3.3 先期 CAD/CAM 設計與建造過程

基於李元榮(2005)所整合的國內案例過程(圖 3-1)，及前述對 Gehry 及 Franken 設計的四個國際自由形體設計案例所歸納出的四個過程(圖 3-33, 3-58, 3-83, 3-106)，以下將分別以每個設計與建造階段：建築計畫、概念發展、設計發展、細部設計與施工圖、數位建構來比較分析這些過程的步驟。

建築計畫

數位量體

在分析國際設計案例所歸納的圖 3-33, 3-58 中可以看出 Gehry 在此階段中著重與業主進行溝通，他用傳統草圖及手作模型來檢視建築配置與空間量；另外從圖 3-83, 3-106 的此階段中 Franken 因設計展示空間而著重於設計策略。其實 Gehry 在製作量體模型時，除了檢視空間量，其實已經開始從量體面積控制設計預算。因此如果以「數位量體」模型取代手作模型，設計量體及數位資訊的掌握將會更多，有助於控制預算。但在建置「數位量體」以檢視配置或空間量時，必須先取得設計基地或環境的數位資料(圖 3-107)。



圖 3-107

概念發展

形體生成

在概念發展階段中，圖 3-33, 3-58 顯示 Gehry 以傳統設計方法製作大量的實體概念模型及繪製草圖來發展設計想法；另外 Franken 在此階段中則直接運用 Maya 參數式軟體進行動態模擬，設計概念的形體由電腦參數衍生而成(圖 3-83, 3-106)；從圖 3-1 的早期設計可知國內設計案例是利用 3D 軟體來操作設計概念形體，像雕塑一樣製作 3D 虛擬曲面模型。此三種都是目前許多設計師在概念發展階段所運用的「形體生成」操作方式，但為了整合一個數位設計過程，因此本研究僅將兩種數位操作方法：參數式設計與 3D 曲面模型編輯，作為「形體生成」步驟中的形體發展，最後再由設計師決定出「定案形體」(圖 3-108)。



圖 3-108

設計發展

3D 主要模型

從國際案例分析中，可以得知 Gehry 及 Franken 都於此過程中已經開始與結構工程師或製作廠商進行溝通。結構工程師會將建築師作的數位模型轉到分析軟體進行表皮的高斯曲面分析(Gaussian analysis)及骨架的 FEA 結構分析，並合理化骨架與表皮設計。但圖 3-1 國內案例過程因設計案例尺度很小而沒有這個分析步驟。但其實這些分析可以讓曲面合理化，尤其是大型建築案更需要，可以藉此分析來作標準化切割以降低預算。從圖 3-33, 3-58 中的「CATIA 模型」，圖 3-83, 3-106 的「主要形體」都是經過分析後所製作的數位模型，包含了設計與建造所有的圖面資訊，作為建築師與製作廠商相互討論時所使用的共同資訊。因此本研究將此模型稱為「3D 主要模型」，主要是由概念發展階段的「定案形體」進行「曲面順化」後，建築師開始設計「骨架與表皮分割」，當分割完就會將資料轉交給結構工程師作表皮高斯曲面分析(Gaussian analysis)及骨架 FEA 結構分析等「圖面分析」(圖 3-109)。

CAM 實體模型

另外，Gehry 與 Franken 也大量製作「CAM 實體模型」來與電腦數位模型來回檢視設計。從圖 3-33, 3-106 的建築案例過程，Gehry 及 Franken 都應用了可以快速將模型 3D 成型的 RP 技術來製作建築設計的量體模型；另外圖 3-58, 3-83 的室內設計案過程則使用 2D 切割的 laser cutter 及 CNC plasma 設備來製作骨架模型。從這些不同 CAM 技術製作模型的應用可以歸納出(圖 3-110)：

- 「量體模型」－ 將「3D 模型」資訊直接由「RP 輸出」，此製作過程快速。
- 「骨架模型」－ 先將 3D 模型製拆解成「2D 圖面製作」，再由「CNC 切割」，切割後必須花費人力將單元「組裝」，但此製作過程有助於測試真實建造時的組裝方式。

這兩種「CAM 實體模型」都可以讓設計者將 3D 數位模型精準製作成實體模型，可以來回檢視設計。



圖 3-109



圖 3-110

細部設計與施工圖

實物模型 (Mock-up)

從圖 3-58, 3-83 的室內設計案過程，可看出 Gehry 及 Franken 因室內案例尺度小精準度高而需做許多細部設計，他們都利用 CNC milling 製作多個比例 1:1「實物模型」的細部抓件

來測試使用性及精準度。但如果有經費考量，可以不用工廠開模製作，直接用 RP 輸出模型來取代。

2D 單元

從四個國外案例過程中可以得知，Gehry 及 Franken 都有利用專業細部設計軟體如 Bocad, PK stahl 軟體來製作施工圖，但國內目前只有利用常用的 AutoCAD 軟體製作。過程中必須必須從「3D 主要模型」取得「2D 單元」的資料才可以製成施工所需的細部施工圖面。

數位建構

骨架與表皮單元

從國際到國內案例過程，於數位建構階段都分別以「骨架與表皮單元」製造。而這些資料都直接從「3D 主要模型」中可以取得。

單元生產

不管是國際或國內的過程，在單元生產前都必須先製作 CAM 可接受的圖面，主要是將骨架與表皮單元從 3D 模型拆解成 2D 施工圖面。從圖 3-1 的施工圖階段的三個步驟：放樣點圖面輸出、骨架輸出、面板輸出，都屬於製作「單元施工圖」的主要步驟。本研究將此三個步驟稱為「放樣點施工圖」、「骨架施工圖」、「表皮施工圖」。這些施工圖面都必須花費許多時間與人力，李元榮(2005)已經將「表皮施工圖」的部份步驟程式自動化，克服了人工製圖的誤差及節省了人力。除此之外，他也仔細分析了製作「單元施工圖」的每個操作步驟。如圖 3-1，當「單元施工圖面」製作完後，就可以將資料傳給施工廠商利用 CAM 技術作「單元加工」，之後再作「校正」(圖 3-111)。

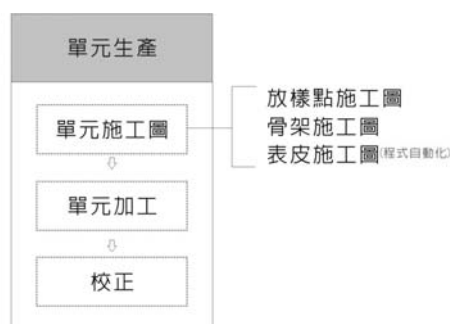


圖 3-111

實物模型 (Mock-up)

從圖 3-58, 3-106 可看出在數位建構階段 Gehry 及 Franken 為了測試新工法而製作了比例 1:1 的「實物模型」來檢測新工法的可行性。另外圖 3-33 畢爾包過程中，Gehry 也製作了此「實物模型」來作鈦金屬外牆的風力測試。在製作大比例的「實物模型」過程中，可以讓建築師與施作廠商更容易掌握施工程序及施作時間。在利用此模型作測試遇到無法滿足設計要求時，將會回到「骨架與表皮單元」步驟進行修改。

預組裝

從案例分析中，發現在小型室內案例建造過程在現場組裝之前會先在工廠將單元「預組裝」(圖 3-1, 3-83, 3-106)，但大型建築體因為形體太大而無法執行此步驟。「預組裝」過程主要先在工廠依放樣點施工圖來「放樣」後，將單元「組裝」測試，再「拆解」到現場組裝。此步驟主要作為組裝程序的研究，單元接和準確性的調整，施工時間的掌控及施工問題的解決。當在此步驟發現有單元無法組裝時，可以再回到「單元生產」步驟重新調整。而圖 3-1 過程中還包含單元「拆解」後，必須重新作「放樣點輸出」的步驟，主要為了在現場組裝時可以更精確(圖 3-112)。



圖 3-112

現場組裝

國外案例過程在現場組裝前先用與電腦連線的 3D 空間定位器「放樣」，因此可以很準確，「放樣」後直接就進行「組裝」。但圖 3-1 國內案例過程顯示在「放樣」及「組裝」後還需要做「校正」(圖 3-113)，主要是由於國內使用一般雷射定位器作「放樣」，同時加上單元在預阻裝過程後拆解及搬運過程中所造成的變形，也會導致誤差，故需要再次調整作「校正」。



圖 3-113

綜合以上對每一階段的分析比較，本論文研究可歸納出「先期 CAD/CAM 設計與建造過程」(圖 3-114)。

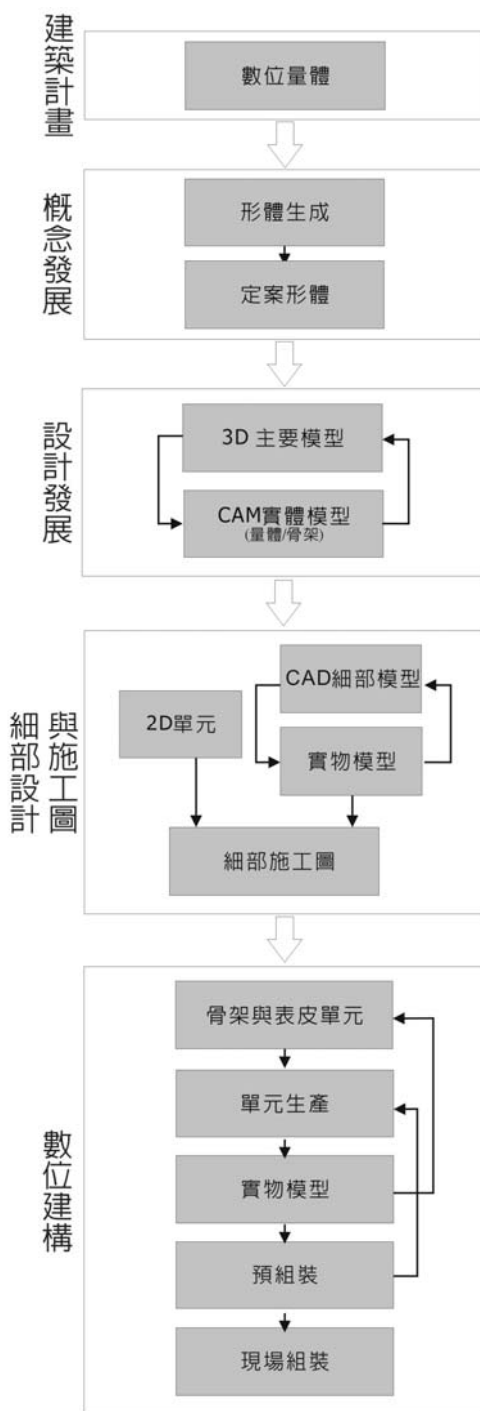


圖 3-114 先期 CAD/CAM 設計與建造過程