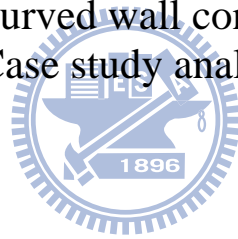


國立交通大學  
工學院工程技術與管理學程

碩 士 論 文

3D 曲牆施工技術之探討-案例研析  
3D Exploration of curved wall construction technology  
- Case study analysis



研 究 生：江榮發

指 導 教 授：曾仁杰 博士

中 華 民 國 九 十 九 年 六 月

3D 曲牆施工技術之探討-案例研析  
3D Exploration of curved wall construction technology  
- Case study analysis

研 究 生：江榮發  
指 導 教 授：曾仁杰

Student : jung-Fa Chiang  
Advisor : Ren-Jye Dzeng

國 立 交 通 大 學  
工 學 院 工 程 技 術 與 管 理 學 程  
碩 士 論 文

A Thesis  
Submitted to Degreeprogram of Engineering Technology and Management  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science  
in

Engineering Technology and Management

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 九 年 六 月

# 3D 曲牆施工技術之探討-案例研析

## 3D Exploration of curved wall construction technology - Case study analysis

研 究 生：江 榮 發

指 導 教 授：曾仁杰

### 摘 要

國內目前有關結構3D曲牆施工技術，文獻幾無案例可考，一般常見為2D曲牆結構之施工法，結構設計較為單純，曲線變化規則性或統一性，在軟、硬體需求和技術層次一般的平台即能作業，辦公室的軟、硬體皆能滿足施工圖之需求。而3D技術必須採較高階的硬體設備才能符合需求，其差別在於增加暫存記憶體容量、加大硬碟空間與採用具有高速圖形運算能力的影像加速卡，且需要的軟體也較為專業。作業工程師必須具備熟練的3D電腦技能及專業知識方能勝任。

本研究主要探討3D曲牆施工技術及施工可行性評估，並將規劃、設計至施工階段須考量之要點加以彙整，及提供國內針對3D曲牆施工計畫之訂定與風險評估。另提供施工計畫建議，就施工前與施工中應考量事項。研究剖析3D曲牆之關鍵技術，提供國內業界針對3D曲牆施工規劃參考。若能將該技術應用在複雜和更普遍的工程領域，發展更完整的技術及應用將指日可待。

3D曲牆施工技術為國內首度案例，施工難度非常高，為探討曲牆施工技術障礙點對成本、工期及工程風險的影響，本研究進行製作與實際建築物代表性之曲牆模型施工實驗，主要目的為確認其施工技術障礙作綜合性之驗證，而這些驗證結果將可做為未來興建施工相關參數之參考依據，藉此為未來3D結構曲牆施工提供最佳化的貢獻度。

**關鍵詞：**3D技術、施工技術、曲牆施工計畫、案例研究。

# **3D Exploration of curved wall construction technology –Case study analysis**

Student : jung-Fa Chiang

Advisor : Ren-Jye Dzung

## **ABSTRACT**

At present in internal the structure of 3D curved wall construction technology, literature almost no case may test, general common structure for the 2D curved wall construction methods, structural design relatively simple curve regularity or uniformity in hardware and software requirements and technical level general platform that is able to work, the office software and hardware Jieneng to meet the demand of construction drawings. The 3D technology must adopt a higher order of hardware to meet the demand, the difference is that the temporary increase in memory capacity, increase the use of hard disk space and computing power with high-speed video graphics accelerator card and software also need to be more professional. Operating engineer must have a skilled 3D computer skills and expertise before being qualified.

This study focused on 3D curved wall construction techniques and construction feasibility, and planning and design to construction stage of the main points to be considered to be pooled, and the provision of internal plans for 3D curved wall in the formulation and risk assessment. Another provision of the construction plan to write proposals, on the pre-construction and construction issues to be considered. Analysis of 3D curved wall of the key technologies to provide domestic industry planning for 3D curved wall for reference. If the technology used in complex and more general engineering, technology and the development of more complete applications will be just around the corner.

3D curved wall construction technology as the first domestic case of the construction is very high, curved wall of technical barriers to point to the cost, time and project risks, and actual production of this research building model representative of the construction of curved wall experiment primarily to confirm the construction of technical obstacles to a comprehensive verification, which verify the results will be an important reference for the construction of the construction parameters, so as to 3D structure for the future construction of curved walls offer the best of the contribution.

**Keywords : 3D technology , Construction technology , Curved wall Construction Plan , case studies.**

## 誌謝

睽違二十八年的學校生涯，如今能夠踏入校園重拾書本再圓求學之夢，恍如夢境一般，百感交集。本論文得以順利完成，首先要感謝恩師曾仁杰博士的悉心指導斧正，舉凡題目之訂定、觀念之建立、研究之主軸，乃至於許多疑難之釋疑，老師均不厭其煩地反覆指正，老師治學嚴謹的態度與求事細膩度，深深烙印在腦海，對於論文之撰寫具有深遠的影響。尤其在邏輯分析上的啟發，使我獲益良多，永銘於心，謹在此致上無限敬意與感激。

內審期間，承蒙交通大學王維志教授及中華大學楊智斌教授於百忙之中能撥冗蒞臨指教，針對本研究疏漏處不吝指正，並提出許多寶貴的建議，使得論文內容益臻完備與充實，在學期間，感謝曾仁杰教授、吳永照教授、陳春盛教授、黃玉霖教授、郭一羽教授、溫琇玲教授及王伯儉教授等授業解惑，使學生在營建專業學術領域上更為精進。

對於本研究充實的內容，感謝互助友達工地研討小組提供寶貴的建議，更感謝互助友達工地上級長官的支持，在施工技術研討上提供寶貴之建議，本研究得以益臻成熟而充實。其次，特別感謝精洲公司負責人陳有來、康經理添悟，不吝提供相關施工技術之建議與施工可行方案意見，在此，謹獻上最真摯的敬意與謝意。

由衷感謝我親愛的家人，在研修期間，全力的支持與鼓勵，始能無後顧之憂的完成學業。最後，謹將本論文獻給所有關心我的家人與朋友，願您們與我共同分享這份成果與喜悅。

研究生 江榮發 謹誌  
于國立交通大學工學院工程技術與管理學程  
中華民國九十九年六月

# 目 錄

摘 要.....	i
ABSTRACT.....	ii
誌 謝.....	iii
目 錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範圍與限制.....	2
1.4 研究方法與流程.....	3
1.5 論文架構.....	3
1.5.1 陳述研究動機與目的.....	6
1.5.2 擬定研究範圍與對象.....	6
1.5.3 國內文獻蒐集整理與回顧.....	6
1.5.4 專家訪談.....	7
1.5.5 本研究案例評估分析.....	7
第二章 文獻回顧.....	9
2.1 3D 技術在工程管理應用案例回顧.....	9
2.2 3D 技術資訊操作的基本條件分析.....	10
2.3 3D 技術套圖建模的應用與分析.....	11
2.4 應用 3D 技術套圖建模在圖管與界面的效益.....	13
2.5 探討 2D 曲牆應用 3D 建模技術之回顧.....	13
2.5.1 3D 建模技術在曲牆施工的效益.....	15
2.5.2 曲牆施工圖拆解及單元分割要領.....	15
2.5.3 從實體模型(Mock UP)試作探討施工注意事項.....	16
2.5.4 馬鞍曲牆結構分段施工流程.....	17
2.5.5 小 結.....	21
2.6 3D 曲牆工程設計回顧-以台中歌劇院案例.....	21
2.6.1 3D 曲牆結構特性對施工精密度的控制.....	22
2.6.2 3D 曲牆施工規劃前置作業界面整合.....	23
2.6.3 曲牆施工要徑進度規劃步驟.....	23
2.6.4 施工技術困難度的評估.....	24
2.6.5 透過曲牆實體試作研析改善施工方法.....	25
2.6.6 桁架鋼筋施工障礙模擬對策分析.....	26
2.6.7 本案例曲牆施工支撐架技術探討.....	27

2.6.8 曲牆結構施工步驟.....	28
2.6.9 應用 3D 技術建模放樣.....	30
2.6.10 3D 曲牆建模步驟概述.....	30
2.6.11 曲牆結構施工垂直升層計畫.....	34
2.6.12 小結.....	44
第三章 不同曲牆結構 Mock up 試作比較分析.....	46
3.1 特殊曲牆結構 Mock up 試作案例(一).....	46
3.2 標準單元曲牆 Mock up 試作案例(二).....	47
3.3 標準單元曲牆 Mock up 案例(二) 施工流程.....	49
3.3.1 桁架鋼筋製作流程.....	49
3.3.2 單元桁架曲牆構造製作流程.....	50
3.3.3 曲牆結構現場施工流程.....	54
3.4 曲牆混凝土配比選用比較與澆置流程.....	54
3.4.1 混凝土配比選用比較.....	54
3.4.2 混凝土澆置流程注意事項.....	55
3.5 單元桁架曲牆組裝工率分析.....	57
3.6 單元桁架曲牆組裝單價分析.....	58
3.7 小結.....	59
第四章 單元曲牆替代工法之成本與工期比較分析.....	61
4.1 單元曲牆工法比較.....	61
4.1.1 單元 3M*8M 曲牆結構組成之比較.....	61
4.1.2 單元曲牆吊裝工法之比較.....	63
4.2 不同工法單元曲牆施工流程與工期比較分析.....	63
4.2.1 原設計鋼筋桁架曲牆單元施工流程與工期.....	63
4.2.2 替代工法複合式曲牆單元施工流程與工期.....	65
4.2.3 替代工法施工流程與工期排程的優勢比較.....	66
4.3 替代工法單元曲牆結構成本比較分析.....	67
4.3.1 單元曲牆不同鋼材內骨架成本比較.....	67
4.3.2 曲牆主體鋼材結構差異性分析比較.....	69
4.4 曲牆結構座標控制點設置方法.....	70
4.5 小結.....	73
第五章 決策風險評估與分析.....	75
5.1 工程風險與施工障礙分析.....	75
5.1.1 假設工程的風險.....	75
5.1.2 影響工期不定因素.....	75
5.2 施工障礙風險分析.....	76
5.3 合約管理風險對承攬決策的影響.....	77
5.3.1 小結.....	79

第六章 結論與建議 .....	80
6.1 結論.....	80
6.2 研究建議.....	80
中文文獻.....	84
附錄 一 委員審查意見回應表 (續).....	86





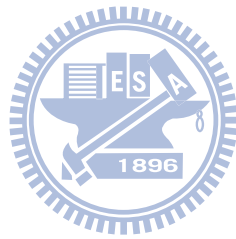
## 圖目錄

圖 1.1 研究流程圖 .....	5
圖 2.1 馬鞍曲牆 .....	15
圖 2.2 馬鞍曲牆 .....	15
圖 2.3 曲牆模型拆解分割圖 .....	16
圖 2.4 曲牆結構分段圖 .....	18
圖 2.5 曲牆施工流程圖 .....	19
圖 2.6 曲牆施工流程圖 .....	20
圖 2.7 主結構組合圖 .....	22
圖 2.8 幾何鋼筋單元 .....	23
圖 2.9 試作鋼筋桁架 .....	25
圖 2.10 關節楔形調整塊 .....	28
圖 2.11 免拆模鋼網剖面圖 .....	29
圖 2.12 曲牆混凝土分層澆置 .....	29
圖 2.13 初步模型示意圖 .....	31
圖 2.14 3D-鋼筋間隔及垂直面排列示意圖 .....	32
圖 2.15 拆解分割圖 .....	32
圖 2.16 單元鋼筋桁架曲線座標圖 .....	33
圖 2.17 粉刷完成面的控制點位 .....	33
圖 2.18 混凝土澆置升層圖 .....	35
圖 2.19 B1FL 版混凝土澆置 .....	35
圖 2.20 1FL 標準層混凝土澆置 .....	36
圖 2.21 第一層曲牆鋼構支撐組裝 .....	36
圖 2.22 第一層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝 .....	37
圖 2.23 第一層曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝 .....	37
圖 2.24 2FL 版混凝土澆置 .....	38
圖 2.25 第二層曲牆鋼構支撐組裝 .....	38
圖 2.26 第二層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝 .....	39
圖 2.27 第二層下部曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝及 3FL 版混凝土澆置 .....	39
圖 2.28 第二層中段曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝及 4FL 版混凝土澆置 .....	40
圖 2.29 第二層上部曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝及 5FL 版混凝土澆置 .....	40
圖 2.30 第三層曲牆鋼構支撐組裝 .....	41
圖 2.31 第三層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝 .....	41
圖 2.32 第三層曲牆鋼筋及速省模綁紮混凝土澆置 .....	42
圖 2.33 6FL 版混凝土澆置 .....	42

圖 2.34 第四層曲牆鋼構支撐組裝 .....	43
圖 2.35 第四層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝 .....	43
圖 2.36 第四層曲牆鋼筋及速省模綁紮，混凝土澆置 .....	44
圖 3.1 3D 曲牆圖 .....	46
圖 3.2 試作案例一實體曲牆之一 .....	47
圖 3.3 試作案例一實體曲牆之二 .....	47
圖 3.4 曲牆分割單元 .....	48
圖 3.5 試作案例二實體曲牆之一 .....	48
圖 3.6 試作案例二實體曲牆之二 .....	48
圖 3.7 試作案例二實體曲牆之一 .....	48
圖 3.8 試作案例二實體曲牆之二 .....	48
圖 3.9 桁架鋼筋製作流程 .....	49
圖 3.10 桁架鋼筋現場製作 .....	50
圖 3.11 桁架曲牆製作流程圖 .....	51
圖 3.12 桁架曲牆托架製作 資料來源：互助營造 (2008) .....	51
圖 3.13 桁架曲牆鋼筋組立 .....	52
圖 3.14 托架正面圖 .....	52
圖 3.15 托架側面圖 .....	52
圖 3.16 托架頂視圖 資料來源：本研究資料整理 .....	53
圖 3.17 桁架鋼筋組裝托架設計圖 資料來源：本研究資料整理 .....	53
圖 3.18 單元曲牆組裝完成圖 資料來源：互助營造(2008) .....	53
圖 3.19 現場施工流程圖 .....	54
圖 3.20 現場流程圖 .....	55
圖 3.21 單元曲牆混凝土澆置工序 .....	57
圖 4.1 鋼筋桁架結構 .....	61
圖 4.2 Compound Wall 複合式結構 .....	61
圖 4.3 曲牆鋼筋組合步驟 .....	62
圖 4.4 桁架鋼筋結構曲牆 .....	62
圖 4.5 複合式鋼架結構曲牆 .....	62
圖 4.6 桁架鋼筋曲牆施工流程圖 .....	64
圖 4.7 桁架鋼筋單元曲牆工期 .....	64
圖 4.8 複合式結構曲牆施工流程圖 .....	65
圖 4.9 複合式結構單元曲牆工期 .....	66
圖 4.10 座標作業流程 .....	71
圖 4.11 測量座標圖 .....	72
圖 4.12 測量定位圖 .....	72
圖 4.13 測量定位圖 .....	73

## 表目錄

表 2.1 電腦硬體與相關設備 .....	10
表 2.2 電腦軟體設備 .....	11
表 2.3 專業知識具備一覽表 .....	11
表 3.1 混凝土配比試驗比較表 .....	55
表 3.2 單元曲牆組裝作業工率分析 .....	58
表 3.3 單價分析表(不含鋼筋材料) .....	59
表 4.1 內骨架成本比較表 .....	69
表 4.2 主體結構鋼材分析比較表 .....	70



# 第一章 緒論

一般工程設計圖說係經層層審查程序核可，內容應正確無誤，但從 Vaysburd(2004) 引述法國和瑞士的調查報告指出，約有 37% 的工程缺失或瑕疵是來自設計不良，衍生施工困難與風險，而 3D 曲牆結構即為施工技術困難，風險極高之設計，國內從高鐵於 2000 年引進 3D 技術應用迄今，已將近十年的時間，就 3D 技術的發展雖已趨純熟，應用也越來越廣泛，無論是在建築物外觀選擇、檢討測量精度、GIS 資料庫建立或是媒體宣傳等，都有相當的成效。

然而就 3D 曲牆施工技術與規劃方面卻缺乏可參考案例，從施工設計規劃、施工作業流程與技術之運用上，無法完全掌控管理。為驗證特殊結構系統之施工可行性與風險評估，本研究將針對實際相關案例，就 3D 繪圖建模程序，座標放樣等施工作業流程，並透過案例實體模型施作過程，找出施工技術障礙，提出解決建議方案與施工可行性，針對曲牆結構施工方法、流程、工期、成本、風險等作比較分析，提供未來 3D 曲牆施工技術的參考依據。



## 1.1 研究背景與動機

在工程進行施工規劃時，通常會把專案規劃者(Planner)的專業概念或經驗，量化成為書面資訊，匯集成施工計畫書，內容包含專案目標、施工方法與流程、工期、進度、人力、機具、材料、臨時設備、品控計畫等。作業文件皆以 2D 書面呈現，尤其在施工方法、施工流程與施工進度陳述，皆以文字敘述輔助圖形來呈現；由於 2D 書面的文字陳述或是圖形表現法相對於 3D 空間其說明度與檢核度不高，須要憑藉想像與解讀，故 2D 書面資訊會比較容易導致專案管理者花費許多時間在解讀文字圖形、溝通、變更、解決衝突等問題。設計者對圖面的表現無法以 3D 的概念詮釋空間對應關係，將形成現場施工衝突，產生極大的施工障礙與困難。

為確保 3D 曲牆之施工可行性，及探討施工技術障礙點，本研究進行透過由 2D 的套圖，應用 3D 建模形成立體空間實體模型之試驗分析，分別就曲牆混凝土的配比、桁架鋼筋的彎折、曲牆的結構支撐、座標放樣要領等作審慎的評估與實作的驗證，以彙集曲牆施工之參考作為施工可行性評估依據。根據相關之評估與試驗所得成果，提出可行的施工方案供作施工規劃參考，配合未來施工之需求，針對曲牆施工實驗所掌握

的工程技術與研析結果，從施工規劃、施工方法、工期、成本、風險等比較分析，提供曲牆施工技術更具體之經驗成果，為本研究之動機所在。

## 1.2 研究目的

回溯國內過去特殊 3D 結構曲牆，營建工程專案相關文獻資料調查得知，針對結構區牆工程技術相關文獻之資料幾無可查，尤其在實際施工案例之分析探討與資訊蒐集更加貧乏，而其文獻對曲牆結構之探討也僅侷限於一般營建工程之描述，因此希冀經由本研究之實作試驗分析過程，能對 3D 結構曲牆工程施工技術作有系統之分析與彙整，藉此所進行之分析彙整以提供 3D 結構曲牆工程施工技術較完整之資訊，俾使爾後業主、工程顧問、建築師、專業施工廠商等，有所依據參考。

為建立改善施工技術的可行性研究目的，本研究進行實作試驗工率分析與工法研討，例如實際施作等比例 3D 曲面牆研討可行施工法、分析其 3D 放樣及結構支撐等。而主要著重在曲牆結構施作工法、工期、成本之研究，透過這樣的實驗可供做日後業界的施工案例參考，對於曲牆施工技術的提升有莫大的幫助。對本案例施工圖說、曲面結構體放樣、施工及支撐計畫、分區施工、工期計算、成本等進行研析，將可促進國際施工技術、人才及經驗交流，更能提昇國內特殊工法技術營建競爭力。

## 1.3 研究範圍與限制

營建工程施工技術，如何將研究資訊作有效整合，是本研究的重點，也藉著特殊 3D 曲牆案例加以說明。該案例設計的複雜性，施工技術的高難度，造成施工規劃與步驟有別於一般施工程序，尤其在不規則三維曲面施作部分，造成施工技術執行困難。以 3D 視覺化建模，模擬實體模型進行施工可行性分析，探討施工流程中的障礙、成本、工期、比較等。本案例研究針對 3D 建模空間元件模型，再透過拆圖單元分割計畫，建立施工流程，匯集施工障礙分析提出對策，確立可行性施工方案。

本研究針對 3D 曲牆施工技術案例之研究，其研究重點著重在主結構為不規則三維連續曲牆之鋼筋混凝土構造。並將針對實體曲牆模型之鋼筋工程、牆體支撐架、混凝土澆置及施工障礙等，衍生工程風險、影響決策因素、施工計畫等作為研究範疇。

## 1.4 研究方法與流程

3D 套圖建模及曲面拆解分割技術攸關曲牆結構施工的成敗，也是施工最關鍵之技術。有關曲牆結構施工技術，如 2D 馬鞍型曲牆，藉由 3D 的實體模型建模技術，從模型的空間概念推展模型製作工序，進而導出施工流程步驟，例如藉由 3D 技術模擬立體空間，從空間概念的相互衝突找出工程界面影響因子，進而找出問題事前防範對策。有關曲牆施工實際案例，雖然就 3D 軟體多媒體技術的運用國內已有不少案例經驗，但相較於應用於工程施工技術上顯得缺乏。

本文將針對案例所做實體模型的試作，研擬出來的施工流程與步驟，彙整施作過程中的實務經驗，提出工法的分析比較，以供後續工程評估相關參考。

**步驟一、文獻探討**：藉由探討過去有關曲牆結構工程及一般工程施工技術案例相關文獻，並就其有關施工技術之論文、期刊，進行研析與彙整作業，提出本研究之特殊性及過去相關研究之差異性。

**步驟二、專家訪談**：本研究之探討，主要針對參與實際有關 3D 曲牆研討之專業主管、工程師及模型施作的專業廠商負責人等，進行訪談。工程師訪談內容主要針對實體模型製作過程之困難點，衍生問題之所在與問題解決對策建議，而專業主管乃針對施工計畫、工期、成本、施工障礙與工程風險建議方案，專業廠商負責人則針對施工性及工率之探討，在彙整訪談意見與建議事項後，彙整實驗結果做研究分析及提出解決建議方案。

**步驟三、案例研究**：本研究雖經過實際模型實驗及實際參與模型施作之專家的訪談，得知 3D 曲牆施工技術的複雜度，並彙整實驗結果之數據與研析解決對策，但對於整體施工規劃與技術障礙之排除仍無實際之經驗與舊法依循，因此，希望透過本研究之研討小組實際針對本案例作施工技術評估探討，對於整體施工的執行困難，衍生工期、品質、成本的問題，做深入廣泛的研析，進而綜合佐證由前項實驗成果所下之結論。

## 1.5 論文架構

本文架構共分六章。第一章緒論，對研究背景動機、目的、範圍、方法與流程做一整體性介紹。第二章文獻回顧，敘述曲牆設計與施工特性、分別立案立的介紹。第

三章針對不同曲牆模型試作的比較分析，從試作的流程、施作的工法與支撐的探討、單元試作的工率分析、單元花費的成本作分析。第四章提出替代工法可行性分析建議，以及替代性工法的施作成本、工期、總體曲牆結構的差異性比較。替代工法施工考量，再以施工照片簡介施工流程，再提出可行性施工建議，以及施工應注意事項供參考。第五章從案例的探討分析中，提出工程風險與施工障礙風險的評估建議，第六為結論與研究心得建議。

本研究將從相關文獻彙整研究了解，輔以實際案例之實作試驗，並透過技術研討評估，經過有系統的彙整、工率分析、實作推導，提出有關實作工率的可靠性，並進一步探討 3D 曲牆施工技術與工期及成本管控關鍵因素。本研究首先從實際工程案例中先了解 3D 曲牆的複雜性，然後作分析，經過實作試驗過程，萃取關鍵素，並透過研究進一步分析 3D 曲牆放樣及支撐問題以了解施工技術難題與工程風險，其關聯性的流程如圖示 1.1 所述。

1. 陳述研究動機與目的→2. 擬定研究範圍與對象→3. 排定研究步驟與流程→4. 文獻蒐集與回顧→5. 專家訪談→6. 工程案例評估研析→7. 整理分析資料→8. 3D 曲牆工程案例探討影響工程決策因素→9. 歸納資料研析比較→10. 結論與建議→11. 將研究流程的過程串聯後並撰寫研究成果論文。

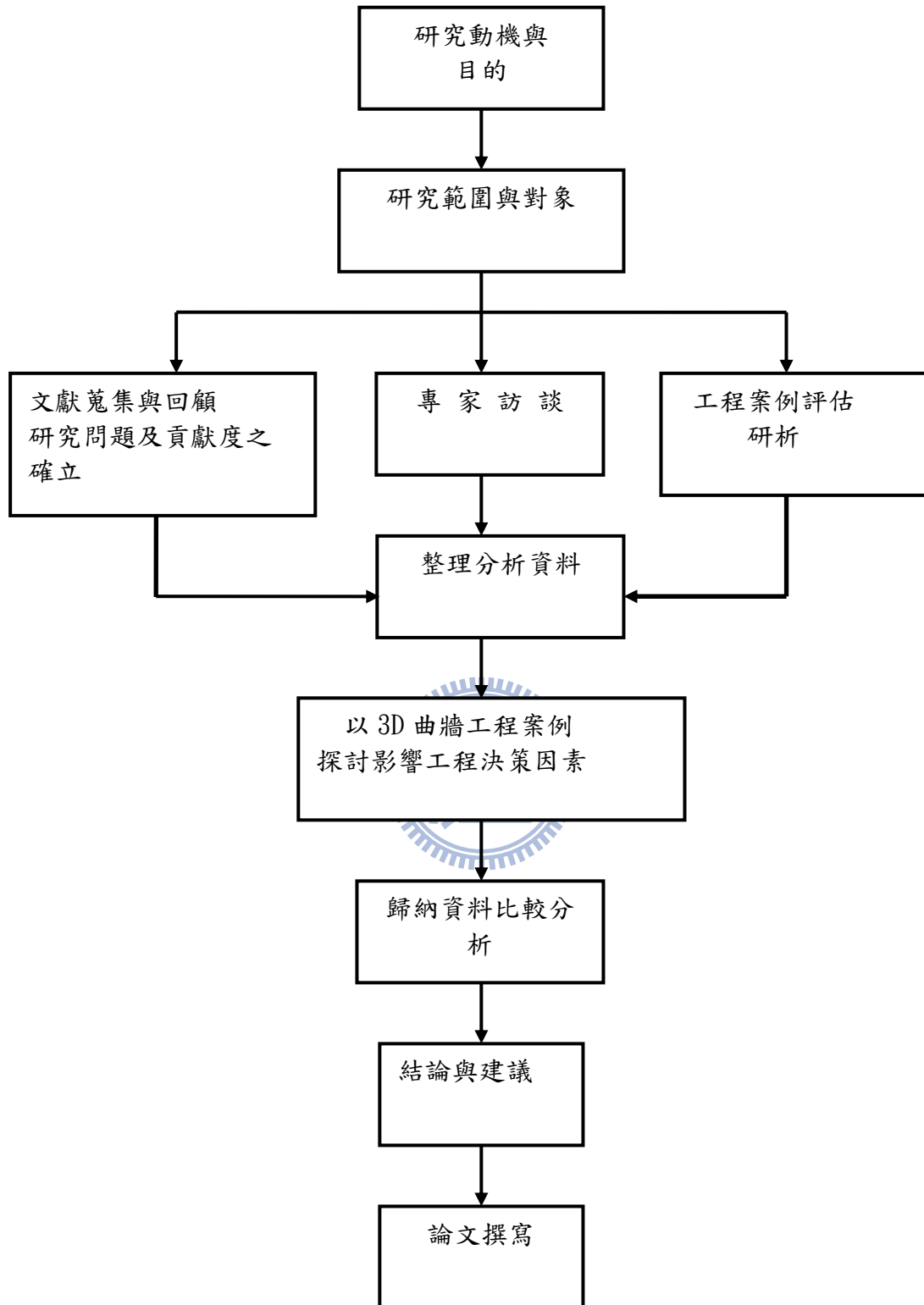


圖 1.1 研究流程圖  
(資料來源：本研究整理)



### 1.5.1 陳述研究動機與目的

為確保曲牆之施工可行性，及探討施工技術障礙點，本研究進行實體模型之試驗，分別就混凝土的配比、鋼筋的彎折、曲牆幾何形狀的定義與曲牆支撐、放樣方式等作審慎的評估與試驗的驗證以萃取曲牆施工之數據作為施工可行性之參考依據。根據相關之評估與試驗結果，提出曲牆施工之建議方案，並提出可行的施工方案評估，供作施工規劃之參考，為配合未來施工之需求，針對曲牆施工實驗所掌握的工程技術與研析結果，據以擬定整體工程施工計劃，俾作為實際施作之參考依據。並彙整有關 3D 曲牆施工技術障礙與建議方案，俾提供營建施工技術更具體之貢獻。

回溯國內過去特殊 3D 結構曲牆，營建工程專案相關文獻資料調查得知，針對結構區牆工程技術相關文獻之資料幾無可查，尤其在實際施工案例之分析探討與資訊蒐集更加貧乏，而其文獻對曲牆結構之探討也僅侷限於一般營建工程之描述，因此希冀經由本研究之實作試驗分析過程，能對 3D 結構曲牆工程施工技術作有系統之分析與彙整，藉此所進行之分析彙整以提供 3D 結構曲牆工程施工技術較完整之資訊，俾使爾後業主、工程顧問、建築師、專業施工廠商等，有所依據參考。

### 1.5.2 擬定研究範圍與對象

本研究的重點，藉由特殊 3D 曲牆案例加以說明，陳述案例設計的複雜性，施工技術的困難度，其造成施工規劃與步驟不同於一般施工程序，尤其在不規則三維曲面施作部分，所造成施工技術執行的困難。以 3D 視覺化建模，模擬實體模型進行施工可行性分析，探討施工流程中的障礙、成本、工期、比較等。

本研究針對 3D 曲牆為案例施工技術之研究，其研究範圍結構含連續曲牆 RC 結構、並將針對實體曲牆模型之鋼筋工程、牆體支撐架、混凝土澆置及施工障礙，衍生工程風險、決策因素、施工計畫等為研究範籌。

### 1.5.3 國內文獻蒐集整理與回顧

透過文獻探討過去有關 2D 曲牆案例施工要領或 3D 技術的應用、曲牆施工技術及一般工程施工技術案例的差異性，針對相關論文、期刊，特殊曲牆設計案例，進行研究分析與彙整比較，提出本研究之特殊性及過去案例相關施工技術之差異性，作有

系統的分析比較。

由於相關文獻對於特殊施工技術，如三維曲牆施工實際案例的記載相形見拙，國內無實際案例可供探討，故僅就其有關 3D 技術應用於工程管理，或工程施工技術有關聯性之文獻，特殊曲牆設計試作模型經驗，彙整收集並加以分析探討，從其相關施工技術的案例中，推導施工流程作為本研究所需的基本參考。

#### 1.5.4 專家訪談

有關 3D 曲牆施工技術的實務經驗或可參考施工技術的文獻缺乏，因此，除收集相關施工技術文獻、專業期刊、施工技術等研究報告，作為本研究參考依據外，特就相關施工技術專業廠商負責人、結構工程師、施工作業主管等進行訪談，將其訪談之施工經驗與建議，作為研究分析的資料收集與參考依據。

本研究之探討，主要針對參與實際有關 2D 或 3D 曲牆研討之專業主管、工程師及模型施作的專業廠商負責人等，進行訪談。工程師訪談內容主要針對實體模型製作過程之困難點，衍生問題之所在與問題解決對策建議，而專業主管乃針對施工計畫、施工流程、工期、成本、施工障礙與工程風險建議方案，專業廠商負責人則針對施工性及工率之探討，在彙整訪談意見與建議事項後，彙整實驗結果做研究分析及提出施工可行性建議方案。

#### 1.5.5 本研究案例評估分析

本研究透過實際模型實驗及實際參與模型施作之專家的訪談，得知 3D 模型可用於施工可行性的初步評估，減少界面問題，有助視覺接收，減少重複作業，改善精度，增強溝通。3D 模型的建立，便於設計者的細部評估、執行與監控。進而依此規劃流程方案，以及透過建模過程，評估不同設計方案。

3D 曲牆設計的複雜度，以及施工技術的高難度，工程界面的繁複，從實驗結果之數據加以研析比較，並提出解決對策。但對於整體施工規劃與技術障礙之排除仍無實際之經驗與舊法依循，因此，希望透過本研究之研討實際針對案例作施工技術評估探討，對於整體施工的執行困難，施工障礙所衍生工期、品質、成本、風險的問題，做深入廣泛的研析，進而提出可行性施工方案及建立施工流程，供施工決策之參考。

## 1.整理分析資料

藉由訪談的過程與建議，綜合試作實驗結果的研究分析，輔以研討小組評估出來的意見，彙整及分類做完整的研析施工建議資料。

## 2. 工程案例-探討影響工程決策因素

從工程案例中探討其施工困難度與可行性分析，從規劃設計的合理性分析，招標合約的公平性與潛在風險的評估，並藉由 3D 曲線套圖建模的實體試作，確認施工流程與施工瓶頸之所在，據以作為工程決策依據。

## 3. 歸納資料研析

將試作模型的相關數據與研討小組評估與建議作綜合整理與分類，提供後續研究參考依據。

## 4. 結論與建議

彙整研究分析資料提出理論架構及案例研究成果，並建議未來之研究發展方向，撰寫本研究之完整報告。



## 第二章 文獻回顧

針對國內有關 3D 技術應用在曲牆結構之施工技術探討之文獻、案例、相關技術經驗研討等缺乏，尤其應用在曲牆施工技術方面更顯匱乏，應用 3D 技術曲牆獨特的設計構想，獨創結構無柱樑系統設計及特殊工法等，造型特殊且施工困難度相當高，本章節就幾項重要的主題進行文獻回顧，希望透過國內 3D 技術及特殊曲牆施工技術施工案例，從 3D 套圖、結構放樣、模型實體試做、施工計畫、工期評估等，彙整分析比較，對其施工可行性及待改善事項，作歸納建議，而這些分析結果將可做為未來實際施工相關決策之參考依據，藉此提供未來 3D 技術與曲牆施工具體可行之施工方案。陳述如下：

1. 3D 技術在工程管理的應用。
2. 資訊技術在工程上扮演的角色，由 2D 到 3D 的演進優勢及在資訊科技為背景的 3D 建模應用，對工程技術上的貢獻。
3. 施工可行性的探討，針對設計、規劃、施工階段影響因子，作施工技術、工期、成本的分析比較。
4. 決策影響，針對施工的評估分析比較，對於影響決策因素做探討。



### 2.1 3D 技術在工程管理應用案例回顧

3D 技術應用在營建工程的施工及工程界面之管理，以高鐵(S250 標)新建車站中，大量採用 3D 技術及虛擬施工，預先在電腦中模擬設計模型，可以協助解決設計盲點及檢討施工問題，找出施工界面關鍵點。高鐵六個新建車站中，唯一大量採用 3D 技術，虛擬施工的工地，利用事前在電腦中模擬設計成品，能有效地解決設計盲點、檢討施工問題，並找出介面關鍵點，使得施工及協調更為順暢。截至目前為止，運用 3D 技術可解決檢討內容包括：結構系統配置問題、測量及排水系統整合、空間設計合理性與否、設計與施工套圖界面整合及圖說不清檢核等問題，並能克服 SRC 構造鋼筋穿孔的套圖問題，因此，藉由 3D 技術的應用在施工技術上解決了複雜的施工界面問題。(黃隆茂、楊定良 2002)。

將該技術應用在更複雜的 3D 曲牆結構施工技術上，透過 3D 套圖建模技術，模擬出實體模型並轉換為施工圖，藉由建立空間概念進行施工流程拆解，將能推展出更成熟的曲牆施工技術方法。由於能夠在施工前便模擬出設計上的盲點與衝突，大大降低工程延

宕及施工錯誤的機會，在提高設計之品質有明顯的助益。3D 技術所展現在工程上的貢獻與實力，已受到營建業界的重視，若能將該技術應用在更複雜和更普遍的工程領域，發展更完整的技術及應用將指日可待。

## 2.2 3D 技術資訊操作的基本條件分析

3D 技術的操作必須在軟、硬體需求和技術層次較高的平台始能作業，一般的軟、硬體是無法滿足作業需求的，因此必須配備較高階的硬體設備才能符合需求，主要的差別在於增加暫存記憶體容量、加大硬碟空間與採用具有高速圖形運算能力的影像加速卡，其所需的軟體為專業使用。其次操作工程師必須具備較高的電腦技能及專業知識始能勝任，另需具備營建工程專業知識並熟悉相關軟體及現場實際施工的歷練。茲就 3D 技術操作平台所需軟硬體設備配置分析陳述如下：

1. 電腦硬體與相關資訊設備的配置。詳表 2.1。
2. 軟體設備及主要作業需求。詳表 2.2。
3. 操作工程師應具備之專業知識，詳表 2.3。

表 2.1 電腦硬體與相關設備

名稱	型號或規格	備註
中央處理器	Intel Pentium 1.60G Hz	
暫存記憶體	1 G Byte	
硬碟空間	120 G Byte	
影像加速卡	Matrox parhelia	
音效卡	Advance AC97 Audio	內建
光碟機	52 倍速讀取	
燒錄機	Benq 40x12x48	40 write /12 rewritable/8 read
數位相機	Fuji-F401 2M pixels	
掃描器	Mustek Bear Paw 1200CU	
彩色印表機	HP designjet 10ps	

資料來源：黃隆茂、楊定良(2002)

表 2.2 電腦軟體設備

軟體名稱	主要用途	備註
AutoCAD 2002	2D 圖檔編輯和 3D 模型建立	2D 套圖
Microstation Triforma V8	2D 圖檔編輯和 3D 模型建立	3D 套圖與設計整合
Photoshop 7.0	影像處理及材質編輯	
3D Studio Max 5.0	3D 模型貼圖、打燈光及動畫製作	
Acrobat 4.0	向量式圖檔與點陣圖之轉換	
Premiere 5.0	影像、動畫剪接與編輯	

資料來源：黃隆茂、楊定良(2002)

表 2.3 專業知識具備一覽表

專業訓練	必備	建議具備	專業訓練	必備	建議具備
工程圖學	★		平面測量	★	
影像處理		★	建築基本概念	★	
結構 RC	★		建築法規		★

資料來源：黃隆茂、楊定良(2002)

## 2.3 3D 技術套圖建模的應用與分析

運用 3D 模擬軟體來建立產品的 3D 模型，是專業設計師不可或缺的技能之一。建模軟體有很多種，如 3Ds Max 較適合建築、室內設計或動畫領域，專業設計師較常用到的軟體有：Catia、ProE、SolidWorks、Alias、Rhino 等，建模的基本概念都是相通的，只要能夠精通一到二套，大概也就足夠應付工作上需求了。

建模(Modeling)一般分為實體建模(Solid Modeling)和曲面建模(Surface Modeling)，實體建模指的是建出來的模型以實體成型為主，而曲面建模則是建立零厚度的面，最後將所有的縫織結起來，再轉換為實體。這種方式往往用在建立表面較複雜的模型，如不規則曲面。在建模時通常會同時運用這兩種方式，不須特別規定於某種方式。其作業要領陳述如下：

## 1. 設計圖面及相關檔案蒐集：

由於 3D 的模型是藉由 2D 圖面資料而獲得，取得足夠的圖面資料，以營建工程為例應蒐集的設計圖包含：平面圖、剖面圖、各向立面圖、樓梯平面圖、樓梯剖面圖、門窗詳圖、結構平面圖、大樣圖等。

## 2. 轉換檔案格式要領：

國內所使用的 CAD 格式，大多採用 AutoCAD 平台的 DWG 檔，由於 3D 模型主要在 Microstation 平台下建立、解析與判讀，故必須將副檔名為 DWG 的檔案轉換格式為 Microstation 平台所使用的 DGN 檔，(目前 Microstation V8 版以後已可支援 DWG 檔，因此可以省去轉檔作業)，轉檔之後必須檢查轉檔前後差異，才能確保檔案之可靠度。(黃隆茂 2001)。

## 3. 引用 2 D 圖檔資訊建構 3 D 套圖：

因施工需求，將既有的設計圖面，依正確座標位置與比例重疊。一般以 2D 套圖來檢查設計圖面問題已相當普遍，但 2D 套圖只能發現局部問題，欲建立 3D 模型，必須依據 2D 圖面的資訊，因此對於 2D 圖面的深入瞭解，將有助於 3D 模型的建立。

## 4. 清圖：

清圖則是由具備建築法規、設計知識或施工經驗者，來檢查該設計圖是否缺圖、設計適當否、合乎法規與否或是設計上的錯誤，對於具備工程經驗的 3D 工程師而言，建構 3D 模型的同時，即是在做清圖工作了。

## 5. 影像輸出與製作報告：

為了幫助設計者瞭解 3D 工程師清圖後之問題所在，且能迅速解決問題，並將問題輸出成影像，便於 e-mail 傳送，或作為報告的附件，使設計者容易理解問題重點。以高鐵 S250 標案例，將發現的設計問題製作成 RFI(資料查詢表 Request for Information)的報告方式，要求設計者澄清或更正設計圖不明或衝突之處，以利追蹤過程與結果。(黃隆茂 2001)。

## 2.4 應用 3D 技術套圖建模在圖管與界面的效益

運用 3D 技術套圖建立模型，在高鐵 S250 標工程發掘問題出來時，讓設計者有充足的時間提供正確的圖面給施工者。而經統計高鐵 S250 標所發出的 RFI（資料查詢表 Request for Information）中有 85% 在該作業是在施工 6 個月前，便將問題解決。而在 3~6 個月前解決問題的也有 8% 作業，只有 7% 在 1~2 個月前才解決問題的，因此，也縮短了承包商清圖的前置作業時程，改善設計圖的品質，且降低了承包商因損失向業主求償的機會。（黃隆茂、楊定良 2002）。

由前案例使用 3D 技術應用在設計規畫前段清圖及施工階段界面套圖，藉由套圖建立 3D 模型檢討相關設計界面，例如 機電設備、消防管線、空調管線、給排水管等，利用三度空間的虛擬呈現不同層次界面的衝突點，進而預作防範提供正確設計圖面供施工者。因此，應用 3D 技術之套圖建模，不但幫助設計者能預作防範提供正確圖面，而施工者也透過 3D 套圖三度空間的建模，達到了工地施工界面管理的諸多效益。

## 2.5 探討 2D 曲牆應用 3D 建模技術之回顧

為瞭解運用 3D 技術所達到的實質成效，在技術應用應注意事項分類成七大議題：結構系統問題、測量、空間合理性與否、設計與施工界面整合、結構曲面的校正、建築法規需求、圖面資訊不足等七大類，提出較詳盡的說明。陳述如下：

### 1. 結構系統問題

本節所探討的結構曲面問題，主要是探討結構曲面計算的邏輯、構件型式、外觀不合理或與建築設計不符處，足以影響結構或改變配筋型式者。而 3D 模型建構的程序，依次是以柱、樑、版、的順序建立，在建立模型的過程中，同時也檢討結構系統的問題。

### 2. 測量系統座標問題

系統上即使是一個小小疏忽，所造成的影響都相當深遠，因此對於系統問題必須加以檢討，

### 3. 空間合理性與否

本節所提的空間合理性問題，主要是 3D 曲牆結構的設計，假如因內部協調與整合之不當，所造成空間曲面的連接明顯不合或衝突，即必須檢討重新設計。



#### 4. 設計與施工界面整合

所謂設計與施工界面整合係指曲牆結構施工進行中，相關平行包如機電、空調、消防設備等，因屬不同合約，所產生的設計問題衝突、界面無法銜接等問題。

#### 5. 結構位置或牆位校正

建築設計者因空間的需求，所配置的柱牆放樣圖，並不一定符合結構的需求，如果承包商依建築設計者的柱牆位放樣圖去放樣施工，後來才發覺不符合結構設計的需求時，那麼問題就嚴重了，因此結構體的位置或柱牆位放樣圖的精確度必須加以檢討，預先注意到此問題，先行規劃檢討精確性，則可避免重大的錯誤產生。

#### 6. 建築法規需求

一般建築設計案雖經建管單位事先審查通過，取得建造執照後方可施工，抽樣性的審查，其遺漏在所難免，3D 建構是一種全面性的檢討，因此容易發現遺漏之處。

#### 7. 圖面資訊不足

圖面資訊不足，在清圖中是最容易辨識的狀況，而 3D 模型的建構，必須完全依照 2D 的設計圖，若圖面遺漏時，將無法建構 3D 模型，因此除非特殊狀況允許，如自行假設的 3D 模型是不能夠被允許的。



曲牆施工國內較具代表性者如：高雄世運主場館清水牆 RC 構造馬鞍型曲牆。馬鞍結構在國內施工屬於創舉，其外觀為清水牆設計，其造型屬 2D 曲線，相當獨特。而如何突破舊有傳統鋼筋混凝土施工及精準放樣連接鋼構件，為極高難度施工技術之挑戰。該馬鞍型曲牆構造為曲面 2D 曲線構造，如圖 2.1、圖 2.2 所示，整體曲牆由二維曲線構造形成，配合建築設計區分不同曲牆單元構造，其關鍵技術重點在於每一單元曲牆必須透過 2D 解圖之分割，放樣、系統分割接合計畫及實體模型試作(Mock UP)，作為曲牆施工推進之工序及施工困難點因應對策資訊收集。



圖 2.1 馬鞍曲牆



圖 2.2 馬鞍曲牆

資料來源：互助營造(2008)

### 2.5.1 3D 建模技術在曲牆施工的效益

Cory (2001)指出一般而言書面形式具有方便、成本低廉，並有舊有之習慣優勢，加上各種表現法，如文字敘述、符號、數字、圖形等，來進行資訊傳遞的工作，改善了資訊傳遞中的解讀與想像的模糊資訊，並藉由預測與不斷更新來更新不確定資訊；將原本難以量化的資訊轉換成書面形式(Paper-based)，其一可以溝通專案概念(Communication)，並可以進行對策研擬(Measure Planning)，提供專案資料交換(Data exchange)，作為決策與管理上的依據，以期將人為因素降低，確保專案執行順利流暢。但是所傳遞的資訊屬於二維度(2-D)資訊，對於第三維度空間需求，必須仰賴設計規劃者的想像與承包施工廠商的理解能力或經驗來彌補。而本文所探討的曲牆重點其施工對策、空間需求，以 2D 形式表現會顯得複雜與繁瑣。

由於電腦輔助的進步，三維度的空間已被運用在設計階段，3D 比 2D 在空間中多了一個維度，可以讓人更易瞭解、資訊更連續的優點，建築中 3D 數位模型即藉由電腦輔助工具，將所需之空間感納入 3D 模型中。2D 曲牆結構之曲線繪圖空間座標解圖、單元分割、藉由 3D 建模實體模型，可確立其施工流程、施工技術困難點之因應與解決、從建模過程資訊收集、歸納分析、彙整施工流程中碰上的瓶頸，提出施工可行性與待改善事項建議，據此提升了曲牆施工技術的效益。

### 2.5.2 曲牆施工圖拆解及單元分割要領

3D 建造元件模型，主要呈現展現在 3D 空間圖像上的型態，實際要建造元件，屬於

實體部分，3D 程序模型主要呈現一個元件之間或元件與其他相關元件模型之間的關係。3D 模組必須涵蓋資料庫系統，用以儲存、提供、分析、統計相關資料，如尺寸、體積、型態等，並產出圖像，提供施工者決策的資訊。要建立一個正確的曲牆 3D 模型，必須花費相當多時間去比對和瞭解設計圖，因此 3D 工程師也比現場工程師更瞭解圖面，這使得 3D 工程師在審查承包商的施工圖時，比現場工程師更有效率及正確性。

馬鞍曲牆為 2D 曲線構成之二維弧形曲面，無法以傳統施工圖面據以施作，必須透過 3D 建模技術將平面圖轉換立體空間為虛擬模型實體，再依此製造圖說進行拆圖及單元分割，如圖 2.3 所示，將牆體拆解為下部及上部兩個單元。

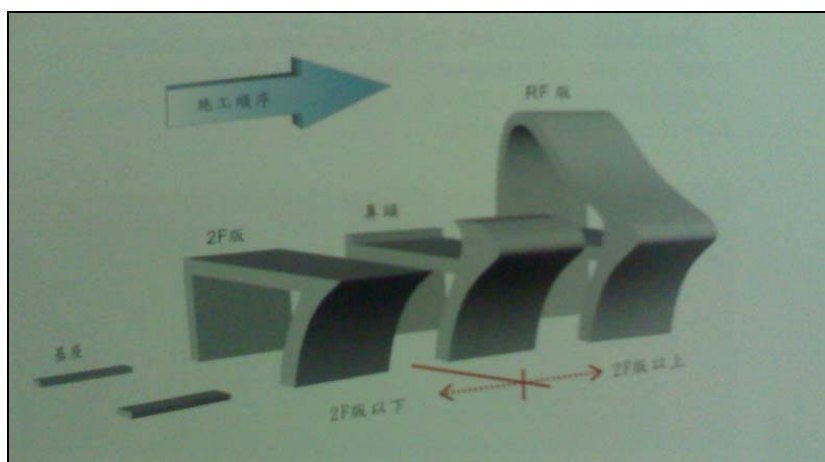


圖 2.3 曲牆模型拆解分割圖  
資料來源:互助營造(2008)

1. 從單元分割圖之拆解程序可以得知，從 2D 平面圖由 3D 建模技術轉換成立體空間之實體模型，可更清晰了解曲牆構造及施工程序的建立步驟，從拆解圖面的步驟可研擬出曲牆施作的工序，據以建立施工流程的依據。
2. 由施作工序建立的施工流程，進一步探討施工技術規劃及施工方法的確立，進行施工困難點因應對策，提出施工可行性及施工計畫之訂定參考。

### 2.5.3 從實體模型(Mock UP)試作探討施工注意事項

馬鞍曲牆結構為特殊造型曲面牆體構造，在正式進行現場施工前，為確立施工過程中工法的確立與困難點的解決，必須試作一實體模型來確認主要施工注意要項：

1. 曲牆鋼模組裝、拆除、推進過程檢討：

從實體模型試作中，檢討出曲牆鋼模的分割組裝順序及拆除的工序，在第一單元完成後，第二單元如何快速推進，並考量牆體精準定位與前進，這些都是在實體模型試作過程中需要檢討的。

## 2. 牆筋配筋續接綁紮方式的檢討：

單元曲牆的分割，必須考慮到每單元曲牆配筋續接之可行性，從實體模型中，檢討每單元鋼筋續接技術問題，並對於標準單元以外之不規則曲面之牆筋，如何續接密合達成連續性之完整曲面牆體。

## 3. 混凝土配比、坍度及澆置方式的訂定：

二維曲面牆體的混凝土澆置，要確保混凝土表面品質，困難度相當高，故在其配比的選擇及水灰比的控制，澆置方式的選擇，這些問題必須透過曲牆實體的試作，始能一一發現並提出解決方案。

## 4. 相關構件預埋件安裝配合方式檢討：

透過清圖及3D建模方式，能套繪出構件安裝預埋的位置解決介面問題。

## 5. 水電配管介面預埋方式檢討：

藉由3D建模的套圖檢討，可精確套繪水電相關配管衝突點，解決問題。

6. 藉由前述實體模型的試作過程中，研擬出曲牆施工作業流程，據此發展曲牆施工計畫及可行性施工方案。

## 2.5.4 馬鞍曲牆結構分段施工流程

馬鞍曲牆結構施工透過3D建模拆圖，將單元結構依施工作業程序拆分為下部單元及上部單元牆體結構，如圖2.4所示，由拆解圖過程模擬建立施工作業流程，藉由施工流程作業過程中找出施工困難點，提出可行性的因應對策。施工流程陳述如下：

1. 曲牆下部單元結構1F~2F分段施工流程。如圖2.5所示。

由拆圖分割過程建立曲牆下部的施工流程，由施工流程得知：工序(1)必須根據圖面標註的牆體放樣點，定出下部牆體的基礎位置，進行牆體基腳的內模定位組立，接著進行牆基配筋作業，檢核鋼筋配置定位及保護層後，組立牆基礎外模後進行混凝土澆置。

工序(2)先行組立牆體的模架，再進行配筋使用之模架搭設，進行牆體的配筋後移入牆體端部外部的鋼模並調整定位，端部鋼模定位後即可進行外側封模收邊，外側鋼模的預埋螺栓安裝定位，工序(3)進行 2FL 樓板的組立及鋼筋綁紮，最後進行樓板混凝土澆置，完成下部單元牆體結構。

## 2. 曲牆上部單元結構 2F~R F 分段施工流程。如圖 2.6 所示。

完成下部曲牆結構體後，進行工序(1)2F 續接牆體放樣定位，端部牆體續接鋼筋綁紮，並預埋螺栓構件及預留管線作業，進行端部牆體內外模封模及定位，再進行混凝土澆置作業完成續接端部結構體，工序(2)為 RF 版支撐及模組立作業，後進行 RF 牆體鋼筋綁紮，RF 版筋綁紮及預埋螺栓構件安裝定位，工序(3)調整檢測定位後進行頂模及側模封邊收尾，最後混凝土澆置完成上部單元曲牆結構體施工。

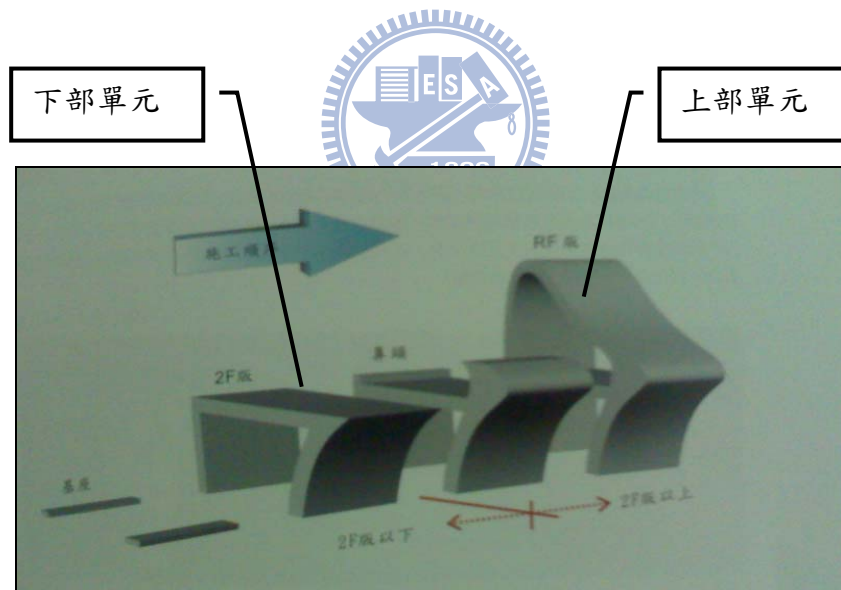


圖 2.4 曲牆結構分段圖  
資料來源:互助營造(2008)

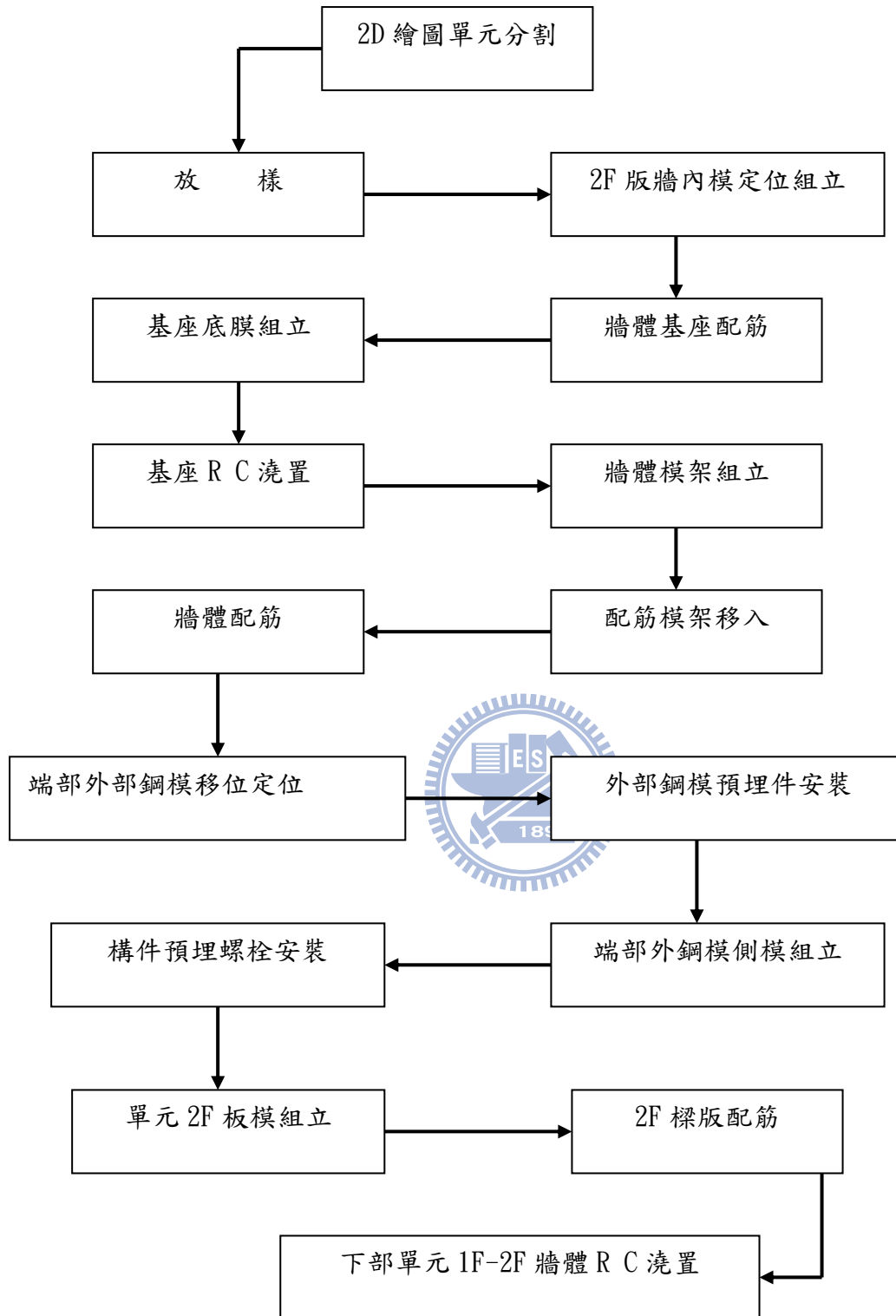


圖 2.5 曲牆施工流程圖  
 資料來源: 互助營造 (2008)

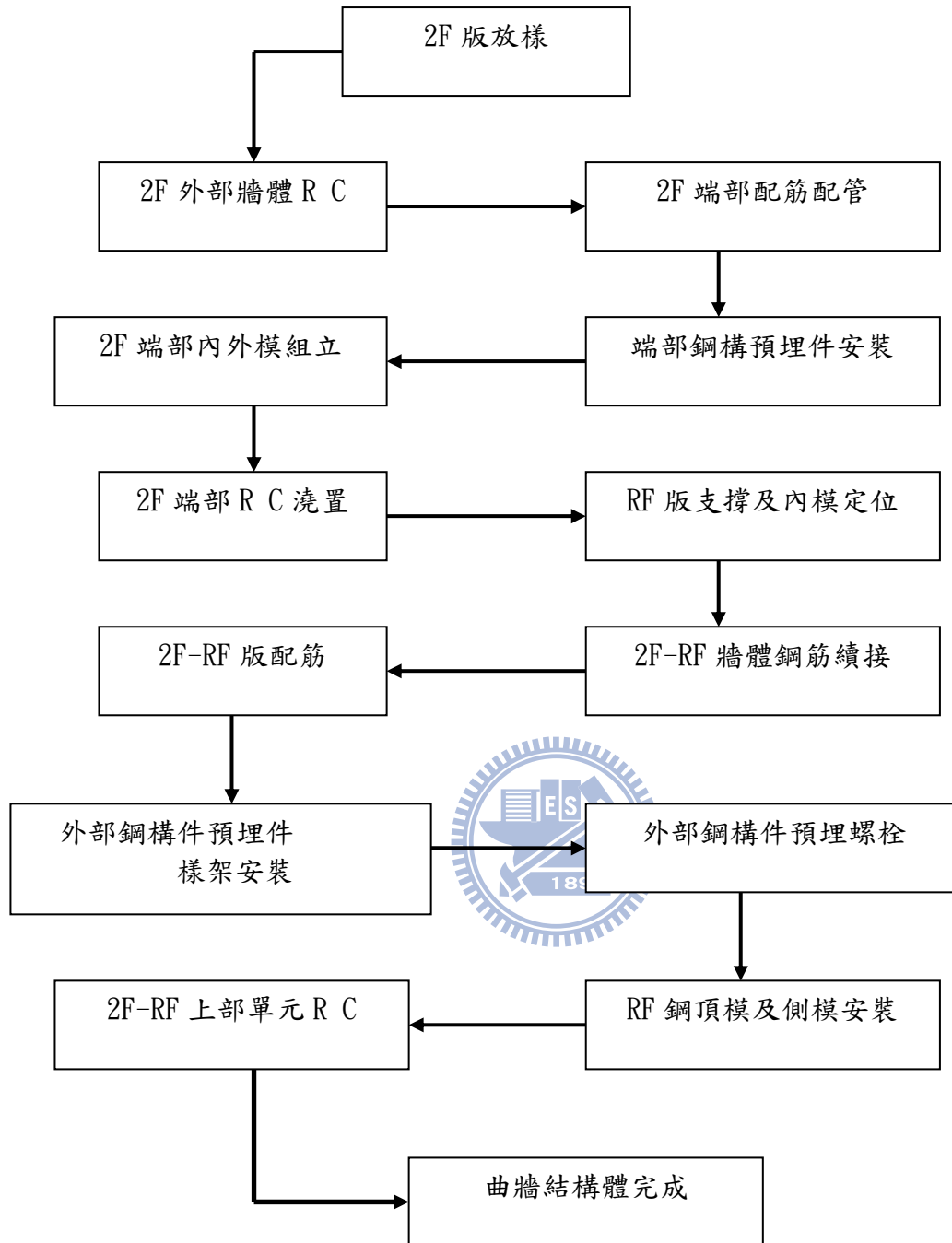


圖 2.6 曲牆施工流程圖  
資料來源:互助營造 (2008)

## 2.5.5 小 結

由前述第 2.5.4 小節曲牆上部及下部施工流程中得知，曲牆施工計畫是否順暢，端賴前置作業 2D 套圖利用 3D 建模出實體模型，進行模型拆解分割，研擬施工作業方法，據而建立曲牆分段後施工作業工序的規劃，藉由工序的確立擬定整體施工流程，如圖 2.5、圖 2.6 所述。施工流程的確立有助於現場施工計畫的參考依據，對於施工作業的效益與工期的掌控，皆能呈現相當的助益。

2D 曲牆施工技術的關鍵在於運用 2D 平面透過 3D 套圖建立三度空間轉換成立體模型，更清晰的掌握了曲牆曲面轉折關係，藉此作為單元分割的重要參考依據。曲牆施工技術另一關鍵在透過建模製作實體模型，從模型的試作過程中找出施工技術困難點與解決方案，並逐一研擬出曲牆施工流程，發展出可行性之施工方案，據此擬定曲牆施工計畫。

## 2.6 3D 曲牆工程設計回顧-以台中歌劇院案例

3D 曲牆設計為不規則且無柱、樑結構曲面構成之複雜結構，主結構組合包含連續曲牆、垂直核心、實心外牆、鑲嵌式牆面及鑲嵌式樓版。除了鑲嵌式樓板結合鋼構 DECK 為複合結構外，其他所有主結構均為鋼筋混凝土構造，如圖 2.7 所示，曲牆視其位置可為牆或樓版結構。幕塔及舞台則為主結構開孔中之插入鋼結構系統。座位結構及實驗劇場的箱型結構也是鋼骨構造。

此一空間連續複合體實際是架構於少數簡單之幾何規則。其結構及空間模型為將一薄膜介於兩層格狀表面板片上，將連接點相互交錯固定後，上下拉開板片即形成兩個由薄膜所區隔之連續空間。將此一過程重複進行，即可構成分別隱藏於其間之垂直、水平連續之 A、B 空間。保持其結構體之連續之整體性不受破壞，再將原有之幾何方格自由轉換變形，以便於配合空間機能之需求。原單純同質之方格，經由轉換漸次消融，形成具特異性之空間。大鉅聯合建築師事務所(2008)。



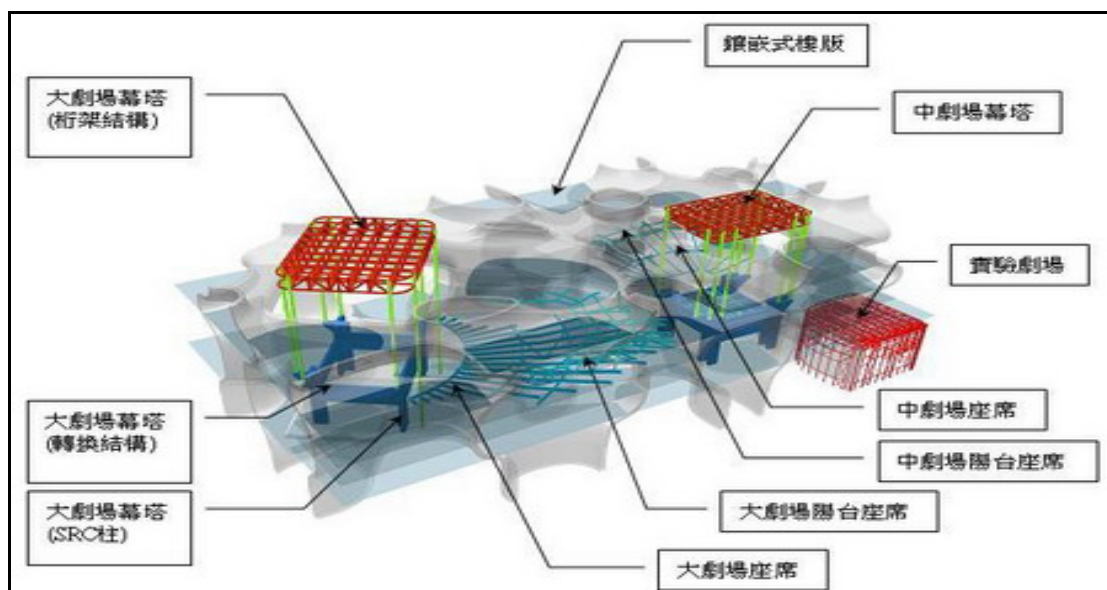


圖 2.7 主結構組合圖

資料來源：大鉅聯合建築師事務所(2008)第 58 次會議簡報

### 2.6.1 3D 曲牆結構特性對施工精密度的控制

曲牆無法以系統模板或系統鋼模做 RC 澆置之施工規劃，其施工技術關鍵在於 3D 曲牆曲線座標之放樣及不同單元牆體之分割，其次曲牆三度空間結構體之支撐構件涉及結構載重及施工動線規劃與工期，此為施工是否順暢成功之關鍵所在。本研究將透過案例實體模型之試作及針對施工技術、施工計畫之研析，評估其施工可行性，並找出施工技術的困難點與問題關鍵，提出施工計畫建議，作為未來 3D 曲牆施工計畫之重要參考依據。

單元曲牆的分割，針對幾何鋼筋單元的編號及座標大約可規劃 10~20 個幾何鋼筋被預先組合用來形成一個曲牆單元。在施工簡便、好控制及現場效率的可行性評估將決定了最後幾何鋼筋單元的最佳尺寸。為了最佳化物料管理及施工工作流程，每一個單元都有一個特定的編號及至少四個有正確的相對於建物原點之  $x,y,z$  座標，如圖 2.8 所示，以這樣的方式，所有具有高度精密度的預先組合的單元才能在現場繼續施工，現場的最大精準度可藉由雷射(或相等品)等儀器做檢測控制。大鉅聯合建築師事務所(2008)第 58 次會議簡報。

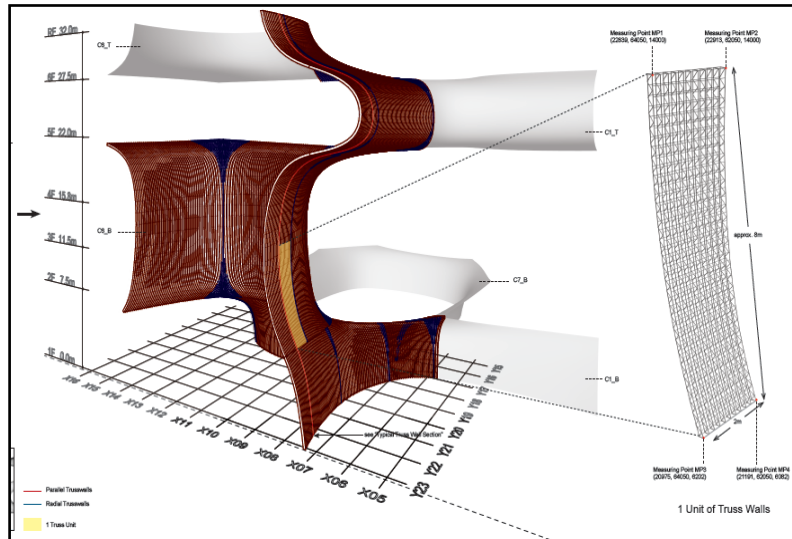


圖 2.8 幾何鋼筋單元

資料來源：大鉅聯合建築師事務所(2008)第 58 次會議簡報

## 2.6.2 3D 曲牆施工規劃前置作業界面整合

由於本案例施工性之複雜，施工規劃前應建立專業施工界面顧問團隊，在施工規劃，前工程總顧問及結構工程顧問合約簽訂後，再進行工程結構圖面分區界面之拆解，並擬訂管理合約條件，訂立相關 3D 技術專業顧問的作業分區範圍，權責關係與作業內容。依 3D 技術顧問所提供拆解 3D 套圖成果，提供有關施工危評及建物結構設施、空調機電等專業顧問群遴選前準備作業，並彙整建立相關機電空調設備施工界面之檢討文件，以利前置施工規劃作業。

從整合界面作業中，擬定可行性施工計劃提供危評及申報相關建管作業參考，而工程總顧問即利用彙整之界面結果，以及 3D 技術專業顧問所提供套繪成果圖，進行遴選建物結構設施、機電空調設備等專業顧問群。由工程總顧問、結構顧問、設施顧問、機電顧問，彙整之整體工程界面整合結論，交由 3D 顧問進行整體工程套繪建模，建立曲牆最終曲面結構圖形，完成曲牆的施工前置規劃作業及界面整合。

## 2.6.3 曲牆施工要徑進度規劃步驟

曲牆施工的要徑進度規劃，對於整體的曲牆施工進度規劃，已往並無前例可供參考，因此本案例針對曲牆施工要徑就其主要工項做進度規劃探討，並整理出規劃步驟，整體工程前置作業規劃，從合約的制定與檢討、開工前的準備工作、以及主管機關相關作業申請等。由於曲牆工程的設計複雜與施工困難度高，故對於 2D 設計圖面利用 3D 套

圖建模計畫與安排，準備作業相當繁複冗長，如專業廠商的選定、工程顧問團隊的組成、圖面界面的整合等，必須有一段時間做規劃準備。

曲牆工程的施工技術不同於一般工程，故在施工計畫的擬定後始能針對工程發包作業方式作確認，因施工技術的不同涉及發包形式或相關特殊施工規範的制定，此將影響整體工程成本的控制，採購發包的時程將須特別考慮。故針對曲牆工程的整體施工進度規劃彙整出以下步驟說明：

整體工程進度依施工規劃排程分為四個作業步驟：

**步驟一.** 合約作業及開工準備工作與申請，前置作業期約 7 個月。

**步驟二.** 前期 3D 套圖拆解建模規劃作業，作業時間約 3 個月~ 8 個月。

**步驟三.** 工程採購發包，約 8 個月~ 10 個月。

**步驟四.** 施工階段( 含結構體/裝修工程及景觀外構 )：約 44 個月。

## 2.6.4 施工技術困難度的評估

本案例為地下二層、地上六層之建築，地上平面範圍為 66m x 123m，樓高為 32m 高(不含屋突)，而由於其造型特殊，因此在施工上極具挑戰性，分析其施工困難性如下：

1. 曲牆三度空間的控制點與測量方式訂定。
2. 曲牆的分割單元尺寸與 3D 圖面的拆解。
3. 因曲牆為 3D 曲面構成，曲牆交界面產生不規則缺口發散之曲面，此缺口發散曲面施工方式的技術問題。
4. 支撐構件與曲牆鋼樑之組裝拆卸工序。
5. 3D 圖面、廳院音響照明、機電專業顧問之聘用。

而由於本工程之特殊性與困難度高，其中包括大量的建築空間概念及空間概念的拆解、跨領域的整合、生產線模式(曲牆鋼筋)的導入等，因此其評估的重點有別於傳統工程的思維，評估要項如下陳述：

1. 施工可行性評估。
2. 施工安全性的規劃。
3. 施工工期的掌控。
4. 施工成本的控制。

## 2.6.5 透過曲牆實體試作研析改善施工方法

### 1. 施工方法的陳述

曲牆上部結構體主要由牆版系統配合大跨度的鋼樑系統共同承擔結構體之水平地震力與垂直力，上部牆體區分為直牆(或核心牆)以及曲面牆，地下室牆體則為直牆或趨近直牆，因此在地下室部份可以採用傳統的支撐架以及傳統木模施作，工期較易掌握。然而，一樓以上大部份的承重牆多為雙曲率之曲牆，無法用傳統模板施作，如採用鋼模施作，理論上雖為可行，但因曲牆曲率的複雜及多變性使得鋼模無法轉用，必需製造大量的鋼模，在成本上以及效率上均不切實際。日本竹中工務店曲牆試作案例，如圖2.9所示，先依曲牆曲率製做鋼筋桁架(Truss wall)，再將鋼筋桁架以20cm的間距組立成曲牆的內核心樣架，然後再組立曲牆的垂直水平鋼筋(內核心樣架並無結構作用)。(大田勝人2007)。



桁架曲線落樣



桁架樣架落樣



桁架樣架單元組立



桁架鋼筋單元組配



桁架鋼筋支撐架



桁架鋼筋單元完成

圖 2.9 試作鋼筋桁架  
資料來源:大田勝人(2007)

## 2. 桁架鋼筋單元組合步驟說明：

- (1). 使用厚紙樣板依 3D 套圖之曲線切割成曲牆弧形放樣於地坪。
- (2). 再以主筋依放樣弧形彎折並電焊組接水平撐材，形成桁架內支撐。
- (3). 外圍牆體配以#5 鋼筋綁紮成桁架鋼筋曲牆。
- (4). 復以鋼網點焊成免拆模板阻擋灌漿溢流。

## 3. 桁架鋼筋試作空間的受限與支撐問題

由於每一單元的曲牆樣架需考量曲率的轉換、運輸的容量以及吊裝可能的變形，因此每一單元的曲牆樣架尺寸有其限制，同時，每一曲牆樣架由於本身沒有支撐能力，因此須有施工架支撐，因此，如採用大量的施工架在此複雜結構體內勢必嚴重影響施工動線，而由於施工架本身勁度有其限制，要支撐曲牆荷重，施工風險較大，且鋼筋桁架的變形較難控制，恐嚴重影響曲牆精度，同時，重型支撐架亦無法有效抵抗曲牆於施工中所產生之水平推力，這些施工障礙都必須一一克服。



### 2.6.6 桁架鋼筋施工障礙模擬對策分析

為避免前述障礙，經研討於每一個封閉曲牆內部或外部，設置臨時鋼支柱，(數量視封閉曲牆內所佔面積而定，其完成面高程則低於各層樓板 1m)，而由於該支撐係與四周先完成之建築物外牆或核心牆相連，而得以形成穩固結構，提供工程施作期間精度控制所需之剛性，並且可做為曲牆型鋼連接成水平環樑之支撐座用。

當水平支撐完成後，即可於該支撐開口上沿曲牆的位置，以短節型鋼連接組成水平環樑，當環樑完成，即可安裝曲牆鋼製吊架，該吊架係由一組間距達 3m 的折線型 H 型鋼，沿建築物曲牆內/外緣排列，並依照每處曲牆之曲率以最接近的折線形式，去組合而成。吊架的上下端係分別固定於水平環樑與樓版上，而各曲牆吊架間則再以 C 型鋼串聯，形成閉合狀的曲牆骨架，在施工時，每一單元的桁架鋼筋曲牆即依附並定位在曲牆骨架上，形成穩定且安全的結構體，提高後續配製曲牆主筋、免拆模板以及混凝土灌漿時的安全、效率與施工品質，可解決「兩曲牆交界面(發散曲面/收斂曲面)的施工方式」等困難。

## 2.6.7 本案例曲牆施工支撐架技術探討

針對案例 3D 曲牆結構施工技術的規劃，如 3D 套圖建模、單元曲牆試作、整體曲牆結構施工的升層計畫、施工過程的作業工序，施工技術的關鍵，彙整分析規劃過程，期能對其曲牆整體施工規劃，歸納分析，提出可行性施工及可待改善方案，對未來 3D 曲牆施工技術的計畫擬定有所幫助。茲就其曲牆上部施工技術的規劃陳述如下：

### 1. 外牆及核心牆施工

案例一樓以上面積投影面積為 123m(N/S)\*66m(E/W)，而如前所述，其主要為由具雙曲率的 RC 承重牆所構成，為有效控制施工時的精確度並提供水平支撐之固定，因此需先施作外牆及核心牆的部份，並採用滑昇模施工，考慮滑昇模之工作平台對結構內部施工空間的影響，滑昇模進度須超前樓板至少 2 樓層高度。

### 2. 水平支撐架組立

施作完成之外牆及核心牆，當材齡符合設計值後，即開始架設水平支撐架，其步驟如下：

- (1). 於地面先行將上樓層之開口位置及形狀進行放樣。
- (2). 依適當模距設置臨時鋼支柱。
- (3). 施作開口位置的水平支撐架，並以環樑連接。
- (4). 水平支撐平台須待樓板完成後才可拆除。

### 4. 吊架安裝

各樓層自成一體的 3D 曲牆，由於其外表曲面為三度曲率，各曲面除有垂直載重外，尚有水平力，如採用設計單位原規劃之重型支撐架，對水平力之抵抗將無法滿足需求。因此，本案將規劃使用吊架，但因全案曲面的型式過多，幾無重複，如針對每一種曲面均設計相對應之吊架，則吊架之數量與成本頗為鉅大，因此採用標準模具長度(1M 與 2M)的型鋼進行組合，再以不同角度之關節楔形塊調整角度，去配合曲牆的曲率，而由於本吊架係以標準單元組合而成，當該樓層施工完成，該批吊架可拆除後重新組合並轉用於其他樓層。吊架之上下端分別固定於水平支撐系統之環樑及樓地板，吊架間再以 C channel 連結，提升整體的強度，並增加與後續吊裝的鋼筋桁架的連接點，詳圖 2.10 關節楔形調整。(互助營造 2008)。

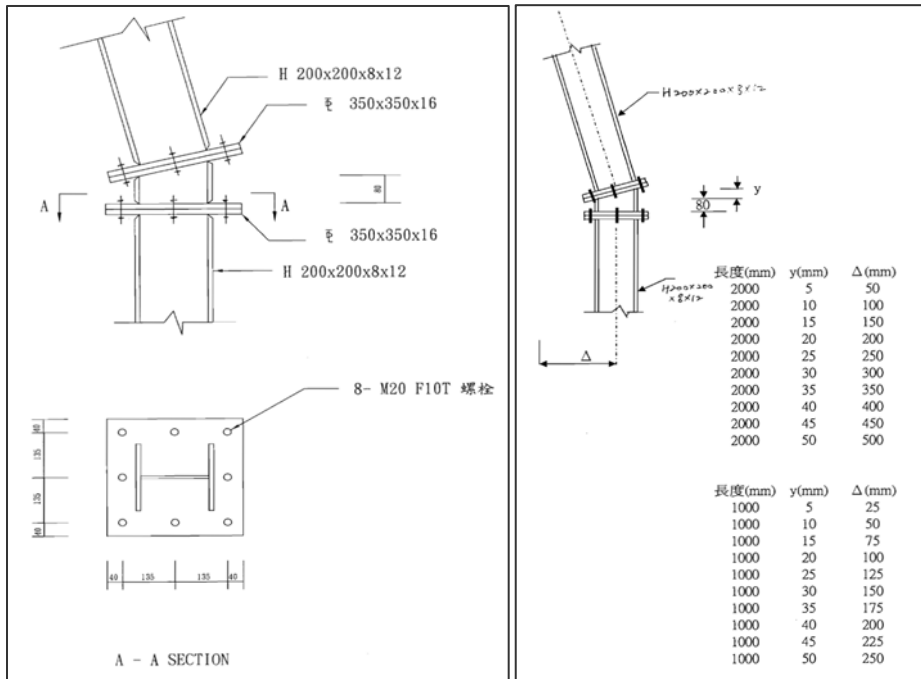


圖 2.10 關節楔形調整塊  
資料來源：互助營造(2008)

## 2.6.8 曲牆結構施工步驟

曲牆結構施工首先應由一樓或新增桁架樓層之各獨立腔腸環狀曲牆構造，建立每片單元桁架鋼筋編號，並針對標準曲牆單元及不規則曲牆單元分區編號，在各個單元曲牆分割出的施工圖上，依配筋、力量傳遞、施工限制、法規限制及已建立的空間座標，定義出各實際施作之桁架鋼筋的空間座標，由於曲牆結構之特殊性，及不規則曲線弧型，各相鄰連續之桁架鋼筋續接不建議採用鋼筋續接器而採用搭接方式，為避免鋼筋搭接不確實及鬆動變形，桁架鋼筋搭接處須點焊 1 至 2 點，以加強結構性。

### 步驟一、曲牆單元分割：

首先將曲牆分割為各個單元，再以 3D 圖檔將該單元間隔 20cm 的剖面座標求出，並依該剖面座標於鋼筋加工廠施作鋼筋桁架。

### 步驟二、曲線座標定位：

將鋼筋桁架依剖面空間座標，以螺桿固定於吊架的 C 型鋼上，去編織成一完整單元的曲牆樣架。

### 步驟三、鋼筋綁紮作業：

完成一樓層之曲牆鋼筋桁架定位後，以高空自走車配合活動式工作架載運人員進行水平與垂直主筋綁紮。

#### 步驟四、免拆鋼網包覆固定：

將免拆模之金屬網以高空自走車搭載人員施工之方式，固定並貼附於已綁紮完成之鋼筋外側。如圖示 2.11 所示。

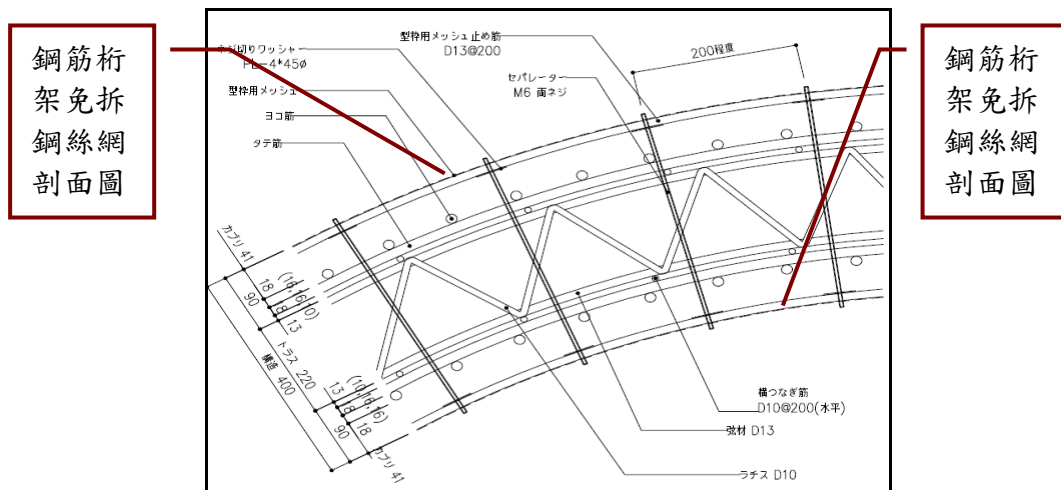


圖 2.11 免拆模鋼網剖面圖  
資料來源：大田勝人 (2007)

#### 步驟五、曲牆噴漿搗實：

再於免拆模外側以玻璃纖維混凝土進行噴漿，厚度約 1~2cm 厚，以封閉免拆模外表之孔洞，去避免灌漿時滲漿，並有利混凝土澆置時震動搗實。



圖 2.12 曲牆混凝土分層澆置  
資料來源：園部敏行(2007)



## 步驟六、分層澆置高流動性混凝土

每次澆置高度約 1.0~1.5M，並於曲牆單元內進行環狀澆置，以免側向力過大發生危險，澆置時，若位於混凝土泵送車之舉臂範圍則以泵送車澆置，如圖 2.12 所示，若超出該範圍，則以塔吊搭配吊桶的方式進行澆置。

1. 以高空自走車進行外牆泥作粉刷。
2. 每一樓層重覆循環施作。
3. 考量施工期間可能承受水平地震力，為安全計每層樓均由核心牆先施作，再由四個角隅及四邊向內部推進。

## 2.6.9 應用 3D 技術建模放樣

在營建工程上應用數位 3D 建模技術，形成潮流，如高雄世運主場館工程即因採用數位 3D 建模技術去對設計圖面進行建構及拆解，始能在短時間內取得達到所需，然而，採用數位 3D 建模技術進行設計的工程，因皆為不規則面，所以在每個工程中，其不同位置，不同需求形狀均亦不相同，而台中歌劇院案例，較主場館案更為複雜的不規則曲面，更需採用 3D 技術，方能在短時間內，取得施工時所必須之一切座標數據，來控制曲面的空間座標等。

完整的數位 3D model 是解圖建模的必要條件，桁架鋼筋的製造及現場桁架組立座標設定值、鋼筋分割面、3D 實體圖作為支撐架、樣架的施工依據，鋼構 3D 圖檔及其於 3D 空間的座標必須同時規劃設置，而 RC 完成面座標及基準控制點若機電配管必須埋設於 3D RC 牆內，則必須有 3D 彎管線路圖與機電空調設備位置座標。

## 2.6.10 3D 曲牆建模步驟概述

如欲探究本案例之關鍵性，則對建築主體進行電腦 3D 建模的工作勢必無法避免，然而，由於本案例目前尚無法取得完整圖面及 3D Model，因此，現階段並無法對其進行全面電腦 3D 建模，但為深入了解數位 3D 建模技術在歌劇院一案中關鍵之角色，因此，特由現有資料中選擇一曲牆單元，而以試作(MOCK-UP)的實驗，去對其進行電腦 3D 建模，利用 3D Rhino 4.0(McNeel 2004)軟體建立初步模型，如圖 13 所示，3D Rhino 4.0(McNeel

2004)軟體所提供的曲面工具，可以精確製作所有用來做為提案、彩現、動畫、工程圖、分析評估，以及生產用的模型，可以製作、編輯、分析曲面以及視窗軟體間轉換 NURBS 曲線、曲面以及實體，完全沒有複雜度、階數以及尺寸大小的限制。

NURBS 即是(Non-uniform Rational B-splines)的縮寫，利用此數學函數的演算，能夠以非常精確的 2D 直線、正圓、圓弧或是立體曲線，來演算 3D 自由造型曲面，以及複雜的實體幾何資訊，是目前唯一能夠描述所有自然界物體形狀的方法。其步驟如下陳述：

### 步驟一：曲牆單元建模

藉由現有圖面資料中的 6 點座標，利用 3D Rhino 4.0 軟體(McNeel 2004)建立模型。

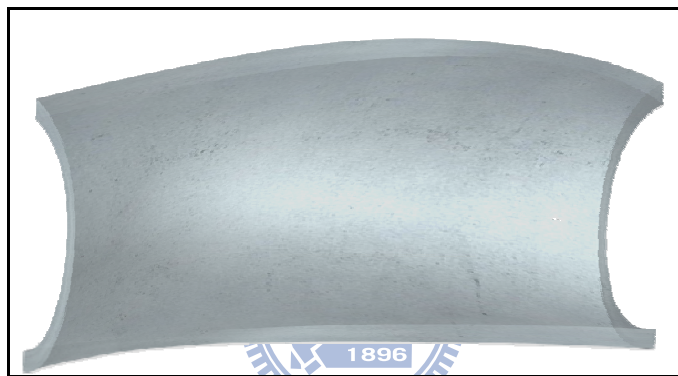


圖 2.13 初步模型示意圖  
資料來源：Florian Bush (2007)

### 步驟二：Truss wall建模

利用 3D 世界座標，將曲牆單元依設計之鋼筋桁架水平間隔進行分割，其中曲率轉折地方會產生扇形弧形曲面(即所謂發散曲面與收斂曲面)，如圖 2.14 所示。

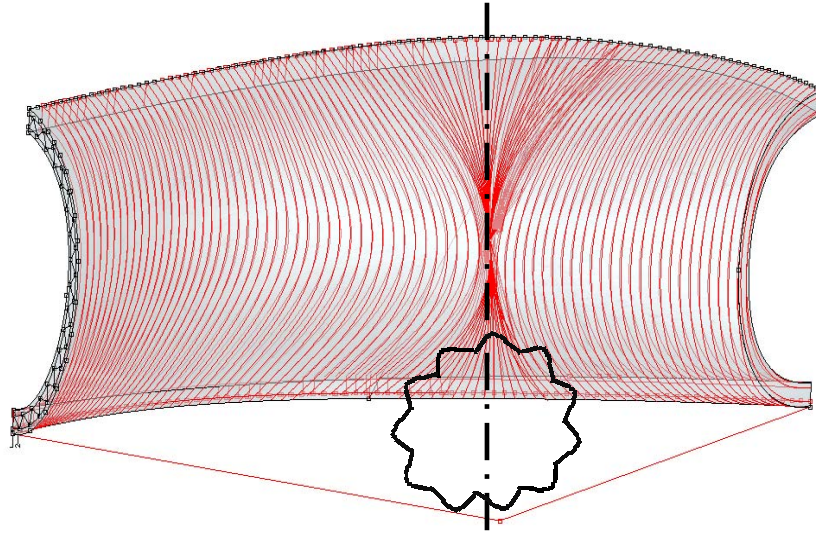


圖 2.14 3D-鋼筋間隔及垂直面排列示意圖  
資料來源：Florian Bush (2007)

### 步驟三：Truss wall 拆圖

由 3D 數位模型中，擷取每座鋼筋桁架，如圖 2.15 所示，於工廠加工放樣及現場測量座標的控制點，並依分割單元曲牆定出鋼筋桁架曲線各點座標，如圖 2.16 所示。

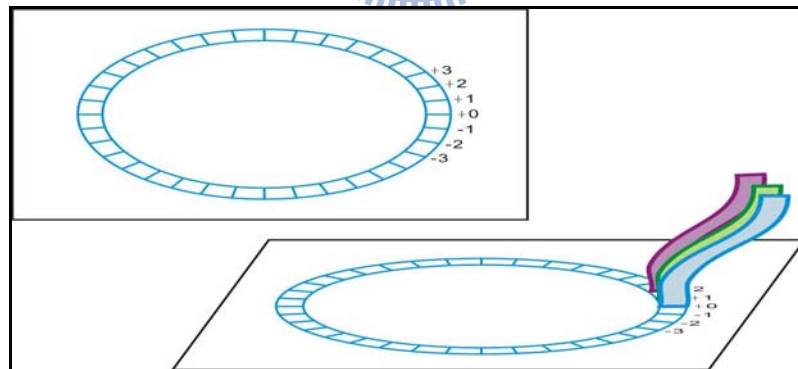


圖 2.15 拆解分割圖  
資料來源：Florian Bush (2007)

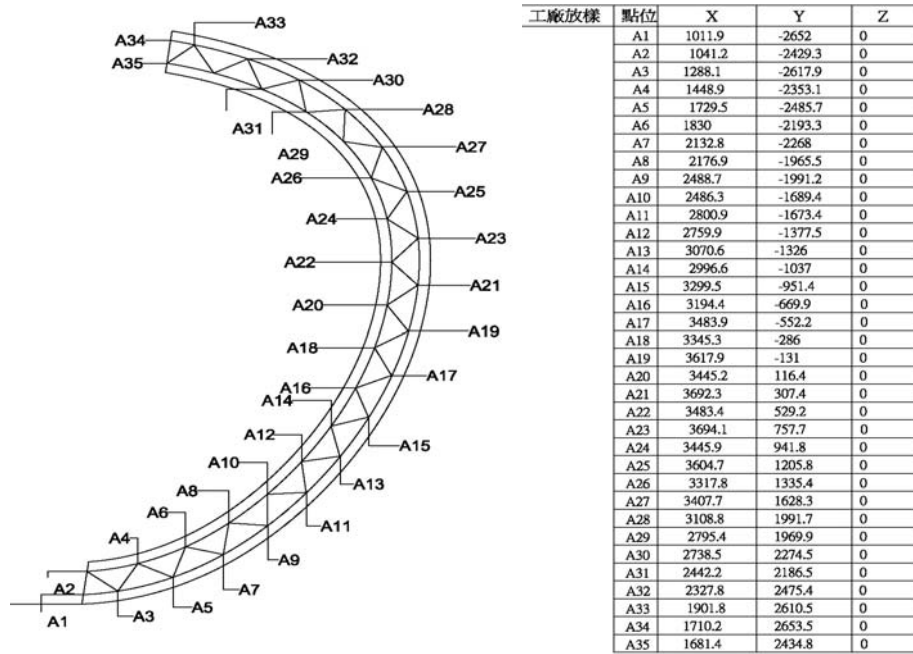


圖 2.16 單元鋼筋桁架曲線座標圖

資料來源：Florian Bush (2007)

#### 步驟四：曲牆RC完成面拆圖

為了確保曲牆 RC 完成面的精準度，亦須透過 3D 模型技術，於電腦中擷取 RC 曲牆完成面之控制基準點。如圖 2.17 所示，依構成曲牆單元所需之鋼筋桁架數量，重複步驟 3 與步驟 4，即可取得曲牆單元在工廠製作與現場施工時，所需之一切控制點位。

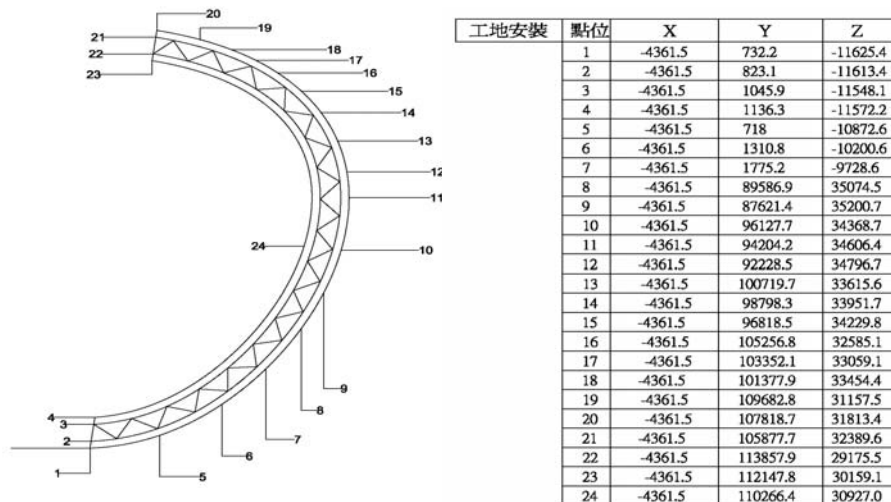


圖 2.17 粉刷完成面的控制點位

資料來源：Florian Bush (2007)

## 2.6.11 曲牆結構施工垂直升層計畫

案例曲牆結構施工升層圖模擬規劃，如圖 2.18 所示，由 B1F 基礎版完成後，首先施工結構為地下室核心結構牆，如圖 2.19 所示，該核心牆為一般垂直結構牆，也是作為上部曲牆結構的續接牆體基礎，整體曲牆結構施工共分為六層樓版作升層施工規劃，如圖 2.18 所示升層圖標示。模擬曲牆施工升層規劃步驟，陳述如下：

**步驟一**、B1FL 版結構施工混凝土澆置，如圖 2.19。

**步驟二**、地下室核心牆結構施工，需考慮銜接上部曲牆鋼筋預留銜接方式，如圖 2.20。

**步驟三**、1FL 結構樓版完成，開始搭設第一升層曲牆外側支撐鋼架，如圖 2.21 所示，並吊裝第一升層曲牆桁架鋼筋，再搭設曲牆內側支撐鋼架，完成第一升層曲牆結構 2FL 樓版，如圖示 2.22、圖示 2.23、圖示 2.24。

**步驟四**、第一升層曲牆結構澆置混凝土後，銜接施作 FL 樓版，並完成第一升層曲牆結構樓版，如圖示 2.25。

**步驟五**、第二升層曲牆共分割為三個樓層作混凝土澆置計畫，即為 3FL、4FL、5FL，如圖示 2.25、圖示 2.26、圖示 2.27、圖示 2.28、圖示 2.29 所示施工升層圖。其施工順序反覆步驟三、步驟四之流程，在曲牆鋼架支撐規劃上，必須考慮到分三次升層曲牆施工，相關材料堆置及施工動線，都必須詳加規劃考慮，曲牆分割銜接部位，更須透過 3D 套圖轉換為施工詳圖，詳細繪出桁架鋼筋銜接位置的加工與施作方式。

**步驟六**、曲牆第三升層為 6FL 樓版結構施工，如圖示 2.30、圖示 2.31、圖式 2.32、圖示 2.33。

**步驟七**、曲牆最後升層在結構屋突層，如圖示 2.34、圖示 2.35、圖示 2.36。

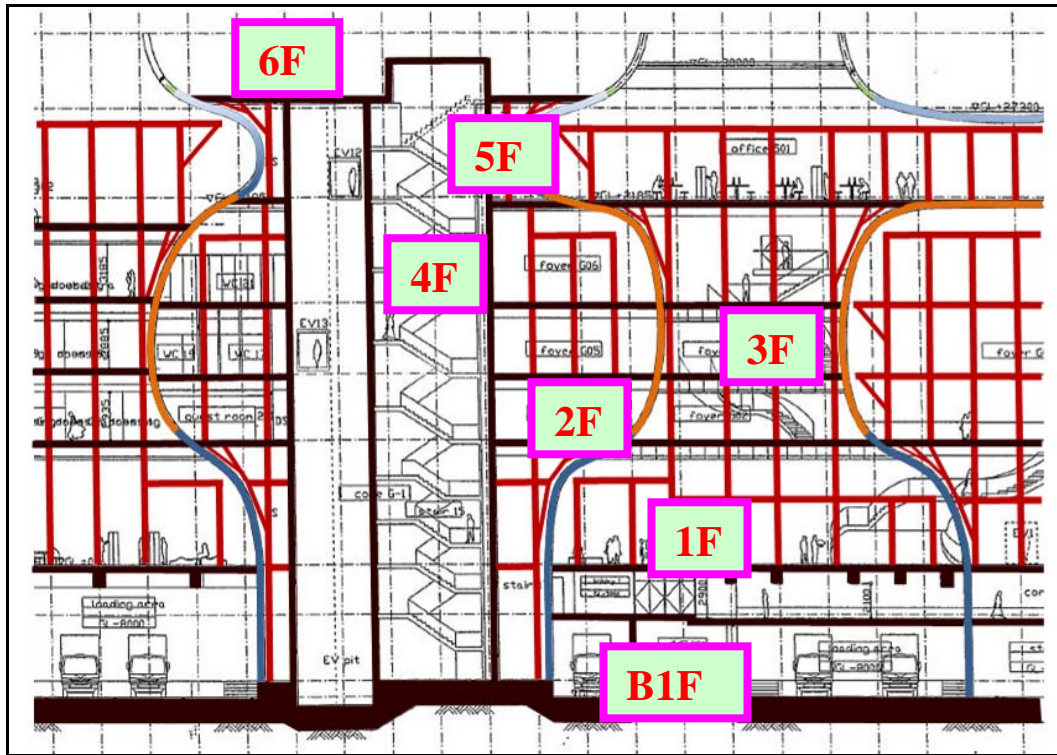


圖 2.18 混凝土澆置升層圖  
資料來源：互助營造(2008)

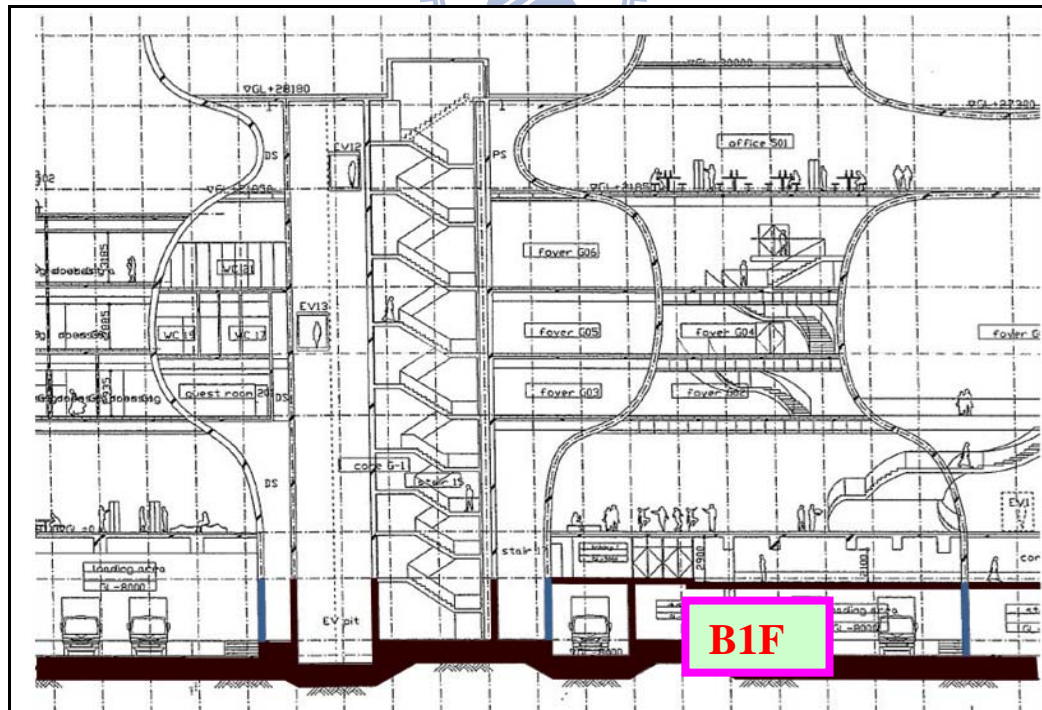


圖 2.19 B1FL 版混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

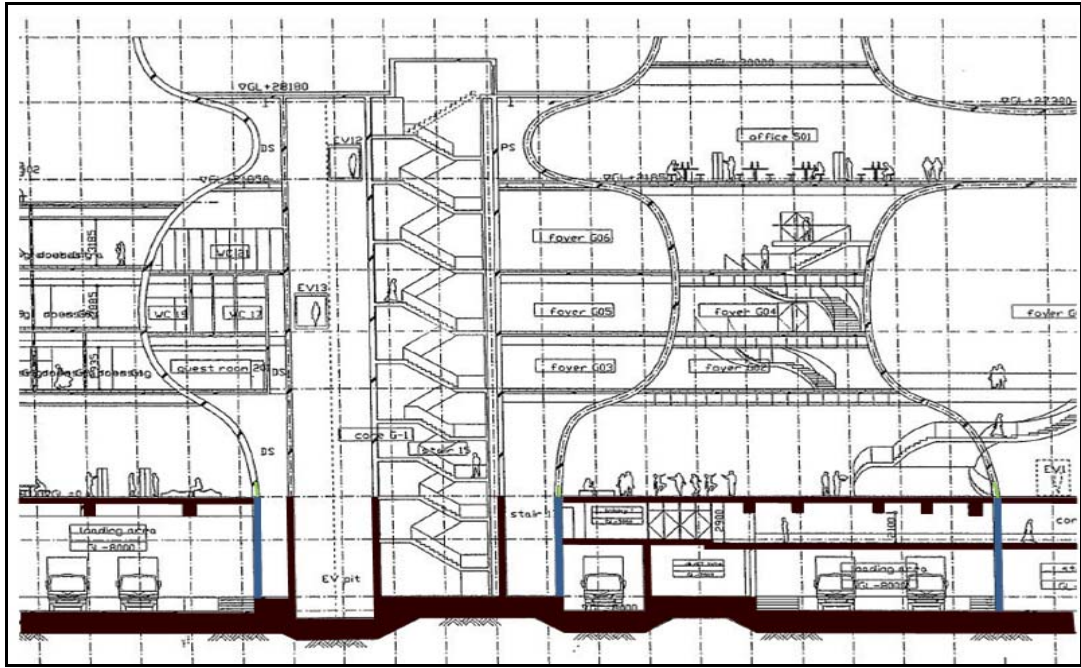


圖 2.20 1FL 標準層混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

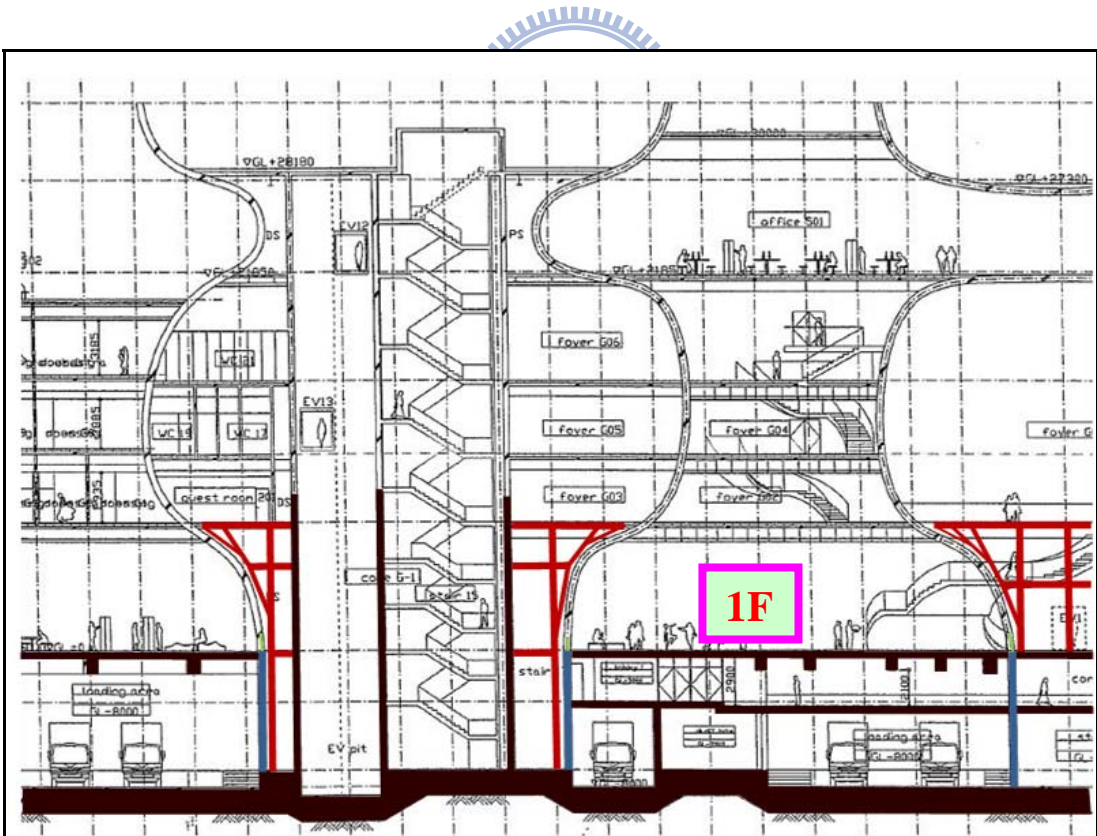


圖 2.21 第一層曲牆鋼構支撐組裝  
資料來源：互助營造(2008)

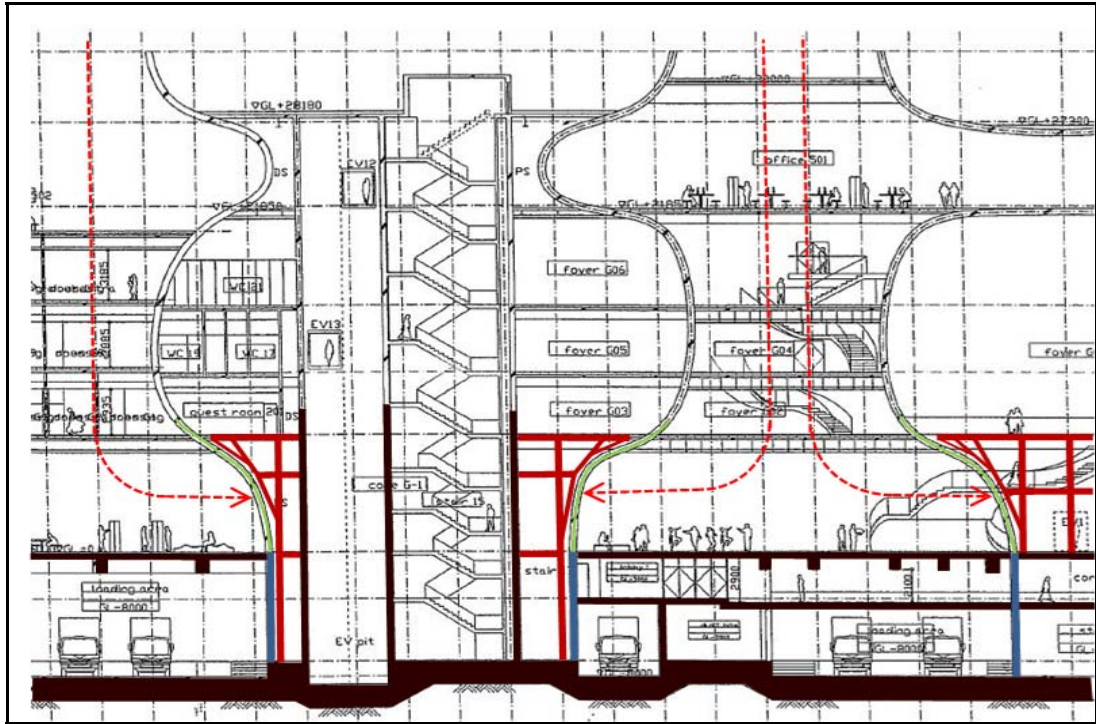


圖 2.22 第一層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝  
資料來源：互助營造(2008)

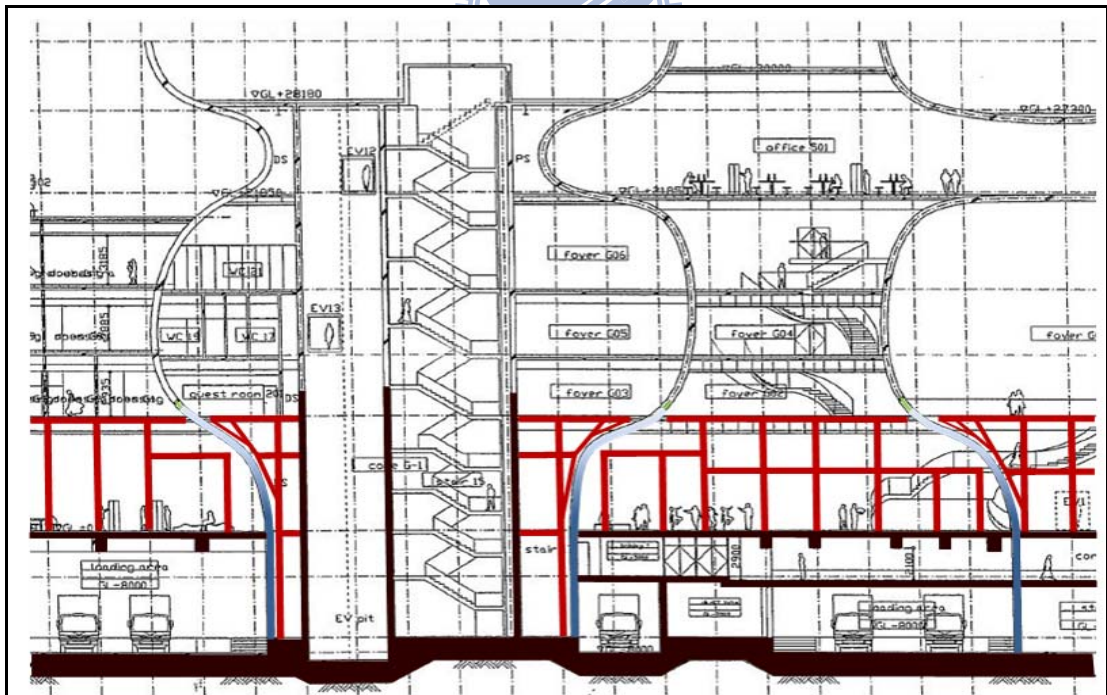


圖 2.23 第一層曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝  
資料來源：互助營造(2008)



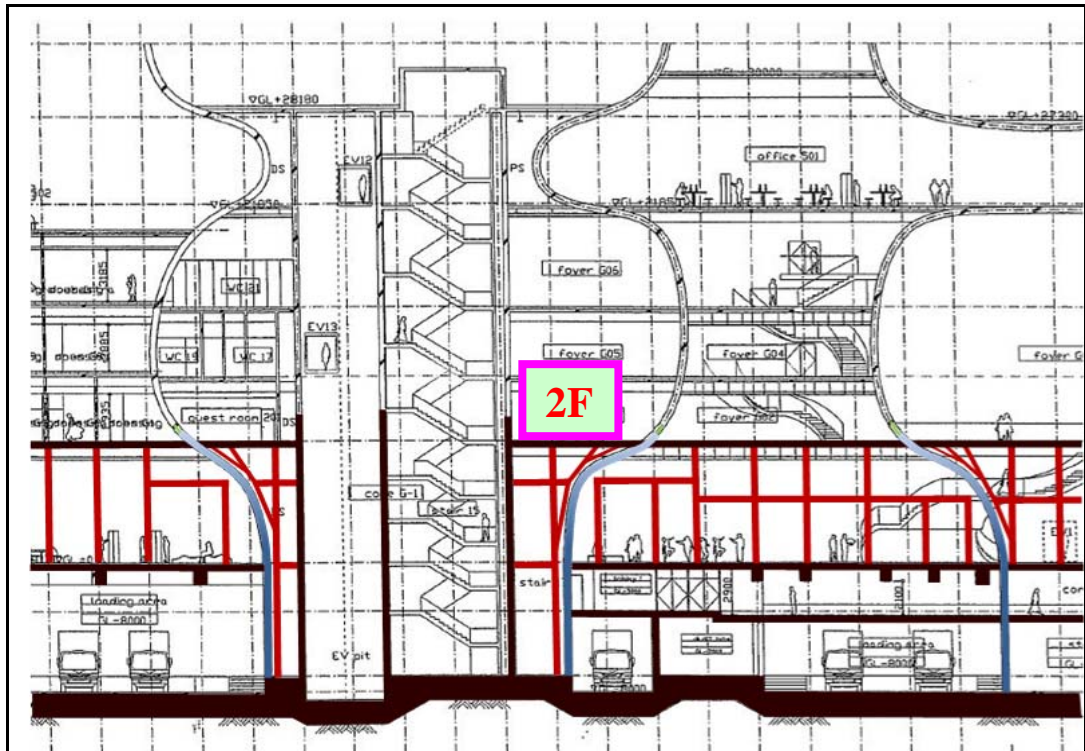


圖 2.24 2FL 版混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

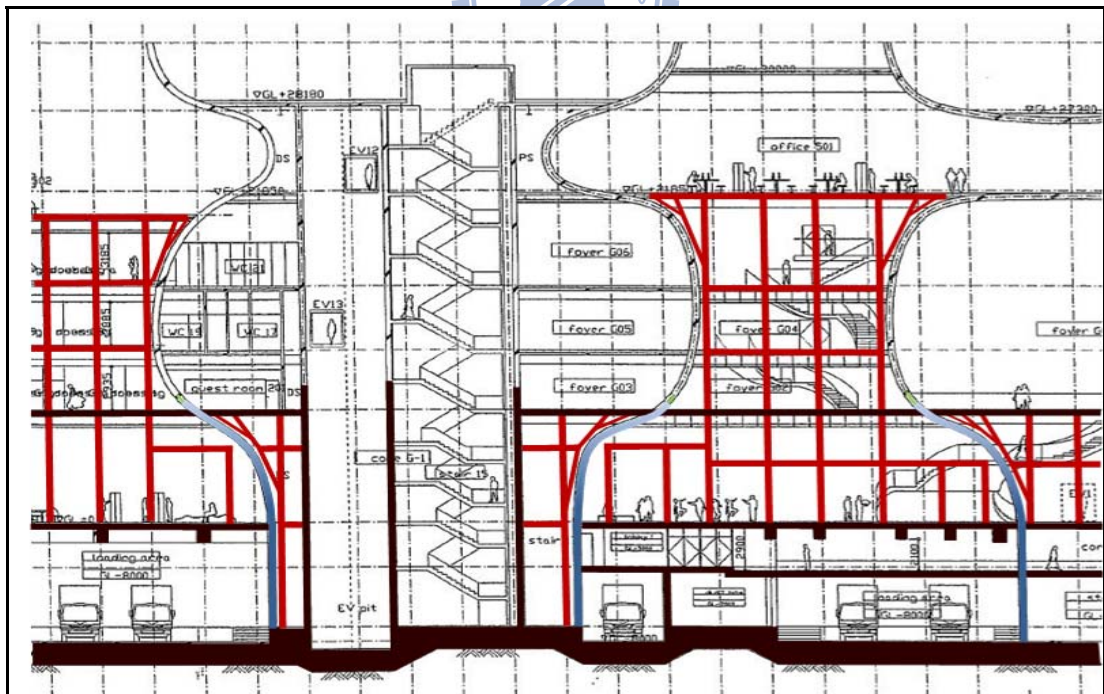


圖 2.25 第二層曲牆鋼構支撐組裝  
資料來源：互助營造(2008)

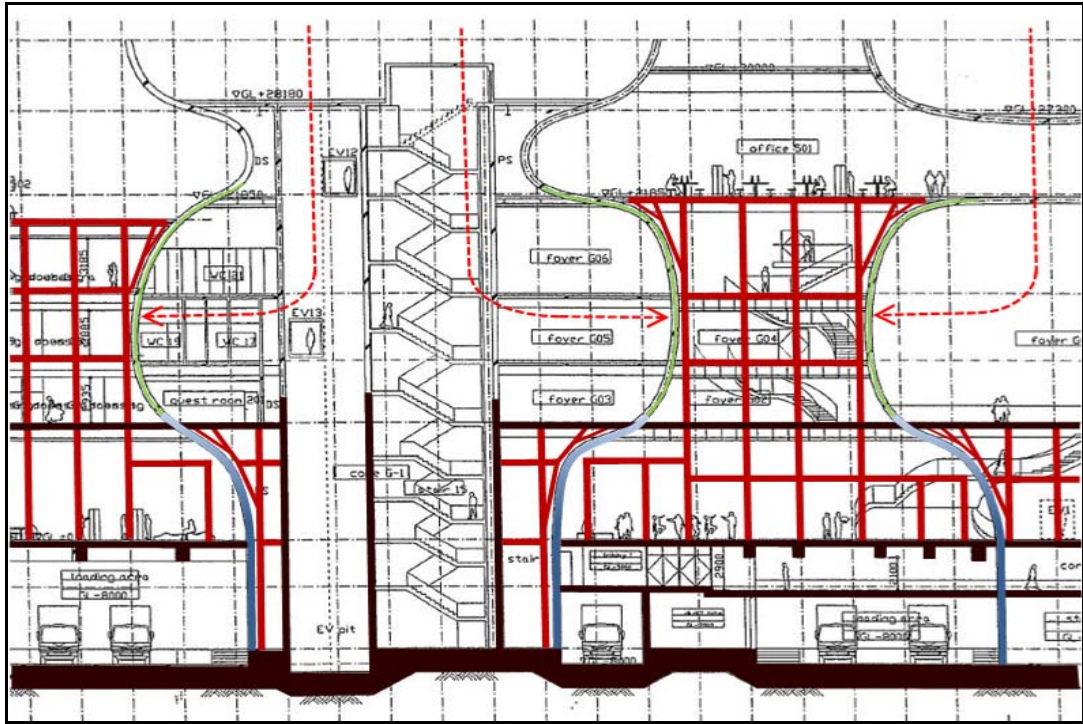


圖 2.26 第二層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝  
資料來源：互助營造(2008)

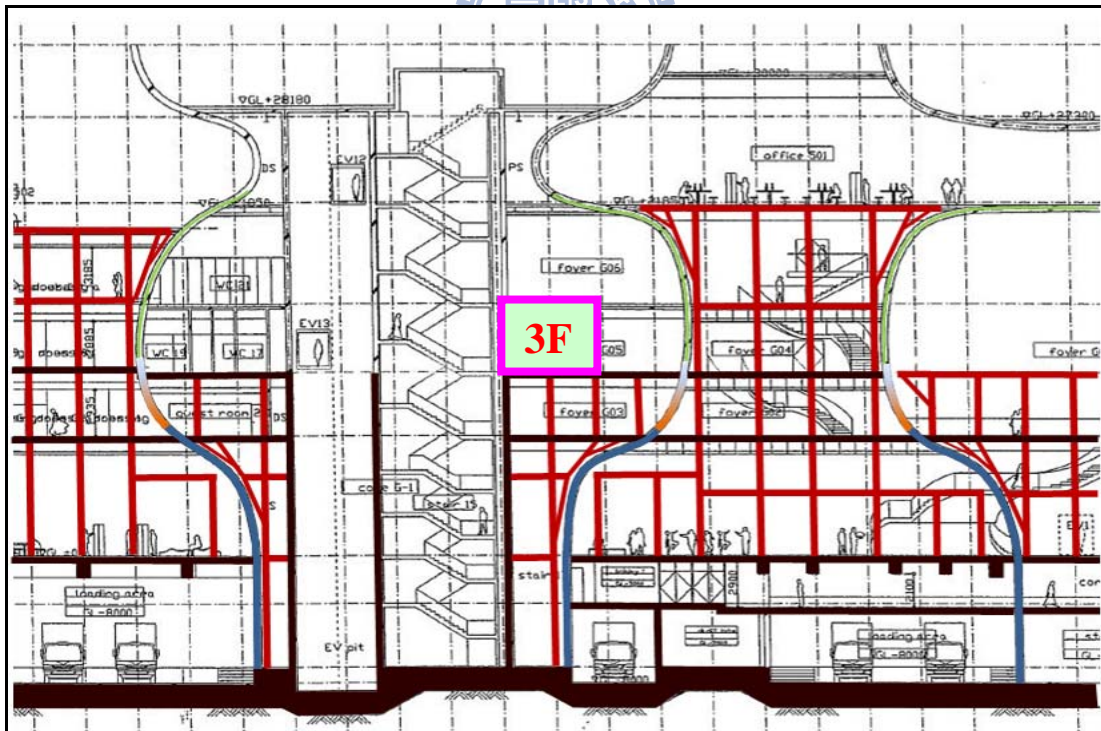


圖 2.27 第二層下部曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝及 3FL 版混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

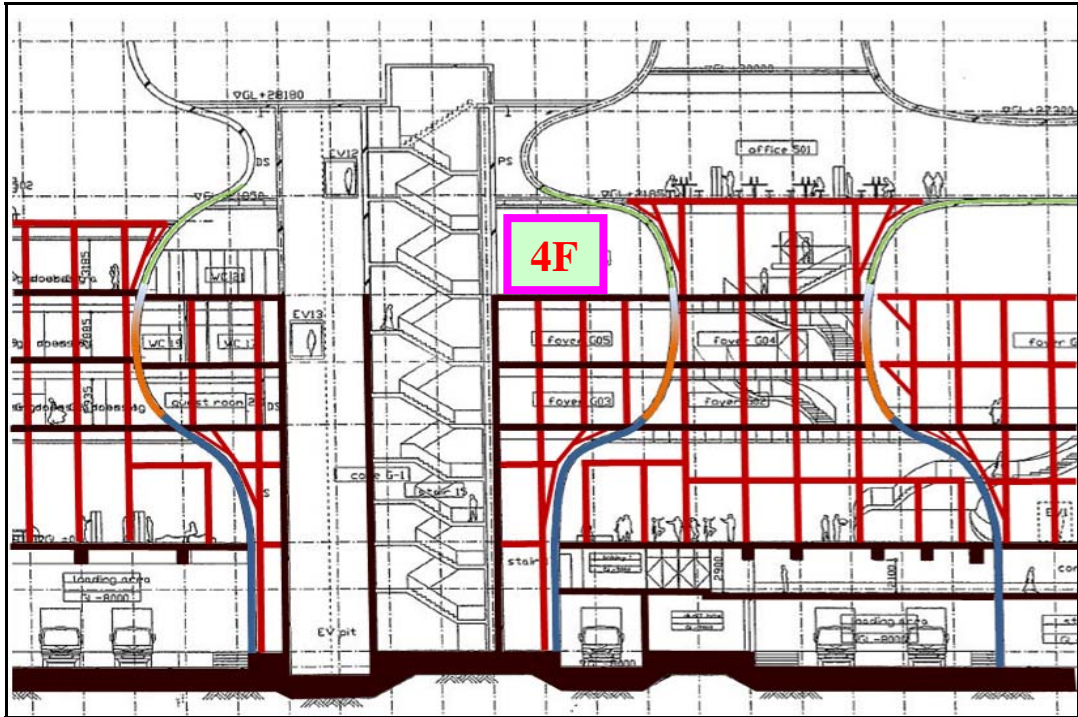


圖 2.28 第二層中段曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝及 4FL 版混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

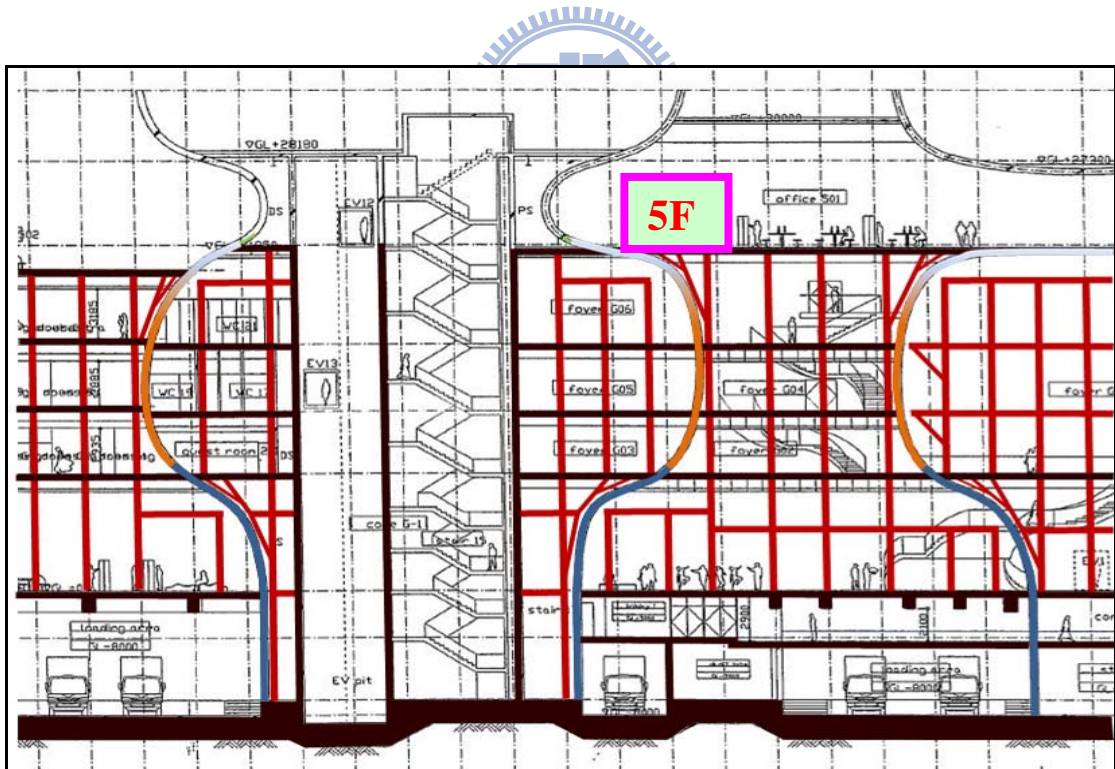


圖 2.29 第二層上部曲牆混凝土澆置、鋼構支撐組裝及 5FL 版混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

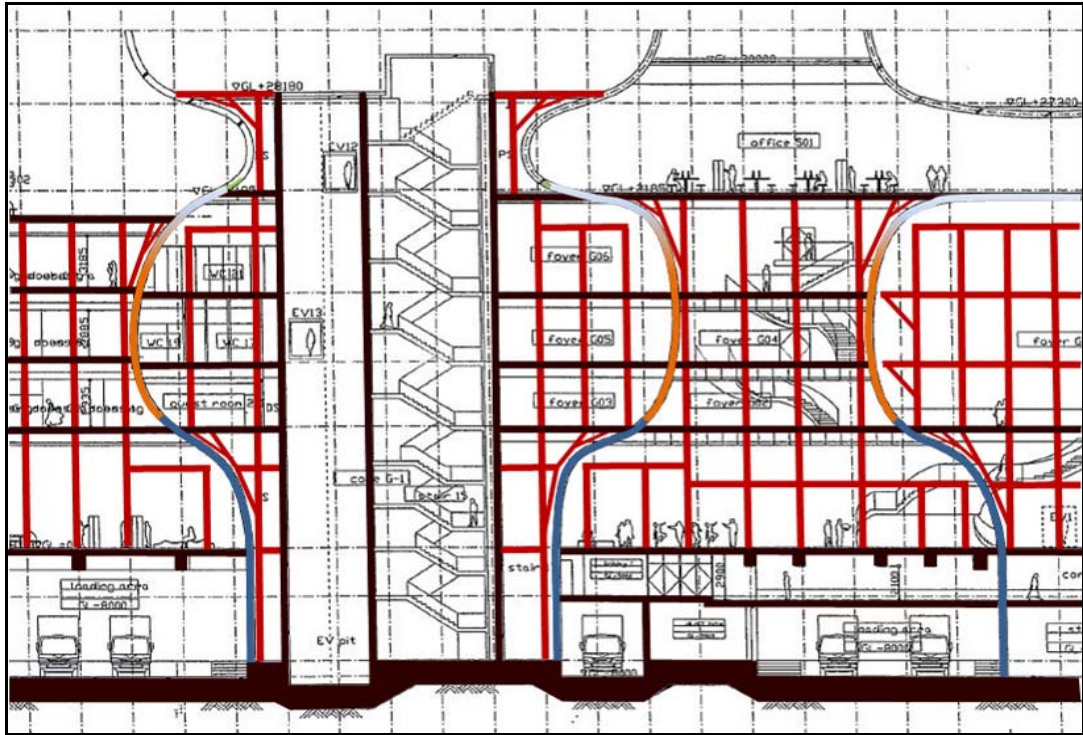


圖 2.30 第三層曲牆鋼構支撐組裝  
資料來源：互助營造(2008)

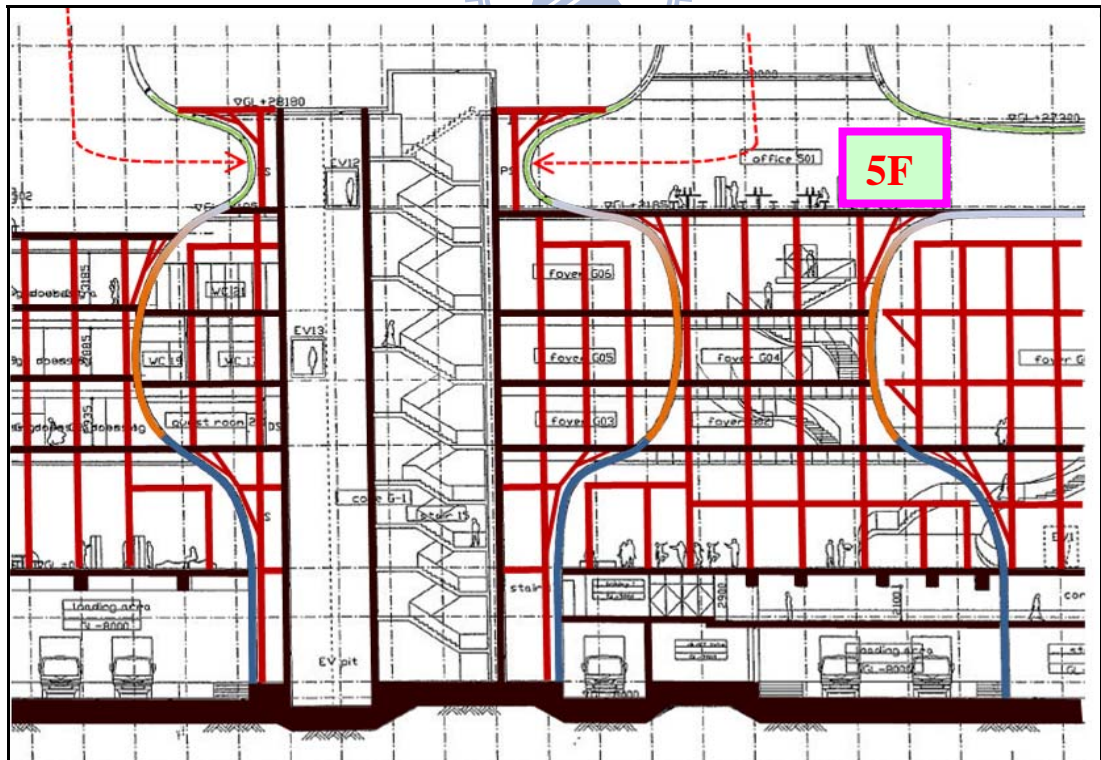


圖 2.31 第三層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝  
資料來源：互助營造(2008)

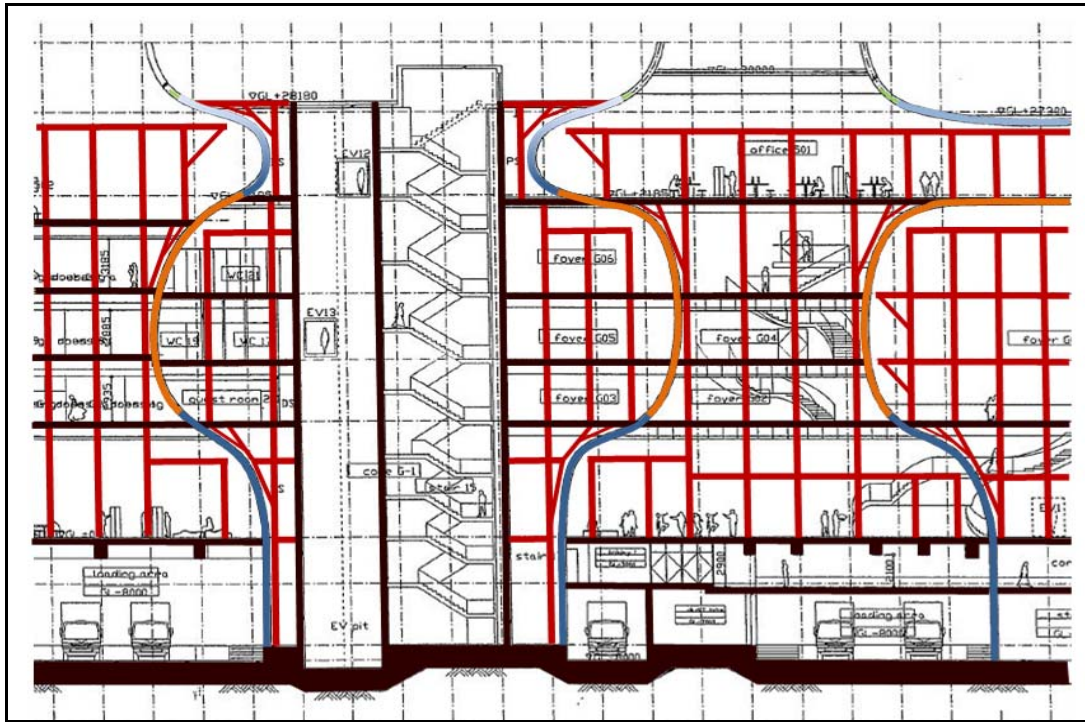


圖 2.32 第三層曲牆鋼筋及速省模綁紮混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

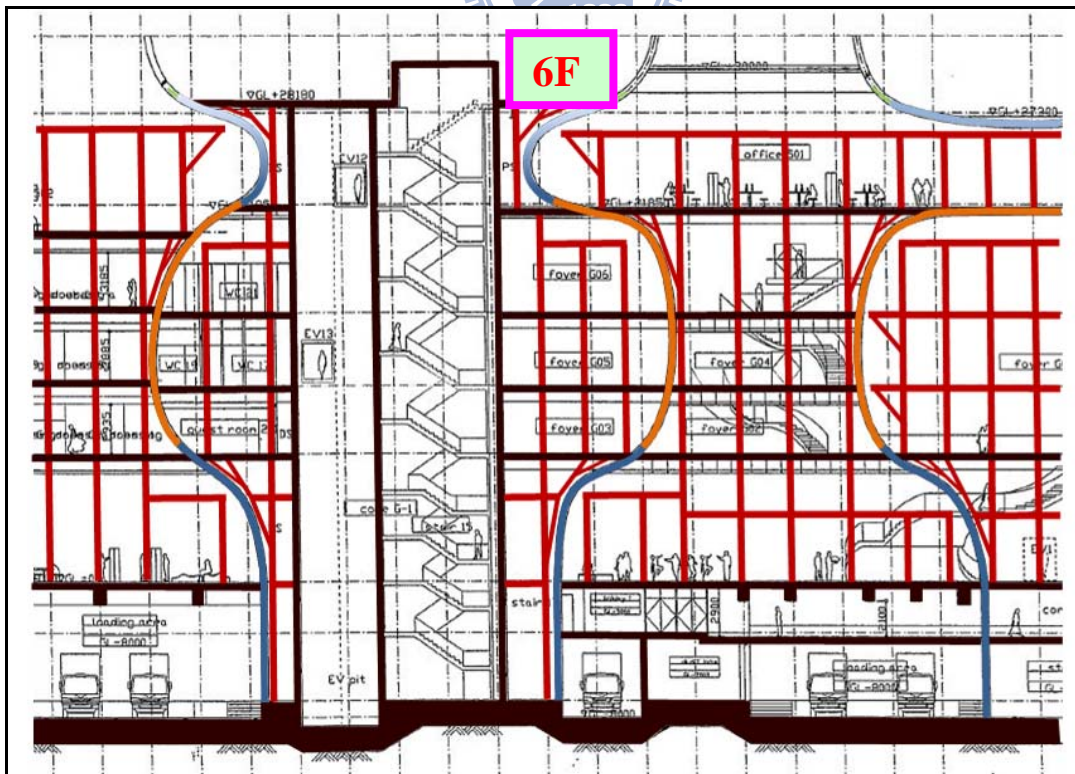


圖 2.33 6FL 版混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

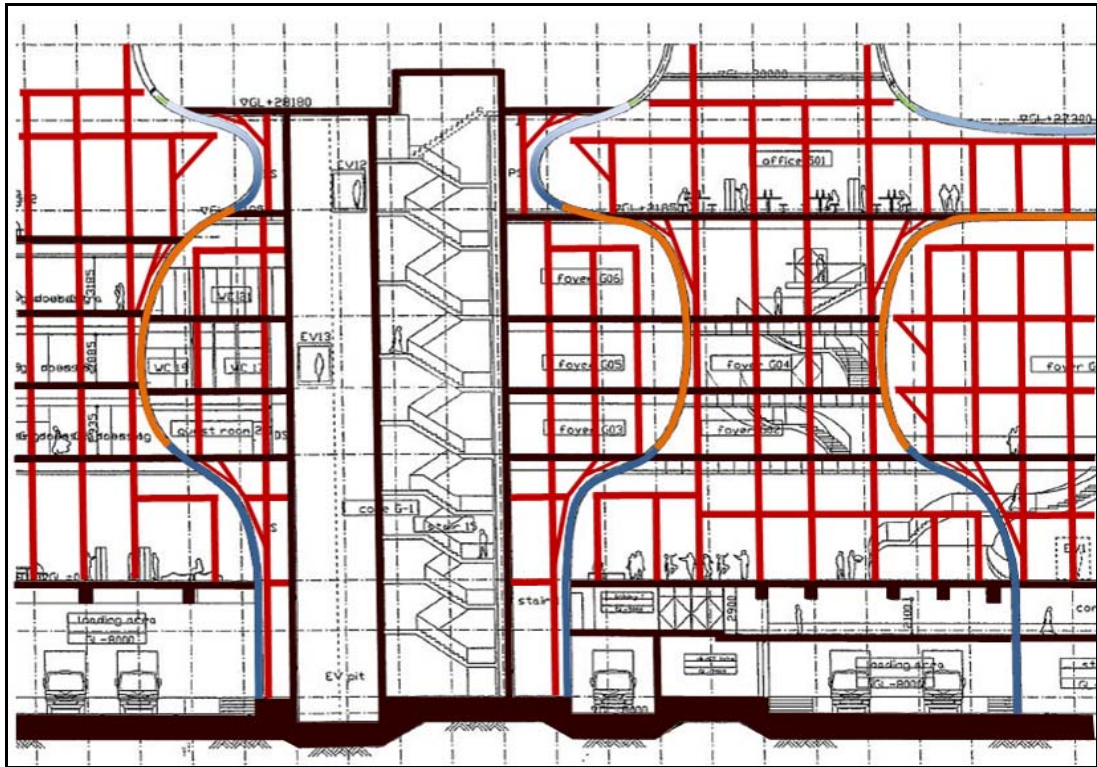


圖 2.34 第四層曲牆鋼構支撐組裝  
資料來源：互助營造(2008)

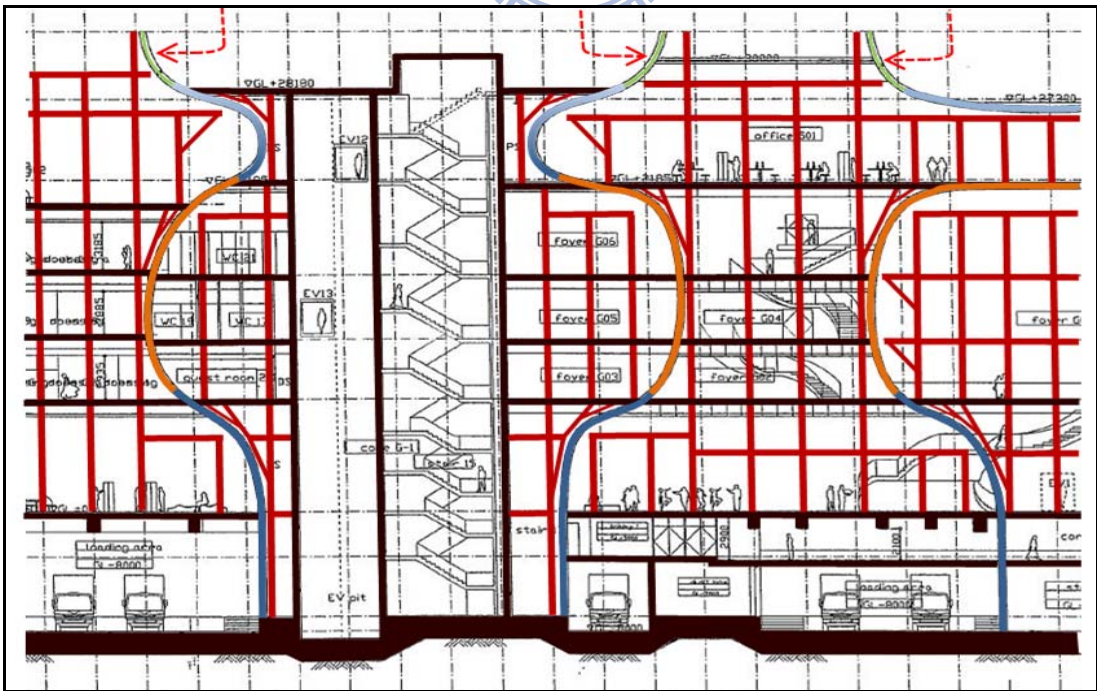


圖 2.35 第四層曲牆 Truss wall 鋼筋吊裝  
資料來源：互助營造(2008)

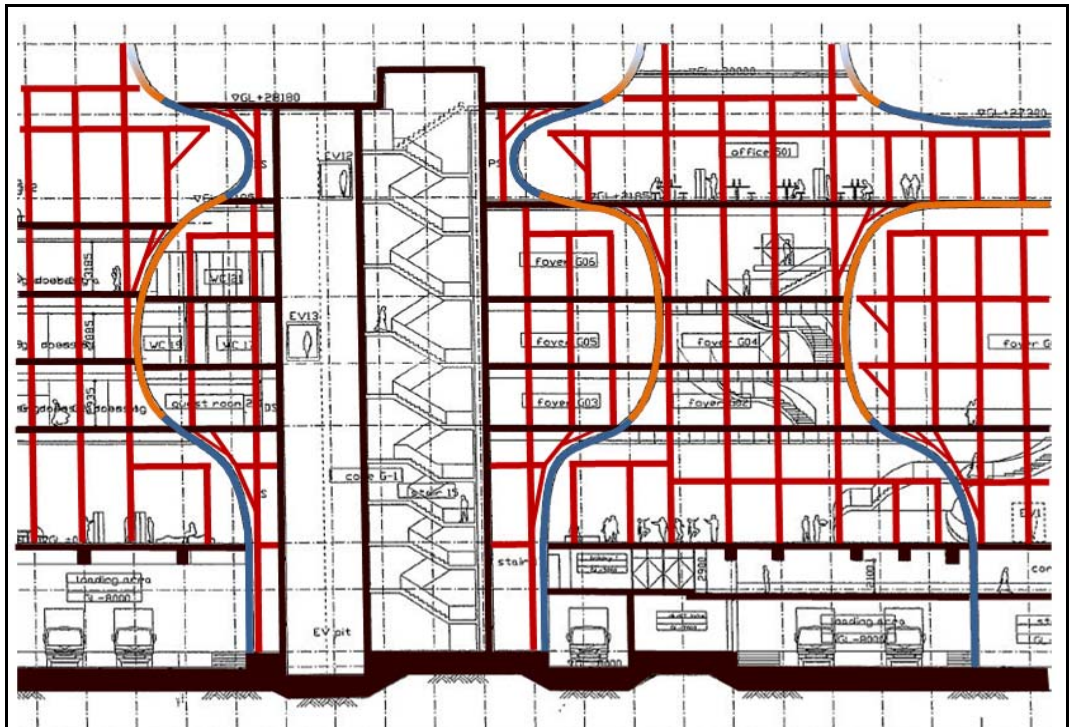


圖 2.36 第四層曲牆鋼筋及速省模綁紮，混凝土澆置  
資料來源：互助營造(2008)

## 2.6.12 小結

從本章節文獻案例之回顧，可歸納分析出有關 3D 技術之應用與曲牆施工過程，皆透過 2D 結合 3D 技術解圖套圖，進而建模發展實體模型，從中確立施工流程與技術問題，雖仍能應用達到施工目的，但相較於整體規劃流程與時程掌握，應有更完善因應對策，由於 3D 曲牆結構施工技术經驗的缺乏，必須應用 3D 技術建模轉換實體模型試作，利用試作過程中找出可行方案，訂定施工流程，針對施工困難點檢討對策，從作業工序中調整與改進，例如，混凝土澆置配比的控制、強度的改變，施工階段介面整合釐清等，除了前述施工技术瓶頸中必要之解決對策外，針對工期的問題尚須就整體施工資源作整合，如機具設備、施工模具化、快速化、人力資源、時程管控、成本控制等，擬定周詳的施工計畫與施工可行性的評估。

綜觀本案例施工技术關鍵之一在於 3D 數位的建模，且必須滿足如下：

1. 完整的數 3D model (3D 承商必須利用建築師之透視面分解而提供)。

2. Truss wall 製造及現場組立座標值、鋼筋分割面、3D實體圖(做為支撐架、樣架施工依據)。
3. 鋼構3D圖檔及其於3D空間的座標。
4. RC完成面座標及基準控制點。
5. 若機電配管必須埋設於3D RC牆內，則必須有3D 彎管線路圖。

本案例因其特殊造型及功能，必須拋開傳統思維方式進行工作規劃。如何掌握模組化及生產線概念，將決定工期長短；也就是進行規劃設計工具及流程。前期規劃的完整度，從工法、測量、模組化及界面整合均需重覆演練，因此如何檢核上述之規劃表件將成為本案之另一重點即尋找有經驗之總顧問成為關鍵。另一施工關鍵檢討以水平支撐及吊樣架取代重型支撐的技術問題，因大量重型支撐架不僅影響下方動線，且不利水平移位之抵抗，如採用水平支撐系統，可提供較鋼性工作平台，有利測量工作且提供較佳之下方工作空間。其次以水平環狀分段灌漿有利結構穩定及連續性施工並減少對吊樣架之壓力。故建議以型鋼桁架取代鋼筋桁架加鋼筋之組合，雖增加成本，但對施工性、安全性、工期掌控，皆能達到最佳化管理。





## 第三章不同曲牆結構 Mock up 試作比較分析

### 3.1 特殊曲牆結構 Mock up 試作案例(一)

本案例一選擇之位置為案例曲牆最具代表性之一，所選擇的條件具備諸多 3D 曲面及 90 度交角條件，如圖 3.1 所示，其次由於專業 3D 繪圖廠商，無法在本案投標前協助 3D 曲線詳圖之提供，故若要順利執行本案運作有相當困難性。

目前單位能使用 3D 繪圖的人嚴重缺乏，若要在曲面上執行 truss wall 的排法更是困難，若就目前稍具 3D 經驗者來整合圖面，至少約需 30 天以上時間。建築師及日本專業人士認為，在沒有實務經驗情況下，就算有 3D 曲面的詳細資料圖面，建議從簡單的 3D 實體進行研討，建立基礎後再深入研析較複雜之 3D 曲線。

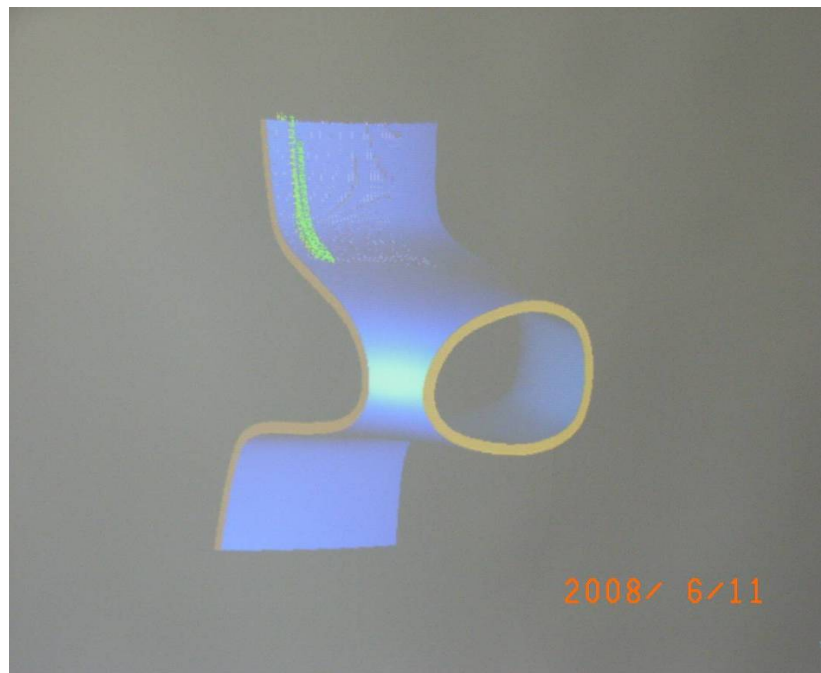


圖 3.1 3D 曲牆圖

資料來源：大鉅聯合建築師事務所(2008)

本案例是針對特殊曲牆的部位選取 Mock up 試作，如圖 3.2、圖 3.3 所示，兩種特殊曲面的圓筒形曲面，試作重點在於能從其不同曲面交界點衍生出不規則散發曲面的施工困難點，並能從試作過程中定出未來現場施工作業障礙的改善，提出可行性施工技術與施工計畫的參考依據。

其次對於不規則曲牆的施工架與結構支撐架的規劃，透過實體模型試作的過程，對施工架及支撐架一併檢討，如圖 3.2、圖 3.3 所示，而筒形環狀曲牆的支撐配置不同於一般結構，必須同時考慮結構體的支撐安全問題，以及施工動線工作空間的考量，因此在試作當中必須一一考量規劃。



圖 3.2 試作案例一實體曲牆之一



圖 3.3 試作案例一實體曲牆之二

資料來源：互助營造 (2008)

### 3.2 標準單元曲牆 Mock up 試作案例(二)

考量無專業 3D 繪圖廠商之協助，選定較為單純標準型之曲牆，本案例二將標準曲牆單元分割為四個小單元，如圖 3.4 所示，在進行試作過程中統計彙整經驗數據，作為後續成本分析之參考，藉由 3D 套圖建模轉換為施工圖，並擷取曲牆一層的大單元，分割為四片標準單元曲牆，如圖 3.4 所示，陳述如下說明：

1. 曲牆拆圖建模單元分割計畫。
2. Truss wall 之施作及鋼筋綁紮。
3. 實驗曲面左右、上下單元之搭接方式。
4. 吊裝模式、測量方法。
5. 曲牆支撐及施工鷹架組立方式。
6. 混凝土澆置作業工序。
7. 牆體隨打隨批泥作施作技巧。
8. 作業人力、使用材料、機具配備等工率之統計。

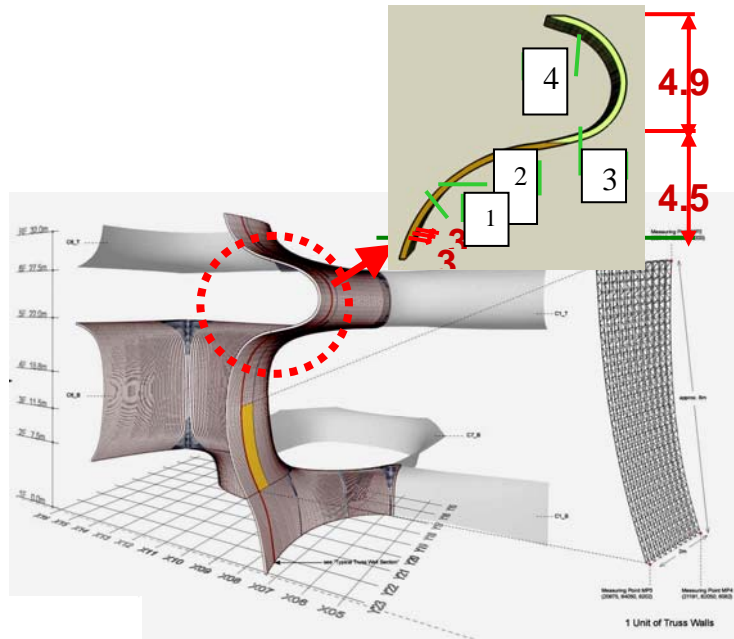


圖 3.4 曲牆分割單元

資料來源：本研究資料整理



圖 3.5 試作案例二實體曲牆之一



圖 3.6 試作案例二實體曲牆之二



圖 3.7 試作案例二實體曲牆之一



圖 3.8 試作案例二實體曲牆之二

資料來源：互助營造 (2008)

### 3.3 標準單元曲牆 Mock up 案例(二) 施工流程

#### 3.3.1 桁架鋼筋製作流程

本案例之單元曲牆 Mock up 施作流程，如圖 3.9 所示，主要擷取曲牆標準曲面作為標準曲牆試作依據，實體試作主要希望透過實際施工過程中能獲取施工困難點的匯集，從試作流程的每一環節，確立施工可行方法及技術的改善，提供未來曲牆施工計畫的依據，如圖示 3.10，單元曲牆鋼筋試作現場的照片，從桁架放樣、鋼筋彎折、鋼筋電焊組接桁架，桁架鋼筋組接完成的施工流程。

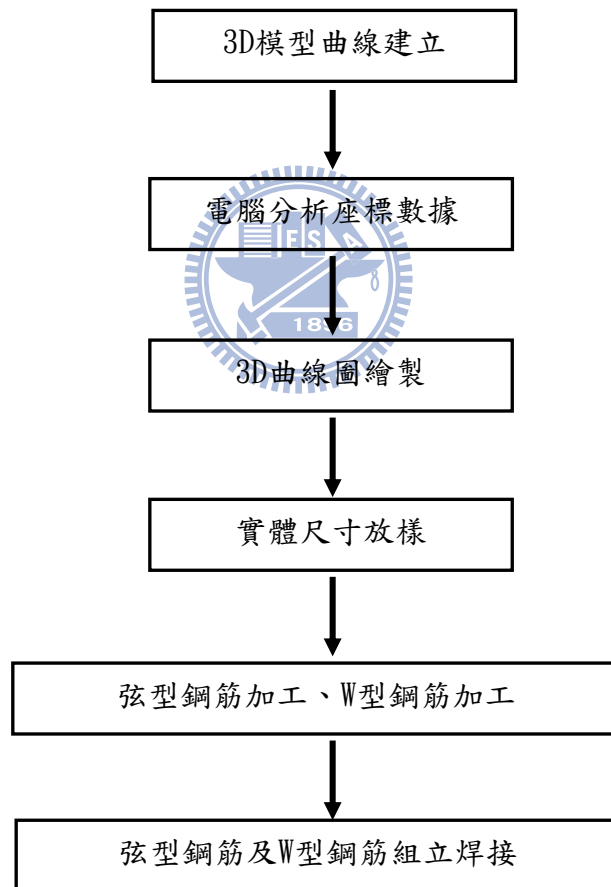


圖 3.9 桁架鋼筋製作流程  
資料來源：本研究資料整理

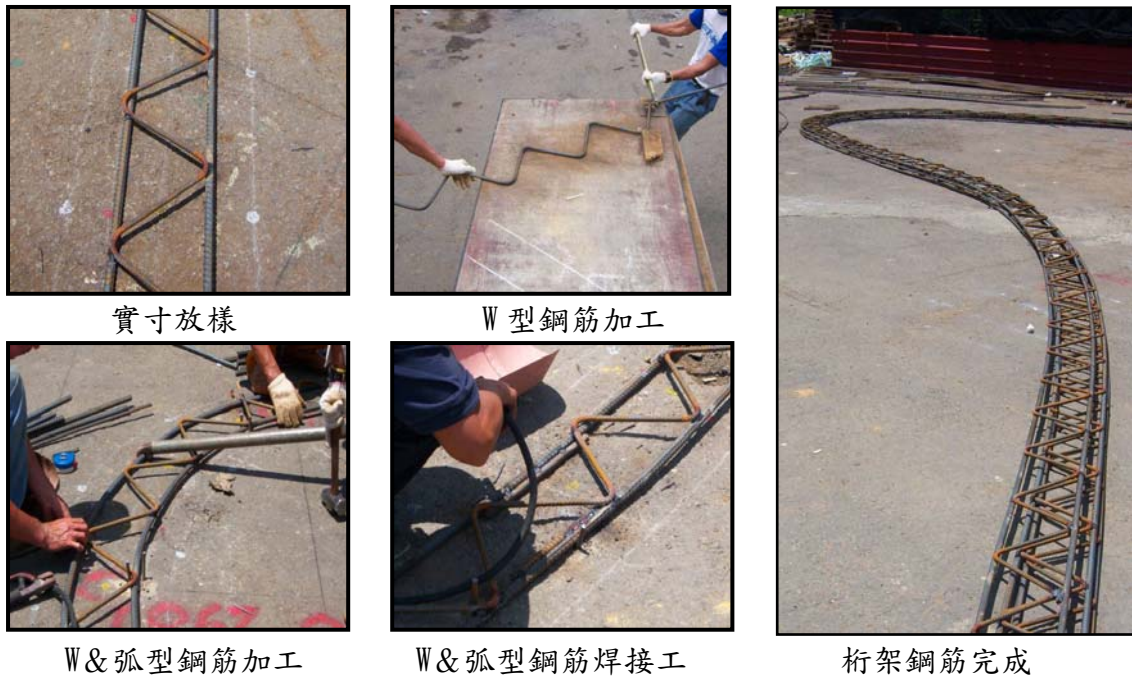


圖 3.10 桁架鋼筋現場製作  
資料來源：互助營造 (2008)

### 3.3.2 單元桁架曲牆構造製作流程

前述第 3.3.1 節為說明桁架鋼筋的施作流程及現場試作施工照片，從流程中獲知桁架鋼筋內骨架的施作放樣加工程序，本節將彙整單元桁架鋼筋的初步施工程序，擬定較完整單元曲牆主體的試作流程，如圖示 3.11，透過完整單元組裝的試作流程，可以從曲牆鋼筋綁紮所須的模台架規劃設計，如圖 3.14、圖 3.15、圖 3.16、圖 3.17，在施作中了解曲牆固定方式與改進方法，桁架鋼筋曲牆的模台設計，主要針對曲牆配筋作業過程中，結構體如何支撐固定，且在作業空間的限制下，如何最經濟快速的完成配筋作業，因此必須在各種狀況下選擇最適當模台架。如圖示 3.12、圖 3.13 所示。

現場鋼筋綁紮施作照片，針對牆體鋼筋綁紮的穩定性，支撐架補強方式確立獲取較完整的資訊，在鋼筋綁紮的過程中，對於桁架鋼筋的組立工作性檢討，而對主體鋼筋的繫筋焊接是否牢固，針對主體鋼筋銜接是否產生錯位及歪斜，另外檢討桁架鋼筋補強斜撐，如圖 3.13 所示，避免牆體變形必須考慮吊裝點的設置及吊點結構強度計算，依結構計算結果設置曲牆吊耳，避免吊裝過程曲牆產生變形甚至解體。

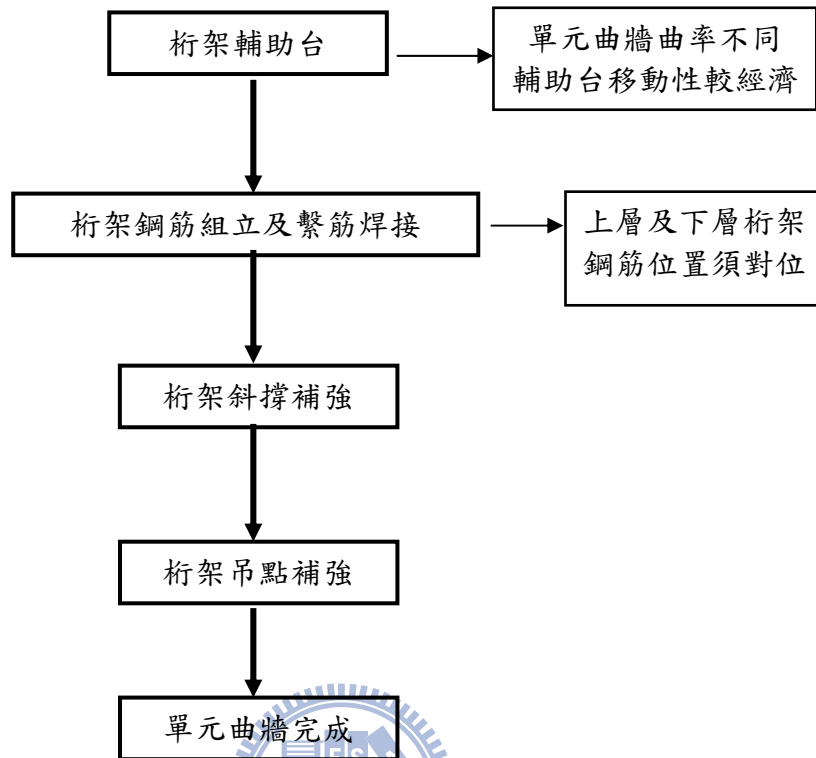


圖 3.11 桁架曲牆製作流程圖  
資料來源：本研究資料整理

### 1. 單元桁架曲牆托架工序



## 2. 單元桁架曲牆鋼筋組立工序



桁架鋼筋連結



桁架鋼筋連結



斜撐補強



斜撐補強



單元曲牆完成



單元曲牆完成

圖 3.13 桁架曲牆鋼筋組立  
資料來源：互助營造 (2008)



## 3. 桁架鋼筋組裝托架設計

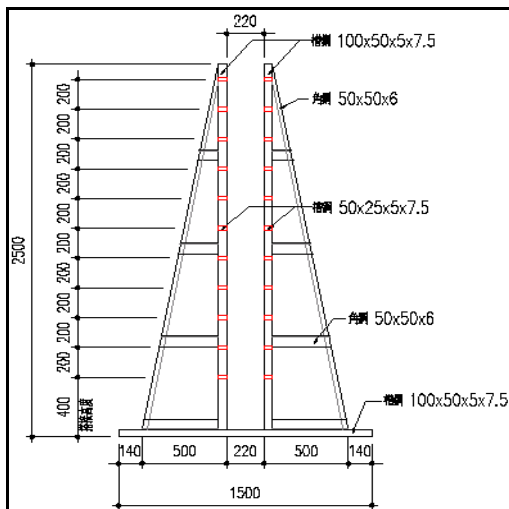


圖 3.14 托架正面圖  
資料來源：本研究資料整理

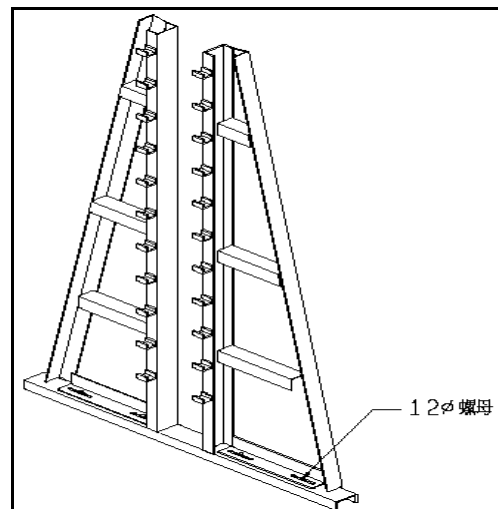


圖 3.15 托架側面圖

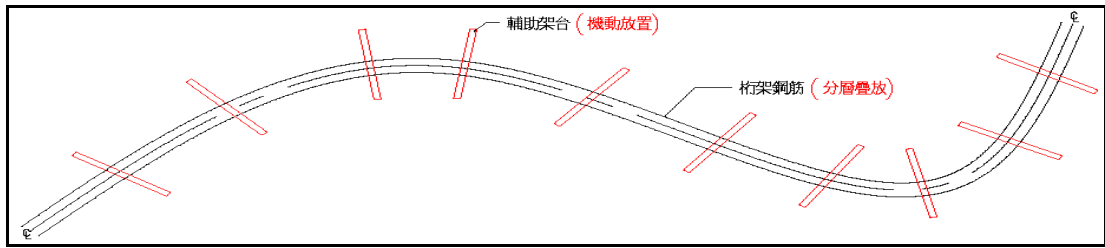


圖 3.16 托架頂視圖 資料來源：本研究資料整理

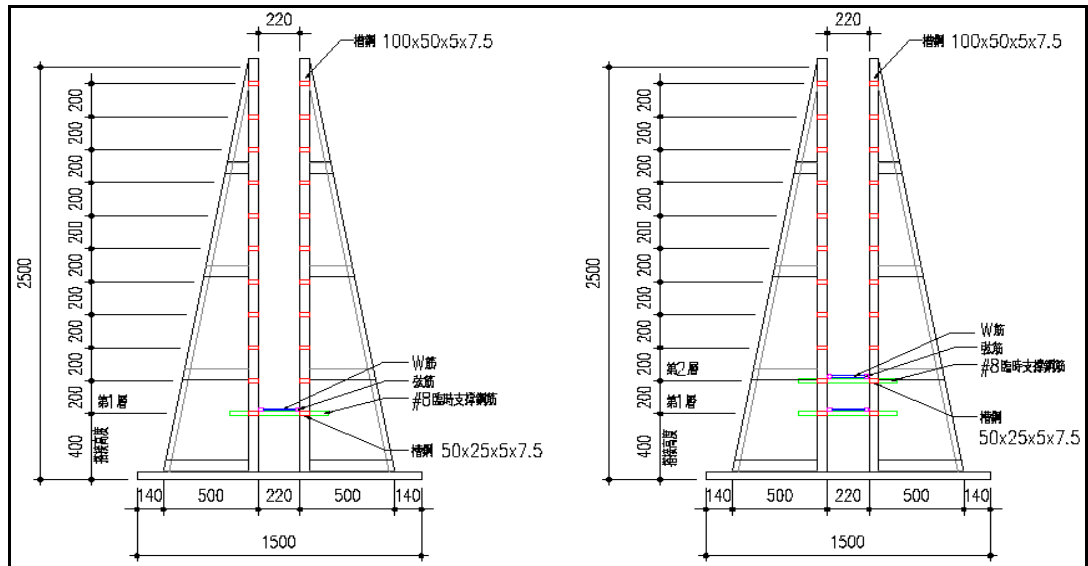


圖 3.17 桁架鋼筋組裝托架設計圖 資料來源：本研究資料整理

#### 4. 單元曲牆桁架結構組裝完成圖



單元曲牆進場



單元曲牆吊裝



單元曲牆吊裝



單元曲牆吊裝



單元曲牆吊裝完成

圖 3.18 單元曲牆組裝完成圖 資料來源：互助營造(2008)



### 3.3.3 曲牆結構現場施工流程

曲牆結構施工流程，乃透過單元桁架試作流程中，彙整檢討擬定出整體曲牆結構施工流程，如圖 3.19 所示，本流程主要重點在於曲牆組合吊裝、曲牆座標點的設置與檢測方法確立、曲牆結構預埋件的規劃設置、曲牆單元組合銜接鋼筋的配置。

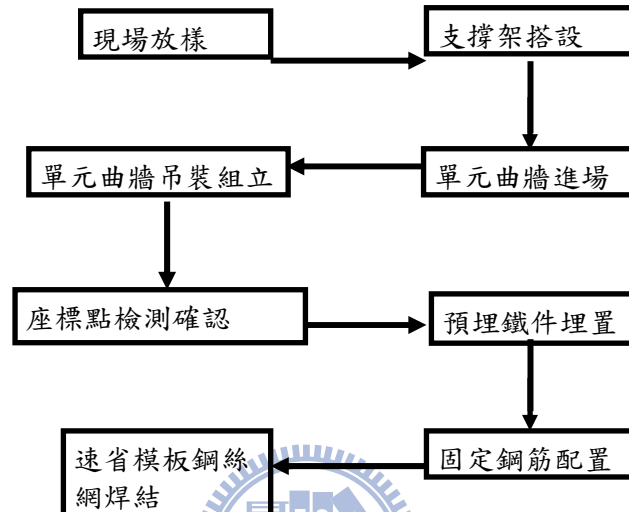


圖 3.19 現場施工流程圖  
資料來源：本研究資料整理

## 3.4 曲牆混凝土配比選用比較與澆置流程

### 3.4.1 混凝土配比選用比較

混凝土配比的選用依拌合後之流動性評定，由小而大共分為配比 A(坍度試驗結果 18.5cm)，配比 B(坍度試驗結果 23.0cm)，配比 C(坍度試驗結果 56.0cm)，三種配比就泥漿漏出量試驗比較，其順序分別為 A、B、C 排序，但因在未搗實作業下 C 配比漏漿量較大，故較 A、B 配比差。如表 3.1 所示混凝土配比比較。

據伊東豐雄建築設計事務所/大矩聯合建築師事務所所提供之曲牆混凝土配比之選用經試驗報告書成果建議選用配比 B 較為可行。金田充弘(2007)。

表 3.1 混凝土配比試驗比較表

	配比 A	配比 B	配比 C
設計強度	42N/mm <sup>2</sup>	42N/mm <sup>2</sup>	42N/mm <sup>2</sup>
目標強度	50N/mm <sup>2</sup>	50N/mm <sup>2</sup>	50N/mm <sup>2</sup>
坍度 SL	21cm	23cm	25.5cm
坍流度 FL	30cm	45cm	55cm
水膠比	37.9%	37.9%	37.9%
粗骨材最大粒徑	20m/m	20m/m	20m/m
普通水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	131kg	131kg	131kg
高爐水泥 type-B	315kg	315kg	315kg
高爐石粉摻加率	30%	30%	30%
單位水重	169kg	169kg	169kg
細骨材	783kg	798kg	829kg
粗骨材	953kg	937kg	904kg
添加劑	高性能減水劑	高性能減水劑	高性能減水劑
重量	5,976kg	6,422kg	7,270kg
空氣量	3%	3%	3%

資料來源:金田充弘(2007)

### 3.4.2 混凝土澆置流程注意事項

1. 混凝土澆置流程：針對混凝土澆置作業計畫，在施工流程中關注到應注意事項，如澆置前的支撐繫結檢查、輸送管配置計畫、及澆置過程中的搗實，在施工流程中可作為工序的檢核依據。

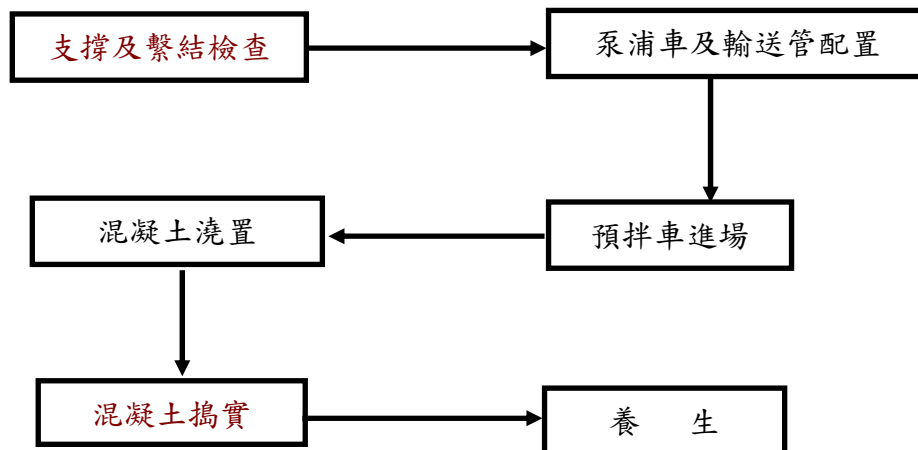


圖 3.20 現場流程圖

資料來源：本研究資料整理

## 2. 混凝土澆置應注意事項

### (1). 混凝土輸送，如圖 3.21 所示。

- a. 混凝土拌合澆置間隔時間，超過初凝時間（約 90 分鐘）應予以退車不得澆置。
- b. 混凝土輸送應採適當保護措施以減少坍度損失，澆置時嚴禁加水增大混凝土坍度。
- c. 混凝土輸送中途拌合桶應持續拌合，卸料應採適當措施避免粒料分離。
- d. 輸送至工地之預拌混凝土，得隨機抽作坍度及含氣量試驗，依“工地混凝土試體之製作及養護法”規定每 100 製作 4 個試體。

### (2). 混凝土澆置搗實，如圖 3.21 所示。

- a. 澆置前牆體鋼筋及埋設構件應清理乾淨，無油污等有害物質。
- b. 混凝土澆置所使用混凝土泵送車須性能良好、輸送動力須足夠揚程。
- c. 澆置時混凝土分層鋪設，不得堆積於一處，並使用振動機
- d. 振動機插入混凝土須垂直插入混凝土並深入下層尚為塑性狀態之混凝土
- e. 約 10 公分左右，以獲得較佳之黏結。
- f. 牆體澆置預留口須依牆體適當位置高度規劃並作開口補強。



混凝土澆置



混凝土搗實



養生完成



牆面砂漿粉刷



支撐及繫結檢查

圖 3.21 單元曲牆混凝土澆置工序

資料來源：互助營造 (2008)

### 3.5 單元桁架曲牆組裝工率分析

由於 3D 曲牆的設計與施工技術，在國內尚屬首創案例，相關施工計畫與施工方法缺乏實際案例可供參考，為尋求施工方法的確立與解決施工困難點，唯有利用施作 Mock up 實體模型試驗，從試作過程中找出施工障礙，並提出解決對策。

從單元曲牆模型試作，依施工流程各階段中計算彙整統計各項工率，例如，前置作業工廠內業的施工圖面繪製、行架鋼筋的打模放樣、桁架鋼筋模台製作拆裝、桁架鋼筋樣架組合等、現場外業桁架鋼筋的配筋組裝、單元牆體的支撐架設、鋼絲網的包覆焊結等，整組單元桁架鋼筋曲牆的組裝人力，彙整統計人力分析，獲致以下工率參考值，如表 3.2。

工率分析說明：

1. 牆體主結構鋼筋(背面)，因有支撐架阻礙施作空間，鋼筋綁紮費工耗時。
2. 主結構鋼筋量雖為背面牆體的二倍，因無支撐阻礙問題，工作性較佳，無須耗費二倍人工，如表 3.2 說明。

表 3.2 單元曲牆組裝作業工率分析

作業項目	人工(單位:人×日)	備註
工廠作業(桁架鋼筋製作)		計 8.5
繪製製作圖	2.5	
紙樣打樣(手繪)	1.0	
製作桁架鋼筋	1.5	
製作單元組合架台	1.5	
單元組合·拆出	2.0	
現場作業(澆灌前)		計 27.0
吊裝桁架鋼筋	2.0	
間隔器焊接	4.5	
設置結構主筋(背面)	3.0	D13@150。支撐架為阻礙因此很耗時
金屬網模板固定鋼筋焊接(背面)	3.0	支撐架為阻礙,較下欄的表面耗時
設置結構主筋(表面)	4.5	D13·16@75。間距數量雖為背面的 2 倍,因無支撐所以作業性佳,無須耗費 2 倍的人工。
金屬網模板固定鋼筋焊接(表面)	1.5	
覆蓋金屬網模板·綁紮(背面)	3.5	
設置模板支撐架	2.0	
覆蓋金屬網模板·綁紮(表面)	3.0	

資料來源：本研究資料整理

### 3.6 單元桁架曲牆組裝單價分析

本章節除就不同曲牆單元實體模型的施作工法,探討其施工技術障礙與解決方法外,針對欲了解複雜曲牆施工的成本,分別就其每段施工流程做工率的計算分析,希望從施工階段將試作單元曲牆的材料、人力配置、施工效率、成本等,彙整統計分析,並分項提列出各項工料單價分析。

由於 3D 曲牆的設計與施工技術,在國內尚屬首創案例,缺乏可供參考之實際案例遵循,相關施工技術或成本難以編訂,唯有利用施作 Mock up 實體模型試驗,從試作過程中擷取相關可應用資料,並加以分類彙整各試作過程的工項,如鋼筋桁架放樣、鋼筋桁架組裝電焊、鋼筋曲牆組焊及構架校正、主筋組立及加強筋彎曲組焊、免拆鋼網固定器及組焊、三層網目及施作(雙面)、曲牆運輸及現場組裝電焊、曲牆及開口鋼筋補強、作業工作架及安全設施、現場作業區及設備等十項,加以彙整分析獲致單價分析參考值,如表 4.3 所示。

表 3.3 單價分析表(不含鋼筋材料)

作業內容	單位	單價
鋼筋桁架放樣	m <sup>2</sup>	270
鋼筋桁架組裝電焊	m <sup>2</sup>	1,350
鋼筋曲牆組焊及構架校正	m <sup>2</sup>	1,450
主筋組立及加強筋彎曲組焊	m <sup>2</sup>	1,650
免拆鋼網固定器及組焊	m <sup>2</sup>	1,440
三層網目及施作(雙面)	m <sup>2</sup>	2,800
曲牆運輸及現場組裝電焊	m <sup>2</sup>	950
曲牆及開口鋼筋補強	m <sup>2</sup>	450
作業工作架及安全設施	m <sup>2</sup>	150
現場作業區及設備	m <sup>2</sup>	250
合計	m <sup>2</sup>	10,760

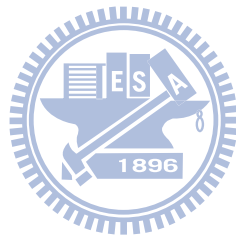
資料來源：本研究整理

### 3.7 小結

本章節就不同曲牆實體 Mock up 試作，選取曲牆特殊曲面的結構及擷取標準曲面的曲牆，分別就 3D 模型的建構與單元拆解分割，施工作業流程的工序，曲牆座標點的檢測方法與設定，曲牆鋼筋模台的設計，曲牆混凝土配比與澆置，每一環節作細部的探討與分析，獲得以下結論：

1. 座標檢核點應標注於現場固定處以供精度檢核。
2. 支撐架搭設規劃應避開座標檢核點的位置。
3. 不規則曲面單元必須於量測放樣現場配筋綁紮。
4. 支撐架配置須經專業結構技師計算提送審通過。
5. 由於曲牆非線性的結構，因此支撐架組立須特別注意側向應力，水平繫條或斜撐之配置亦須經過結構技師計算檢核。
6. 曲牆為漸變結構，因此支撐架採用重型架搭配鋼管支撐及部分角材來施作，以因應各種不同空間與不規則高度之支撐。
7. 支撐架之規劃應同時考慮後續裝修工程之轉用，以降低成本。
8. 支撐架之拆除時機必須嚴格管制，除了混凝土強度達到之外，曲牆結構是否已具備自立性或一個施工循環(上下與樓版連結)等應特別審慎評估。
9. 單元曲牆之座標點標註與支撐架之座標點，吊裝時應做點對點之檢核。
10. 單元曲牆吊裝時須觀測其變形量，吊裝後須做複測檢核其座標點。

11. 單元曲牆灌漿口之規劃設置，需整體規劃依分割單元及高度設置。
12. 不規則曲牆的拆圖與標準曲牆的界面點須詳細規劃，針對牆體與樓板的曲分界點，須清楚界定單元分割，以利混凝土分層澆置計畫。



## 第四章 單元曲牆替代工法之成本與工期比較分析

本研究將針對前述第二章節 3D 曲牆鋼筋桁架結構(Truss Wall)單元曲牆模型試作，歸納分析可待改善事項，提出可行性替代工法，即複合式結構曲牆(Compound Wall)，本章節將針對不同工法單元曲牆施作成本與工期做比較分析。

### 4.1 單元曲牆工法比較

#### 4.1.1 單元 3M\*8M 曲牆結構組成之比較

鋼筋桁架結構組合由#3/#4鋼筋依放樣曲線組合電焊成桁架骨架，再由#3/#5鋼筋綁紮組成曲牆體，外圍再以鋼網點焊形成免拆模板桁架構件。如圖4.1所示，由於桁架全由鋼筋組成，工法受限於場地必須有足夠空間，並且組成之單元曲牆勁度不足，必須依靠鋼構支撐加以固定，且吊裝時牆體容易變形，為了增加牆體剛性勁度，增加鋼筋電焊接點與補強筋，衍生成本與組裝效率，因此針對原設計施工限制缺點，本研究提出曲牆結構組成之替代工法，複合式桁架結構以改善前述缺失。

##### 1. 替代工法(複合式曲牆)結構組合說明：

單元結構組合內骨架改用鋼構件組合使用3片6mm PL + 6片水平撐材，形成一鋼構架結構，外圍再以鋼網點焊形成免拆模板複合式桁架構件。如圖4.2所示。

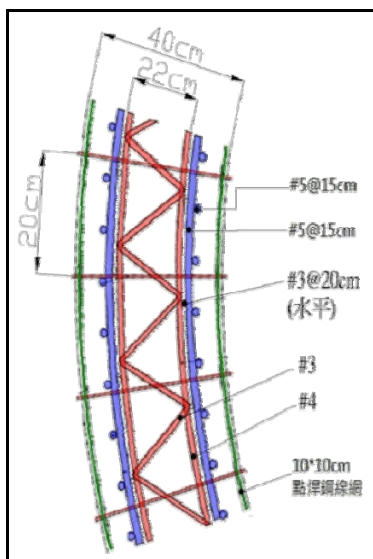


圖 4.1 鋼筋桁架結構  
資料來源；金田充弘(2008)

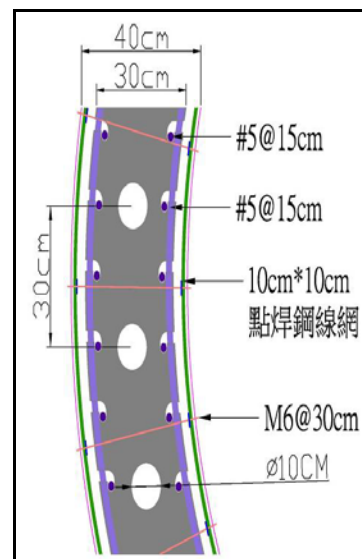


圖 4.2 Compound Wall 複合式結構  
資料來源：本研究整理



## 2. 替代工法(複合式曲牆)組合步驟說明(如圖4.3、圖4.4、圖4.5所示)

- (1). 使用 6mm 厚度鋼板依曲線放樣切割成曲牆弧形。
- (2). 每片鋼板皆預留 10 cm×10 cm 之曲牆灌漿流通孔。
- (3). 再以 6 片鋼板電焊組合成水平撐材，形成桁架內支撐。
- (4). 外圍牆體配以#5 鋼筋綁紮成桁架鋼筋曲牆。
- (5). 復以鋼網點焊成免拆模板阻擋灌漿溢流

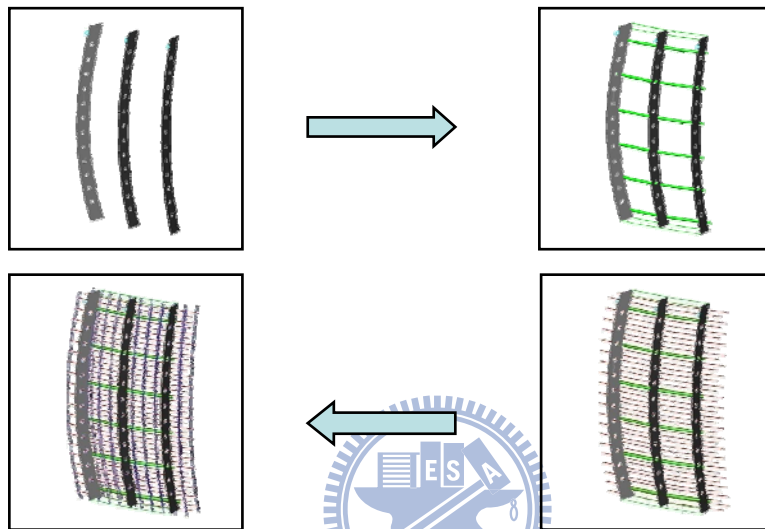


圖 4.3 曲牆鋼筋組合步驟  
資料來源:本研究資料整理

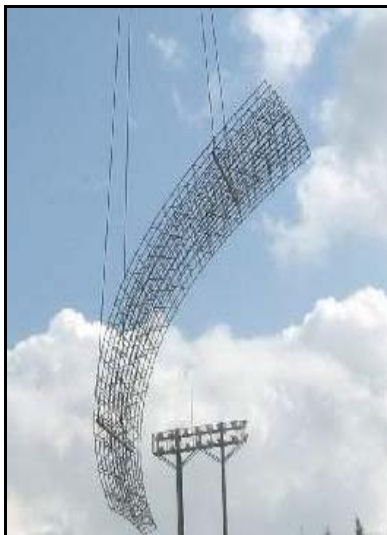


圖 4.4 桁架鋼筋結構曲牆  
資料來源：金田充弘(2008)

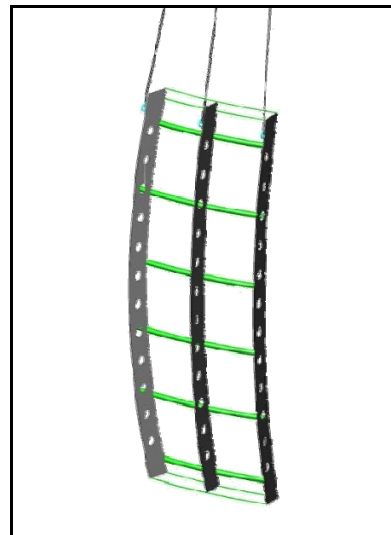


圖 4.5 複合式鋼架結構曲牆  
資料來源：本研究資料整理

## 4.1.2 單元曲牆吊裝工法之比較

單元曲牆的結構組成，原設計鋼筋桁架結構因其主體仍以鋼筋組合為主，每單元組成之曲牆其剛性較弱，穩定性不足，故其單元吊裝不能單點式吊裝，在單元銜接上亦容易變形。而替代工法複合式鋼架之主體為鋼構件聯結組成，使用 3 片 6mm PL + 6 片水平撐材，形成一穩定框架之鋼構架，外圍再以鋼網點焊形成免拆模板複合式桁架構件，針對鋼筋桁架單元曲牆較弱的剛性、不穩定性、吊裝不便利性，皆能獲得充分改善。

在原設計者對桁架鋼筋曲牆的試作，主要針對曲面較規則性的曲牆標準單元，作為實體模型的試作標的，將其試作過程列為主要工項的有，桁架鋼筋曲線的放樣方式，桁架鋼筋組裝的技巧，主體鋼筋綁紮的過程有關斜撐補強，鋼筋續接問題與因應方式，混凝土澆置所產生骨料配比的問題等，而對於不規則曲牆的施作技術困難問題，並未有多方的討論，故本節將針對桁架鋼筋產生的較弱的剛性、不穩定性、吊裝不便利性等問題，提出可改善工法的替代性作一比較分析。



## 4.2 不同工法單元曲牆施工流程與工期比較分析

### 4.2.1 原設計鋼筋桁架曲牆單元施工流程與工期

原設計鋼筋桁架曲牆單元施工流程，如圖 4.6 所示，選擇一標準單元的曲牆依流程順序施工，引用 3D 模型拆解曲牆單元，依曲牆曲線弧度放樣於地板上，首先彎紮桁架鋼筋並施以電焊接合，組合成鋼筋桁架結構，再依單元尺寸配筋綁紮組成曲牆，牆體結構完成後即包覆鋼絲網，牆體須預留灌漿孔並做好開口補強措施，灌漿後砂漿慢平。

本施工流程中重要階段在於曲牆放樣的精準度及桁架鋼筋組合電焊過程，牆體之配筋必須注意吊裝穩定性之勁度補強措施與吊裝用吊點的預留，而鋼絲網須注意避免漏漿。而桁架鋼筋曲牆分區單元試作所須工作天，如圖 4.7 所示，每區一單元循環的工作天約七十五天，此試作為標準單元曲牆所花費工數，如不規則曲牆區域，因施工困難度較複雜，則施作工期將會再增加。

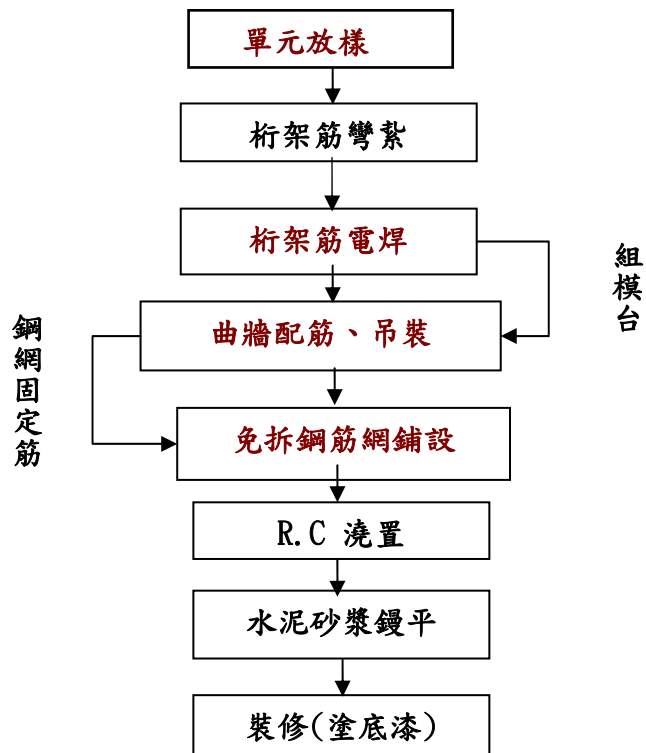


圖 4.6 桁架鋼筋曲牆施工流程圖  
資料來源：互助營造(2008)

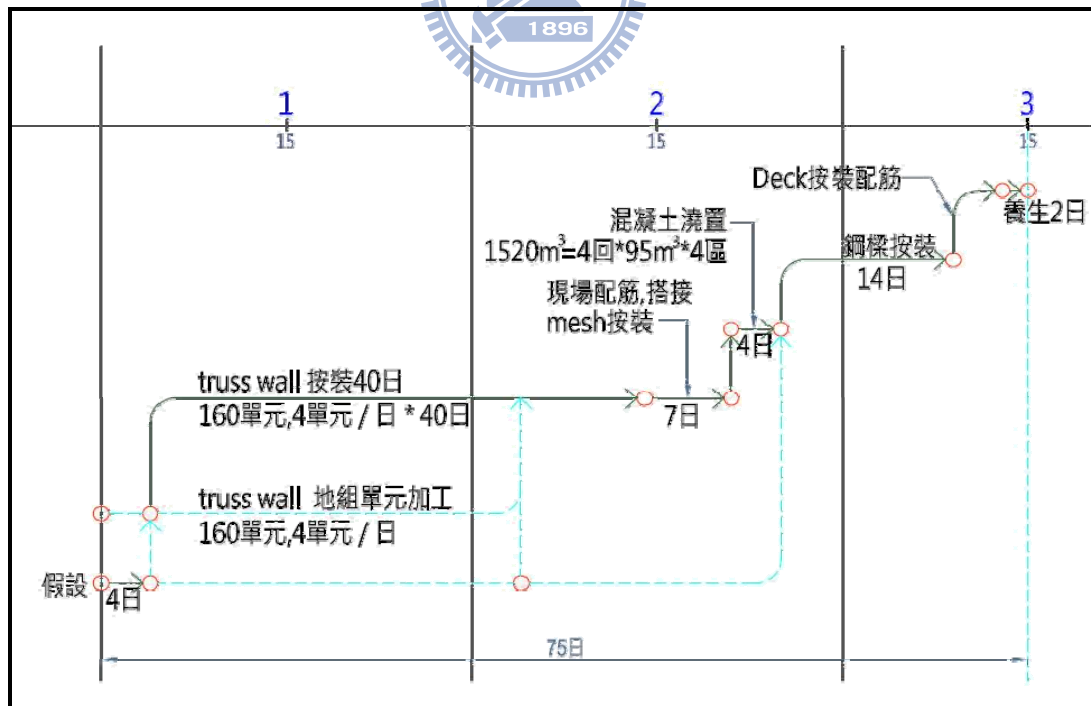


圖 4.7 桁架鋼筋單元曲牆工期  
資料來源：大田勝人(2007)

## 4.2.2 替代工法複合式曲牆單元施工流程與工期

複合式曲牆施工為針對原桁架鋼筋結構施工受限之缺失進行改善，因此特別考量牆體勁度剛性的補強，經過前述試體模型試作後，所得到的結論，為加強牆體的剛性採用鋼板桁架做為曲牆主構架，其施工流程如圖 4.7 所示，替代工法改善方案朝模組化施工進行研究，首先於 3D 拆圖建模後，應用電腦輸入曲線數據，透過自動切割機 CNC 裁切弧型曲線，作為曲牆桁架主結構，可依拆解之不同單元牆體自動化切割，以模組化提升產能。

由於主結構為鋼板組合式桁架，在曲牆組裝過程中可避免勁度不足牆體的變形，組裝也因供料快速而能節省組裝工期，如圖 4.8 所示，每區一單元循環的工作天約六十天，現場組裝較不受限場地空間的影響，可規劃分區組裝及分區澆置混凝土，作業空間可因降低支撐構件配置而不影響施工動線，替代工法的作業流程其重點仍在於曲牆的 3D 拆圖建模精確度，由於建立自動化與模組化的需求，電腦作業與工廠生產線規劃必須詳細規劃精算，達到要料有料的快速供應鏈。

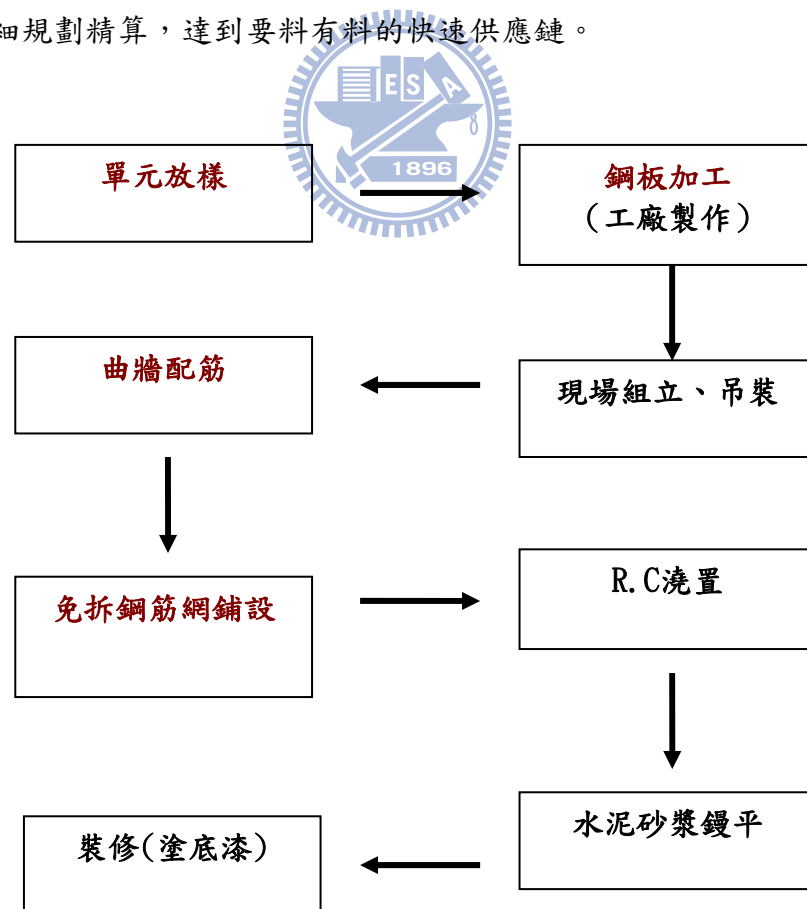


圖 4.8 複合式結構曲牆施工流程圖

資料來源：本研究資料整理

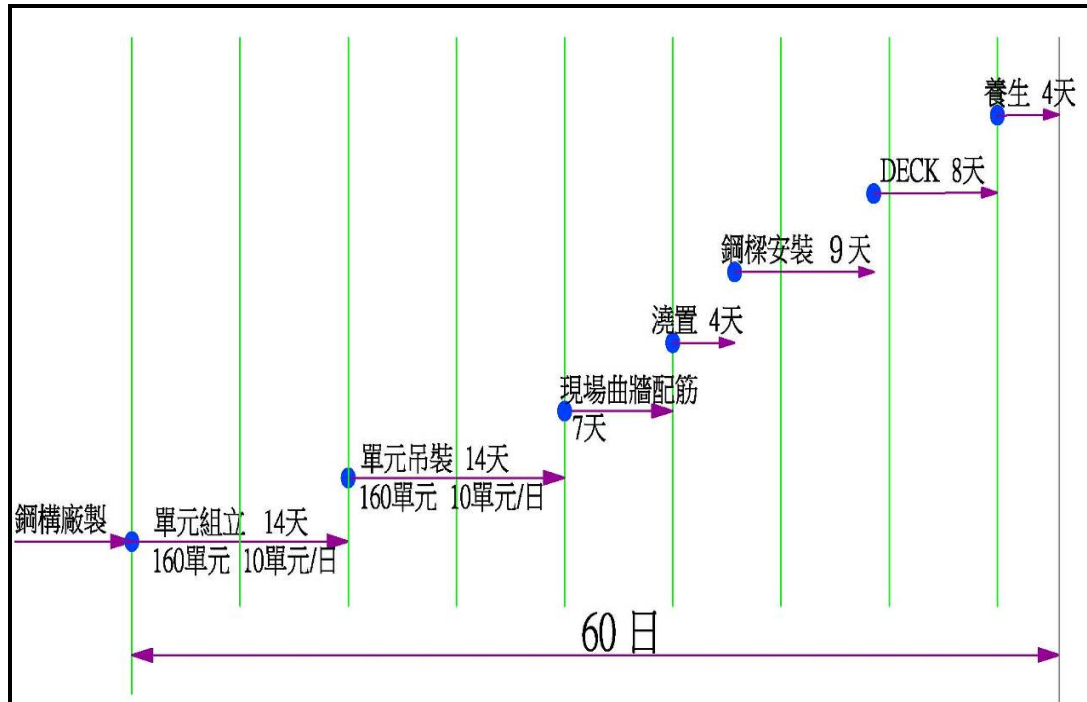


圖 4.9 複合式結構單元曲牆工期  
資料來源：本研究資料整理

### 4.2.3 替代工法施工流程與工期排程的優勢比較

鋼筋桁架曲牆每單元的施工流程，因其曲牆主體由鋼筋加工彎折電焊組成鋼筋桁架，單元曲牆主體結構組成鋼筋電焊節點量大，工序繁複且費時，因此施工流程不易掌握，每單元曲牆施作工期排成為七十五天，而複合式結構因主體結構為鋼板於工廠加工裁切預製，可透過 CNC 切割機快速加工，大量減少人力加工且省時，因此每單元施工排程共計六十天，比較鋼筋桁架單元施工，替代工法單元施工可節省十五天工期。

由前節 4.2.1、4.2.2，比較獲知，替代工法可改善桁架鋼筋因施作繁雜衍生的諸多問題，針對繁複的桁架鋼筋作業改為可模組化的複合式鋼板桁架，在工廠模組化加工而增加組裝速率，降低工時節省工期，單元曲牆現場吊裝時增加穩定性而不變形，現場單元銜接組裝也較前者快速精準，結構性較能符合設計者要求，因此從施工技術上的提升，以及工期的節省，本研究提出之替代性工法是可行的建議。

### 4.3 替代工法單元曲牆結構成本比較分析

本研究透過曲牆實體模型試作中，針對可改善施工法提出可行性工法建議，從替代工法的單元組合結構與桁架鋼筋曲牆工法作工期與成本的比較分析，由於本案例並無可供參考的實際經驗數據，為了解在一單元曲牆的試作過程中，衍生的人工材料費用以及單元試作中的實際產出工率，故在單元曲牆比較分析中，分為曲牆內骨架材料成本與主體結構鋼材成本，如表 4.1、表 4.2 所示。

針對不同工法的成本做分析比較，主要分類為桁架鋼筋與桁架鋼板的內骨材單元成本做分析比較，由於桁架鋼筋替代為桁架鋼板，從結構性分析可降低每單元桁架數量，如下 4.3.1 節第 1 項及㉑第 3 項㉑計算式所示，另其主體曲牆鋼筋量依原設計配筋量不變，如 4.3.1 節第 1 項㉒及第 3 項㉒計算式所示。有關每單元曲牆成本比較計算，如下 4.3.1 節第 2 項及第 4 項成本計算分析比較。

#### 4.3.1 單元曲牆不同鋼材內骨架成本比較

替代工法的單元曲牆組合結構，其內骨架由原桁架鋼筋改為鋼板組合，主要考量在於單元曲牆的穩定性與牆體高勁度，在組合吊裝中增加快速組裝功效，因內骨架以鋼板替代，故在主構件鋼材能比原桁架鋼筋數量減少許多，單元體積重量也較為降低，因此替代工法的單元材料成本比桁架鋼筋要低，茲就單元曲牆不同鋼材的組成，作工料計算與成本分析，就桁架鋼筋單元重量，曲牆主筋重量，每單元總重及成本彙整，如表 4.1 所示。

##### 1. 桁架鋼筋單元曲牆 3M\*8M 重量計算

###### ㉑ 桁架鋼筋每單元重=574.41 kg

$$\text{桁架鋼筋間隔 } 20\text{cm} \quad \therefore (300/20)+1=16$$

$$\text{外層\#4} \quad 8*2*16*0.99 =253.44 \text{ kg}$$

$$\text{內層\#3} \quad [0.22* \sqrt{2}*(8/0.22)*16]*0.59=105.72 \text{ kg}$$

$$\text{外層\#3} \quad 41*2*3*0.59=145.14 \text{ kg}$$

$$\text{外層\#4(頂、底)} \quad (3 *2*2+0.22*2*2)*0.99 =12.75 \text{ kg}$$

$$\text{內層\#3(頂、底)} \quad [0.22* \sqrt{2}*(3 /0.22)*2]*0.59=5.14 \text{ kg}$$

繫件#4  $522.19 \times 10\% = 52.22 \text{ kg}$

⑥ 曲牆主筋重=1251.48 kg

主筋#6 縱  $16 \times 2 \times 8 \times 2.24 = 573.44 \text{ kg}$

橫  $41 \times 2 \times 3 \times 2.24 = 551.04 \text{ kg}$

搭接  $(16 + 41/4) \times 2 \times 1.08 \times 2.24 = 127 \text{ kg}$

桁架鋼筋單元總重量：④ + ⑥  $\approx 1,825 \text{ kg}$

2. 桁架鋼筋單元曲牆 3M\*8M 成本計算

① 地組作業：

1. 桁架鋼筋製具焊接  $574 \text{ kg} \times 14 (\text{加工費}) = 8,036 \text{ 元}$

2. 成型放樣 16 處 1 式 = 24,000 元

② 現場加工：

鋼筋結構牆 = 1,825 kg

鋼筋組焊及固定  $1825 \text{ kg} \times 14.5 (\text{加工費}) = 26,462 \text{ 元}$

③ 鋼筋材料：  $1825 \text{ kg} \times 35 = 63,875 \text{ 元}$   
桁架鋼筋單元成本 = ① + ② + ③ = 122,373 元

3. 複合式單元曲牆 3M\*8M 重量計算

① 鋼板重=466.29 kg

1. 鋼板 (t=6mm, 3 片)：  $8 \times 0.3 \times 47.1 \times 3 = 339.12 \text{ kg}$

2. 水平撐材 (L75\*75\*6mm, 6 支)：

$0.15 \times 3 \times 47.1 \times 6 = 127.17 \text{ kg}$

② 主筋重= 1251.48 kg

主筋#6 縱  $16 \times 2 \times 8 \times 2.24 = 573.44 \text{ kg}$

橫  $41 \times 2 \times 3 \times 2.24 = 551.04 \text{ kg}$

搭接  $(16 + 41/4) \times 2 \times 1.08 \times 2.24 = 127 \text{ kg}$

複合式單元重量：① + ②  $\approx 1,718 \text{ kg}$

4. 複合式單元曲牆 3M\*8M 成本計算

① 地組作業：

鋼板及支撐角鐵工料=466 kg

466kg\*70(工料費)= 32,620 元

⑥ 現場加工：


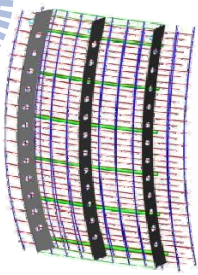
結構鋼筋=1,718 kg

鋼筋組焊及固定：1,718kg\*14.5(加工費)= 24,911 元

⑦ 鋼筋材料： 1,718kg\*35= 60,130 元

複合式單元成本= ⑥ + ⑦ + ⑧ =117,661 元

表 4.1 內骨架成本比較表

工 法	(A)Truss Wall(3m*8m)	(B)複合式結構(3m*8m)	備 註
項目比較			
改變處	574 kg (鋼筋)	466 kg (鋼板)	
主筋重(#6)	1,251 kg	1,251 kg	
單元重量(kg)	1,825 kg	1,718 kg	-107 kg
單元成本(元)	122,373 元	117,661 元	-4,712 元
單元曲牆圖			

資料來源：本研究整理

### 4.3.2 曲牆主體鋼材結構差異性分析比較

曲牆主體鋼材結構分析比較，主要針對替代工法與桁架鋼筋曲牆主體結構差異性比較，從其單元重量組合結構的材料比較，單元曲牆材料的成本分析，單元加工試作工期的比較，曲牆總體結構的總工期與總成本的差異性比較，如表 4.4 所示。

另外就曲牆施工技術的組合精度分析，替代工法因牆體組合勁度高剛性強，故其吊裝穩定性高，單元組裝接合較能控制精度，因此加工製造及現場施工，作業流程快速且能具備模組化加工，故替代工法施工較能保持流暢，如表 4.2 所示。



表 4.2 主體結構鋼材分析比較表

工法 項目比較	(A)Truss Wall(3m*8m)	(B)複合式結構( m*8m)	備 註
單元重量	1,825 kg	1,718 kg ( 鋼板 466 kg )	合計 1,400 單元
曲牆成本	17,132 萬元	16,473 萬元 ( -659 萬元 )	只計算鋼材比較
日/CYCLE	75 日	60 日	工期差異 15 天
總工期	1,620 日	1,440 日	(A)54 個月=1620 日 (B)48 個月=1440 日
單元精度	低	高	曲牆勁度較高
作業流程	繁瑣	正常	較流暢

資料來源：本研究整理

#### 4.4 曲牆結構座標控制點設置方法

曲牆結構是由 3D 區面所構成，利用電腦 3D 圖檔匯出每區塊曲牆設計值，以利曲牆鋼筋籠吊裝觀測。座標作業流程如圖 4.10 所示，而曲牆的座標測點配置如圖示 4.11，及曲牆曲面測點的定位，現場檢測作業方式如圖示 4.12、圖 4.13 所示。

##### 測量方法：

1. 由業主提供細部設計圖計算出放樣點的三維資料。
2. 在放樣點周邊的適當距離內整置兩台全測站經緯儀。
3. 觀測放樣點 (A、B 點) 的三維位置(X, Y, Z)。

##### 平面檢測方法：

1. 第一升層除 A 點或 B 點以外，於其地面投影處測設投影基線，於投影基線的交點整置稜鏡(如圖 C 或 D 點)，檢查 A 點或 B 點之平面座標是否與投影基線上之投影座標相符。
2. 若 A 點與 C 點(或 B 點與 D 點)之相對誤差在容許範圍內，往後之升層可直接測量 A 點或 B 點，以節省施工與測量施作時間。
3. 若 A 點或 B 點於現場施測困難，則以雷射測量十字絲位置。
4. 以垂直儀整置於 C 或 D 點輔助施測，調整正確位置於 A 點或 B 點處。

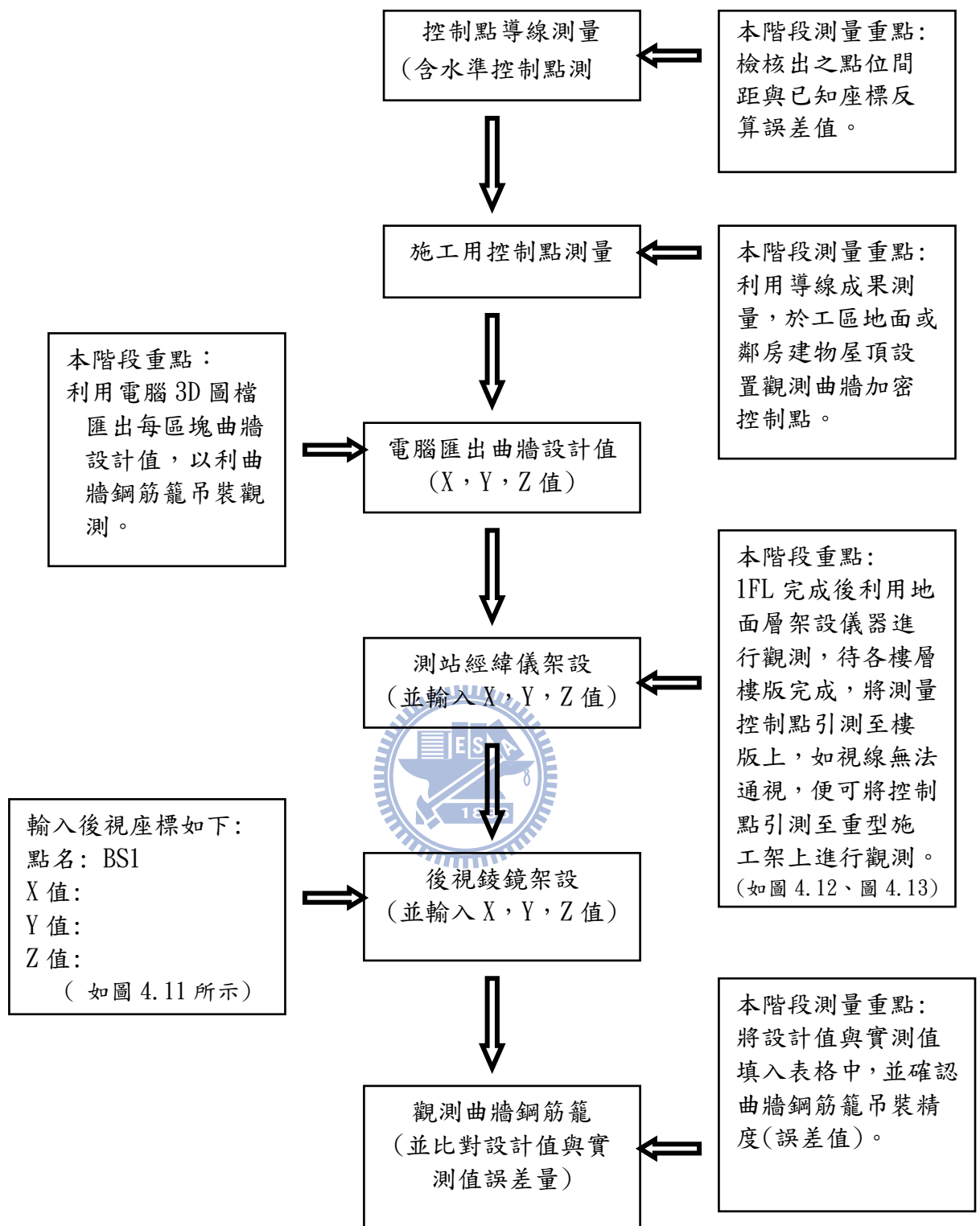


圖 4.10 座標作業流程  
資料來源：本研究整理

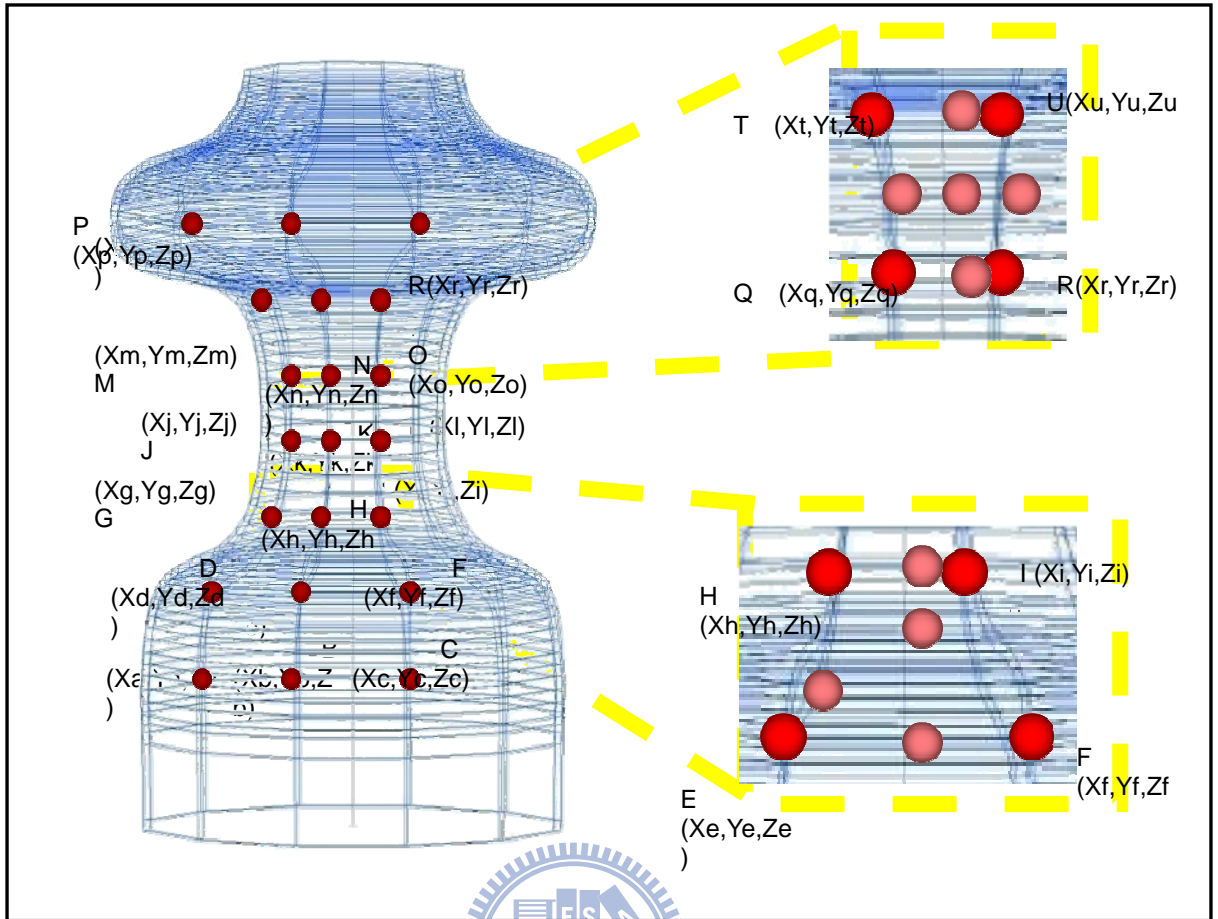


圖 4.11 測量座標圖

資料來源：本研究資料整理

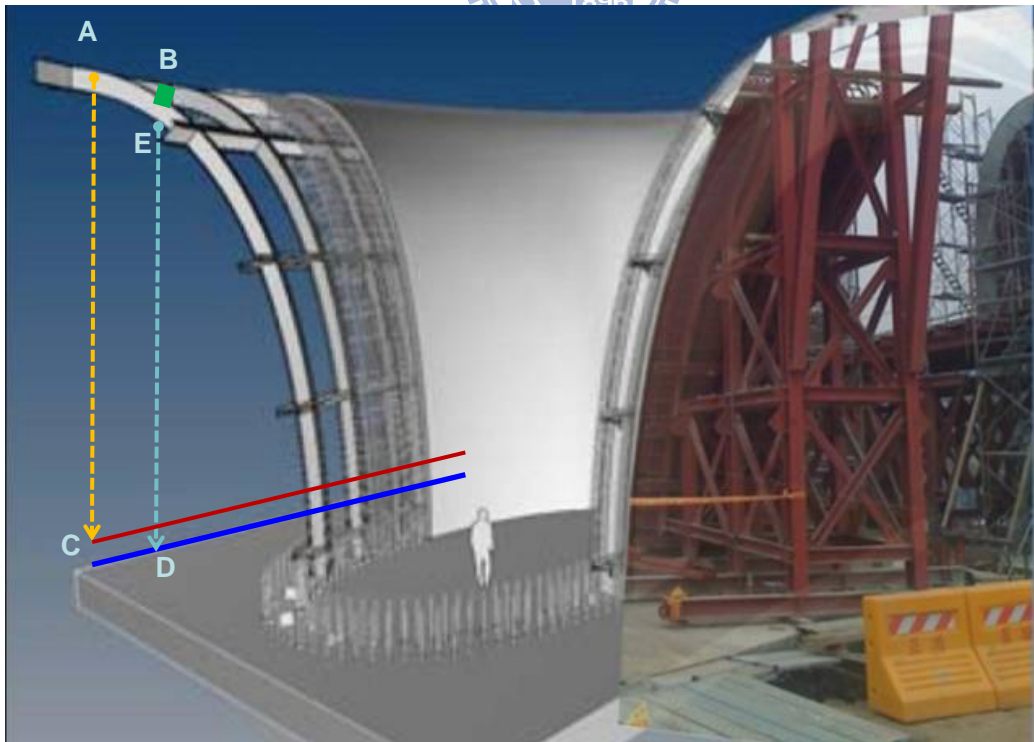


圖 4.12 測量定位圖

資料來源：本研究資料整理

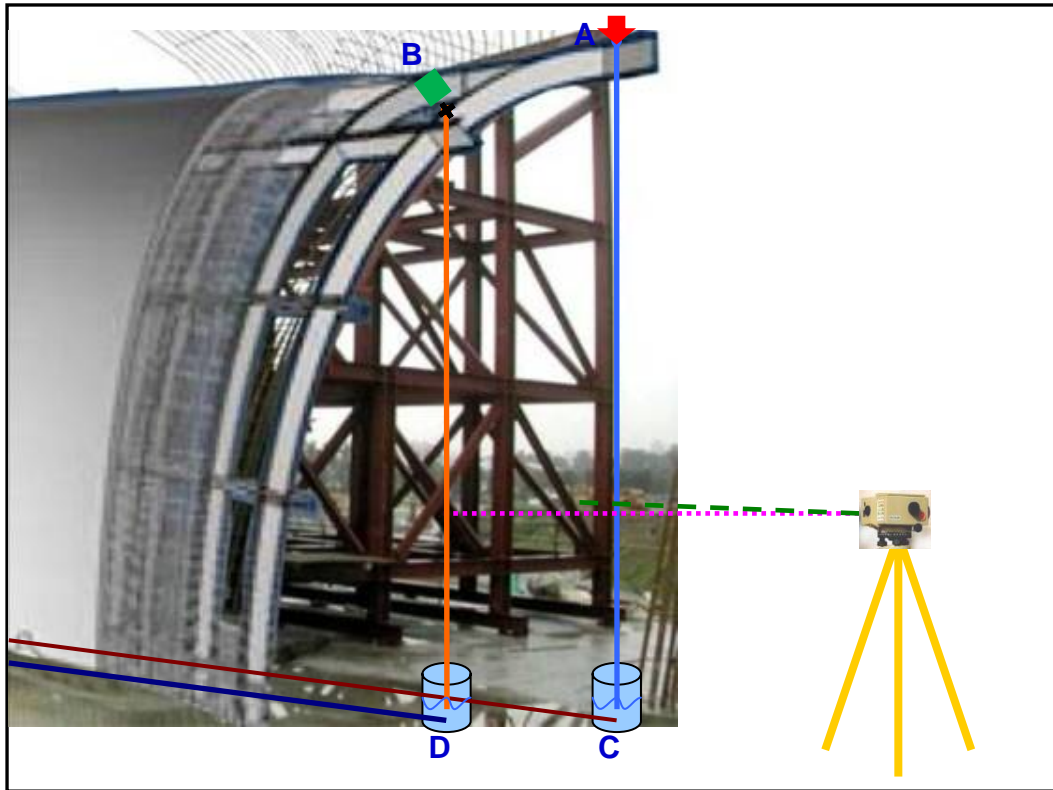


圖 4.13 測量定位圖

資料來源：本研究資料整理

## 4.5 小結

本章節針對單元曲牆施工法、工期、成本，從研究角度作分析，由於桁架鋼筋曲牆施工繁雜，耗工耗時，施工性不佳且品質較不易控制，故如何快速掌握施工性，品質又容易控制下，研究是否能朝系統模組化方向思考，由曲牆桁架鋼筋之內骨架尋求替代鋼材組合。由前述之研究分析比較，單元曲牆之桁架內骨架使用鋼板桁架替代是可行的。分析說明如下：

### 1. 桁架鋼筋結構分析

若只為承受彎矩：則以 2-#3 鋼筋中心間距 22 cm 計算

$$I = \pi r^4 / 4 = 0.04 \quad A = \pi r^2 = 0.71 \quad d = 22 / 2 = 11$$

$$\Sigma I = 2(I + Ad^2) = 15.7 \quad F_Y = 2800 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma = Md / I \rightarrow M = \sigma I / d = 2800 \cdot 15.7 / 11 = 3996.36 \text{ kg-cm}$$

(資料來源：互助營造 2008)

### 2. 複合式鋼板桁架結構分析

提三種薄鋼板其各自的慣性矩計算如下：

$$B=t=0.3 \text{ cm} \quad h=23 \text{ cm} \quad I=bh^3/12=304$$

$$A36 \text{ 鋼容許應力}=0.6F_Y=1500 \text{ kg/cm}^2$$

$$M=\sigma I/d=1500 \times 304 / 11.5=39652 \text{ kg-cm}$$
可代替 9.9 座原 TRUSS，

但因鋼板中間挖孔，可能稍減其強度，應有 7~8 倍。

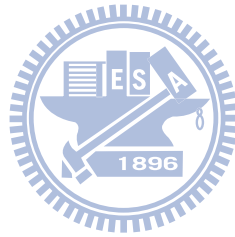
$t=0.6 \text{ cm}$  或  $t=0.9 \text{ cm}$  其強度應為 2、3 倍，可依需求推算之。

原則上薄鋼板怕翻轉翹曲，故橫向固定與斜向固定恐需另外加強。

(資料來源：互助營造 2008)

### 3. 替代工法可行性的確立

複合式鋼板桁架曲牆施工作業可依模組化做單元分割，且能較大面積組合配筋，牆體混凝土澆置可分區循環進行，故工期排程較能掌控，施工性趨簡，則能降低工時減少成本，本研究之替代工法施工可行性高，提供未來相關曲牆結構施工技術規劃之參考。



## 第五章 決策風險評估與分析

### 5.1 工程風險與施工障礙分析

#### 5.1.1 假設工程的風險

本案例之研究除了探討曲牆施工技術的施工困難及提出可行性的替代方案外，對於案例工程的設計規劃開始，在設計階段探討其設計合理性、施工的可行性、3D 技術的障礙、界面關連的管理障礙等等，所衍生的工程承攬風險，特別提出陳述及說明，本節除了前述的分析與建議外，針對相關承攬風險作以下陳述分析：

1. 案例在揚重規畫方面需考慮兩部 200M-T 揚重能量，於基礎版施工時配合設置，由於案例複雜曲牆將阻礙所有水平及垂直動線，故揚重設備繁重，且須設置專責管理人員，協調各工種揚重與施工動線之安排。
2. 案例在曲牆系統採用桁架鋼筋曲牆系統與免拆金屬網施工，牆體支撐系統如何規劃須詳加規劃。本案例探討之實體模型僅 3.5m×8.0m 一單元，並未考慮實際樓層為 7.5m 以上時，如何加作斜撐或配合曲牆所需施作之凹凸牆體之延伸架，而重型架如何安裝於弧形面地板，尚未詳細規劃，故施工危評部分，將是一個潛在風險。
3. 單元曲牆結構是屬於靜不定結構，就如同燈籠或花瓶，當切成數片時，每一單元皆無法自立，必須依靠組合完整之圍束力才能形成一靜定結構。故整體曲牆支撐系統勢必留至同一樓層曲牆結構完成圍束後始可拆除支撐，若考慮裝修進行須再考慮延長拆除時間，因此施工動線空間將是一大挑戰。
4. 曲牆主筋綁紮時所搭設供放置鋼筋用之臨時鋼筋構台，如何與牆體支撐架共用以減少該類假設物之搭設所造成空間動線之衝突，皆為影響工進及成本之重要因素。

#### 5.1.2 影響工期不定因素

本節針對曲牆施工技術的困難與難以掌握的不定性，對於工期的影響提出分析，主要影響工期的因素如，曲牆工率與工作性的確立問題、曲牆單元吊裝施工組裝順暢度，在模型試作中的經驗仍嫌不足、不規則型單元曲牆現場鋼筋施工的困難度、對於曲牆單元分割複雜，所衍生材料不同尺寸、規格的加工供料問題，陳述如下：

1. 曲牆施作工率雖可由模型製作提供初步之參考，但畢竟該模型是在排除場地空間

2. 之限制及排除組合成連續性之鋼筋籠所產生交互重疊作業間之干擾，所得到之工率與工作性仍嫌不足。

面對此一全新之曲牆結構，工期實無法憑藉經驗做精確之規劃，曲牆鋼筋籠之吊裝搭接比連續壁鋼筋籠之吊裝難度增加很多，故需保守估計工期。

3. 曲牆單元接合，仍有許多不規則型曲面接點，需現場組配鋼筋施工難度大。

4. 單元型式複雜且不規則加工尺寸變化大，材料供給時效難以掌控。

## 5.2 施工障礙風險分析

曲牆施工困難所產生的障礙風險，針對案例研究分析，提出相關施工障礙所衍生成工程風險，從檢討設計的合理性分析如，結構材料應用的合理性、設備的多元化複雜性、使用功能對施工上的影響、曲牆支撐結構強度計算確認、曲牆 3D 技術專才與建模單元分割的詳細計劃、施工危險評估計畫、施工界面與動線具體規劃等，綜觀前述各項施工障礙衍生風險提出分析說明：

1. 鋼承板多種型式，最大厚度為 76H\*2.0t，須檢討設計合理性。
2. 結構玻璃及明鏡工程項目繁雜，電梯設備規格數十種型式，曲牆泥作施工不易，空調工程包含觀眾席座椅出風口模擬驗證、協助音響測試費用、系統功能驗證 (Commissioning) 等特殊技術的項目。
3. 重型架之結構計算，人員爬升設備，材料進出動線，針對重型架需事先核算結構進行安全分析，在結構未告一循環的『不穩定結構狀態』，安全上的量相當重要。
4. 依工程開挖深度、模板支撐面積、建物高度等條件來評估，案例似乎不屬需危評工地。但因案例特殊，若被列入需作危評時，如何製作危評報告、危評審核時間長短等將影響施工進度，均是一開工即面臨的困難點。單元分割須進一步詳加檢討可行性分析，3D 曲牆的拆圖分割複雜，即可能產生窒礙難行，影響施工圖面的作業時程。
5. 3D 座標放樣之安排完全須仰賴 3D 解圖來放樣、定座標及複核，以為精度控制之基準，而尋求 3D 技術專業廠商合作，才可能作具體的分割計劃，並事先找出問題點。
6. 機電設備廠商的配合問題，曲牆結構施工前必須及早協調機電設備廠商，針對機電、水電空調、管路及設備、做事前協調與圖面整合。

- (1). 特殊機具設備管線及基座。
  - (2). 特殊空調抽排風管路與出口預留。
  - (3). 地坪機電管路設備及預留開口。
  - (4). 防火消防設備管路及基座。
7. 3D 技術專業繪圖人員缺乏。
- (1). 專業的測量人員、3D 技術繪圖人員、專業進度管控軟體操作人員。
  - (2). 熟練及配合度良好的工班( TRUSS WALL 鋼筋組立工班、金屬免拆模的組裝工班、施工架組裝工班、混凝土澆置工班及泥作工班等 ) 。

### 5.3 合約管理風險對承攬決策的影響

前述第 5.1 節、5.2 節，係針對工程施工困難衍生的假設工程風險，以及因複雜的設計造成施工障礙，影響工期不定因素分析等，做了諸多詳盡的風險評估分析，除了施工風險必須注意外，對於整體承攬工程重要的合約管理，也是影響工程承攬的重要關鍵，本節將針對案例的合約管理影響承攬決策的因素做分析，陳述如下：

#### 1. 工程預算風險

案例係採一次發包，分年編列預算方式辦理，各年度之支付額以審議通過之年度法定預算為限，以後年度所需經費如未獲議會通過或經部份刪減，得依政府採購法第六十四條規定辦理；若當年度預算不足或未奉核定，機關得暫停給付工程款，其不足款於後續年度奉核編列後再予補發，廠商不得異議。如因適逢年度結束，機關為辦理保留預算而延遲付款時，廠商不得提出異議。

#### 2. 未驗收先使用風險

工程未經驗收前，機關因需要使用時（譬如：各型劇場試演、音響功能測試、參觀、紀錄片拍攝…等），廠商不得拒絕。但應由雙方會同使用單位協商認定權利與義務。使用期間因非可歸責於廠商之事由，致遺失或損壞者，應由機關負責。

#### 3. 完工定義不明

案例工程對於工程完工定義不明確，工程界面繁多，平行包應配合事項影響工程完工因素，屬業主應辦事項的部份也是影響完工的重要關鍵，因此完工定義不明確之



下，衍生工程風險因子所在。

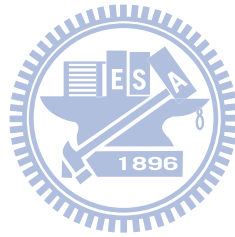
#### 4. 不合理的條款

- (1) 廠商申請當次估驗之數量不符實際，(如申請估驗圖說所載項目之個數列為已施作，而實際未施作)經查證屬實者，廠商同意扣回機關專案管理單位認定超估或逾算款項(於下次估驗時扣除)，並按機關專案管理單位認定超估或逾算款項計罰 5% 之懲罰性違約金。但超估或逾算款項未逾該項目契約金額 2% 者，不在此限。
- (2) 採減價收受者，按不符項目標的之契約價金減價，並處以減價金額 6 倍之違約金。但其屬尺寸不符規定者，減價金額得就尺寸差異部分按契約價金比例計算之；屬工料不符規定者，減價金額得按工料差額計算之。
- (3) 廠商應自備的材料、機具設備，依本契約訂有特殊規格者，廠商於開工後卅日內，租借或訂購，如在市場中無法獲得合於契約中規格的產品時，應在此期限內，以書面向機關提出聲明，經機關查證屬實，得以變更設計方式變更其規格，或以同等品代替使用。廠商未在上開期限內聲明，而在施工時，方提出市場無法供應此等產品聲明時，經機關查證屬實，仍得比照變更設計方式變更其規格，或以同等品代替使用。但應處以該項產品項目契約價格 5% 的罰款。
- (4) 施工期間，廠商方應確實執行各項環境污染防治工作，工地污染防治設施部分需依「營建工程空氣污染防治設施管理辦理」規範設置，包含車行路徑、裸露地面等 80% 以上應設有效抑制粉塵之防制設施，各工地出入口應設置加壓洗車設施以避免污染路面，土方砂石堆置區域需全面進行覆蓋，結構體及上層物料運送等亦需設置有抑制粉塵逸散之設施，不得有造成揚塵之空氣污染情事，如未確實執行，致產生污染情形，經環保機關告發處分者，概由廠商負完全責任；而若因此致機關方遭受環保機關連帶告發處分，該行政罰鍰除應由廠商方負責繳納外，每次並加扣該行政罰鍰金額同額之罰款。
- (5) 廠商應配合機關依政府採購法第 70 條規定設立之各工程施工查核小組辦理查核，查核結果有品質缺失者，對廠商辦理品質缺失懲罰性違約金問題。

### 5.3.1 小結

根據第四章結研擬提出之對策評估與分析，除確立可行性施工法，並針對施工性、工率與工期的評估、不同工法成本的比較分析，獲致替代式工法複合式曲牆(Compound Wall)為可行施工技術，藉由工法技術的改善，提升施工順暢性度，並降低成本與縮短工期。

案例陳述之相關影響決策的風險評估分析，針對曲牆施工計畫，假設工程在案例中的計畫佈置，提升施工效率應考慮的對策，而工程整體施工階段所面臨的風險，包含工期不定因素、不合理的合約條款、施工難度所衍生的成本增加問題…等，都將造成影響承攬決策重要因素。



## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

案例除對 3D 曲牆結構設計詳加陳述外，輔以本研究之實體模型試作，並從試作過程中收集彙整相關經驗數據與施工方法，透過工程實務專業經驗之研析，針對曲牆結構與 3D 繪圖技術之探討，提供有關 3D 桁架鋼筋曲牆施工技術規畫要領與施工困難點之彙整與建議，並就工程潛在風險的剖析加以探討，期能提供營建業界及相關設計施工專業人員，在有關 3D 曲線結構之設計、施工技術上有所助益，更能在營建技術上提升，增加國際競爭力。

### 6.2 研究建議

本研究從 3D 桁架鋼筋曲牆實體模型試作過程中，彙整研析出寶貴經驗，針對曲牆施工技術的規劃操作，從模型實體的試作中，演練出曲牆單元的施工流程，並從試作中獲致可行之施工方案，經審慎檢討評估，提出替代可行的改善方案建議，工業界未來曲牆施工技術規畫參考。茲陳述如下：

#### 1. 3D 圖說條件：

- (1). 必須準備 3D 圖電子檔。
- (2). 在 3D 繪圖軟體操作上，須有足夠且經驗的操作人手。
- (3). 3D 圖說必須具備有鋼筋圖製作、安裝時測量點位與座標設置，供施工後檢核。

#### 2. 界定曲牆與樓版分界：

- (1). 若不界定曲牆與樓版分界，將來施作上會有很大的困擾。
- (2). 以桁架作免拆網模板支撐，在「曲牆」可不必另加外撐，在「版」則需另外加模板支撐。

#### 3. 桁架施工方案：

- (1). 施作工序說明：先製作鋼筋桁架，再組合 10~20 個桁架成為鋼筋籠。
- (2). 日本人製作之桁架鋼筋籠單元約為 2m\*4m。試驗性質、過程比較單純、可能存在的問題並未顯現。

- (3). 「桁架放樣」：桁架有曲度，日本模型施作時以 1：1 的比例，經 AutoCAD 於紙張上「列印」，「裁剪曲線」並於平台上施作。

#### 4. 曲牆接合圖：

- (1). 每個桁架製作時就要將點位標示。
- (2). 組合成鋼筋籠時，要平順。
- (3). 鋼筋籠吊裝時，更要平順。

#### 5. 鋼筋籠搭接方案：

- (1). 搭接問題：日本人製作模型，因只有一座鋼筋籠，故沒有問題。
- (2). 結構圖 2-145/212 中有繪：鋼筋籠與鋼筋籠間是否要搭接，水平若是不需要搭接，鋼筋籠間距多少才算合理。日本人的經驗：只要內外各三片鐵片就可以了，無關鋼筋籠大小、曲度，應再考量。

#### 6. 建議水平搭接方式：

兩鋼筋籠間水平間距保持約 20 cm，搭接時僅以短鋼筋現場焊接，或採(10 $\phi$ -100 cm) 40D+20cm+40D 水平搭接。如此可以保持空間以便於吊裝，減少碰撞。

#### 7. 建議垂直搭接方式：

因為鋼筋籠要支撐鋼筋、免拆網模板重量及有時工人攀爬，所以仍要搭接好才不致變形。建議以短鋼筋現場焊接或採 40D 搭接，但建議接搭接方式與現行鋼筋綁紮方式略異，現行搭接預留筋都以單筋預留但鋼筋籠我比較建議預留端仍以鋼筋籠呈現(水平筋已電焊)，上部鋼筋籠下方才以單筋方式倒插。說明如下：

- (1). 工人爬進爬出及澆置混凝土時，鋼筋籠不易破壞。
- (2). 曲牆在一次又一次昇層中，免拆網模板若有超長也可固定綁住。
- (3). 鋼筋籠水平筋介於(內)鋼筋桁架及(外)垂直主筋之間，搭接時外面的垂直主筋通常已預留上來，若內層鋼筋籠主筋與外層的垂直主筋同時存在，上部鋼筋籠要往下插入及搭接，會很不好作，工率不佳成本就高。

#### 8. 平曲線控制方案：

- (1). 接合要平順。曲牆在平面圖中有曲度，日本模型施作卻以 2D 曲度施作(僅有豎曲線沒有平曲線)，現場施作接合一定不順。
- (2). 構想方法：可調高度裝置，鋼筋籠組合床架一定要設計可調高度裝置。

(3). 桁架製作過程--控制豎曲線。鋼筋籠組合--控制平曲線。

#### 9. 鋼筋籠「測量定位」方案：

- (1). 基牆固定精準，鋼筋與模板也會作的好。
- (2). 鋼筋籠由一片片單元組成，定位問題在施工上會成為最大的困擾。
- (3). 繪製放樣定位圖。
- (4). 測量平台系統。
- (5). 並檢核曲牆是否剛好接合，沒有不足或重疊的現象。

#### 10. 鋼筋綁紮與「置料」方案：

現場綁紮，說明如下：

- (1). 減低鋼筋籠加工場的負擔。
- (2). 減少搭接長度，節省成本。
- (3). 沒有主副筋預留搭接長度的困擾，可增加鋼筋籠吊裝及定位效率。
- (4). 鋼筋籠各單元接合不一定平順，現場綁紮可稍微平緩不順的曲線。

鋼筋籠高度將會高出地版 2m 以上，鋼筋籠需先吊裝及定位，曲牆頂點接合後還不可開始鋼筋綁紮。上層鋼筋籠同預留筋一樣，完成上層鋼筋籠之預留，方能開始綁鋼筋，在曲牆綁鋼筋前所有鋼筋籠已高於樓版。

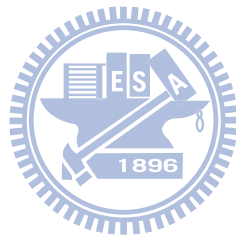
鋼進置料與搬運，鋼筋籠高度若高出地版 2m 以上，那麼鋼筋工在鷹架上施作綁紮，鋼筋如何傳接到定位，尤其是環狀曲牆(無開口) 鋼筋籠完成後，人員進出都要爬上鋼筋籠頂端才能跨越，故如何進出與置料也會是大問題。

設置置物平台及吊架系統，曲牆周邊除了鷹架外，應該還要有重型架，利用重型架頂端設置 H 鋼，架設平台，鋼筋工就有簡易的置料區，配合塔吊可隨時更換平台位置，除了速度快，安全也有保障。

#### 11. 未來研究重點

3D 曲牆結構其特殊造型及功能，施工者必須拋開傳統思維方式進行施工規劃。對 3D 概念及 3D 軟體之熟悉度，是工程進行順暢的關鍵，後續的研究重點在於如何掌握 3D 數位建模，建置施工時用來控制完成曲面的空間座標，並利用模組化及生產線概念，從設計工具面及作業流程規畫中，擬定工法、測量、模組化及界面的整合等，建立一套完整可行的施工計劃。在專案管理工程界面整合套圖，可作為後續專案管理

研究的重點與方向，利用 3D 技術建立空間立體模型的概念，導入專案進度施工節點空間界面整合套圖，針對施工進度的界面管理與進場時間管控，有莫大助益。



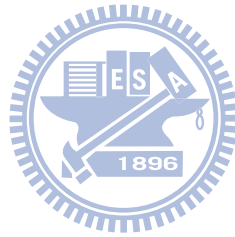
## 中文文獻

1. 大鉅聯合建築師事務所，2008，「台中大都會歌劇院新建工程規劃設計暨技術座談會」。
2. 互助營造，2008，「施工技術支撐鷹架與曲線關係位置研討報告」。
3. 大鉅聯合建築師事務所，2008，「台中歌劇院新建工程施工技術研討簡報」。
4. 互助營造，2008，「台中歌劇院新建工程施工計劃研討簡報」。
5. 互助營造，2008，「高雄世運主場館新建工程施工全記錄報告」。
6. 黃隆茂，楊定良，2002，「3D 技術在高鐵台中車站 S250 標之應用」。
7. 黃隆茂，2001，「以營造角度談 3D 動畫在工程技術上之應用」（上），現代營建，第 259 期，第 41~46 頁。
8. 黃隆茂，2001，「以營造角度談 3D 動畫在工程技術上之應用」（下），現代營建，第 260 期，第 35~40 頁。
9. 大田勝人，2007，「台中歌劇院新建工程結構曲牆實體模型試作報告」，(上) 日本竹中工務店。
10. 園部敏行，2007，「台中歌劇院新建工程結構曲牆實體模型試作報告」，日本竹中工務店。
12. 金田充弘，2007，「台中歌劇院新建工程結構曲牆設計概要報告」，日本竹中工務店。
13. Florian Busch，2007，「台中歌劇院新建工程結構曲牆施工工法指引」，日本竹中工務店。
14. 互助營造，2008，「台中歌劇院新建工程施工計劃研討簡報」，高雄世運主場館新建工程處。
15. 互助營造，2008，「台中歌劇院新建工程施工計劃研討簡報」，施工二部友達七星工程處。
16. 互助營造，2008，「台中歌劇院新建工程施工計劃研討簡報」，后里瑞晶、力晶工程處。
17. 張智棋，2004，「4D 施工計劃資訊管理之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程所。

18. 鄭介旗，2005，「4D 於困難施工對策研擬應用」，碩士論文，國立成功大學土木工程所。
19. Weisdesign，2010，「Solid Man 3D 軟體教學」，Weisdesign 產品設計公司。

## 英文文獻

1. C.A.Cory( 2001), “ Utilization of 2D, 3D or 4D , CAD in Construction Documentation” , IEEE, pp. 219-224 。





附錄一 委員審查意見回應表 (續)

委員	問題與建議	補正與回應	補正處
曾 仁 杰	舉例不同案例工法探討.	針對不同單元分割與模型試作提出工法探討分析.	第三章曲牆 Mock up 試作比較分析. 38-62 頁.
	說明不同案例比較分析.	針對工法、工期、成本，提出對策模擬分析.	第四章替代工法比較分析. 38-62 頁. 67-70 頁.
	論文格式段落修訂整理.	依論文格式章節、段落規定修正補充整理.	第一章 5-6-7 頁, 第二章 10-11, 26-28 頁, 第三章 43-44, 48, 49 頁, 第四章 55, 61, 62 頁, 第五章 67-70 頁.
	圖表目錄編號須一致且不能重複.	圖表編號依章節順序編號，修正重複部份.	目錄圖表編號. 第 vii-ix 頁.
	文獻清單補充.	參考文獻清單補充提列.	參考文獻第 84-85 頁. 17-19 條, 英文文獻. 第 1 條.
	曲牆在投標的地位角色及如何影響.	補充相關曲牆承攬風險與不合理重點與條款影響承攬決策評估.	第五章. 67-71 頁.
	圖表確認來源標註.	補充提列圖表來源標註.	第一章~第四章內文圖表編號. 1-73 頁.
	圖表, 小節標題應補充內容說明.	依審查意見補充圖表, 小節段落內容說明.	26 頁, 55 頁, 62-64 頁.
楊 智 斌	文獻回顧補充內容.	補充 3D 技術及曲牆施工技术相關案例文獻.	第二章 16-36 頁, 文獻清單 76-77 頁.
	圖表須對照解釋說明.	補充圖表內容對應說明.	第二章 2.3-2.4 -2.6.10-2.6.11 第三章 -3.3.1-3.4 節.
	文獻 3D 技術應用內容補充	依委員建議修正補充.	第二章 16-36 頁
謝 孟 勳	案例可補充設計、規劃、施工等，主軸方向說明.	依委員建議修正調整.	第二章 16-36 頁
	案例探討的補充.	依委員建議修正調整.	第二章 16-36 頁

曾 惠 斌	論文主軸論述章節安排調整.	依委員建議修正調整.	第二章 16-36 頁, 第三章與第四章排序對調. 詳 38-62 頁.
	建議第三章與第四章論文排序 Change.	依委員建議修正調整.	第三章與第四章排序對調. 詳 38-62 頁.
	標題及圖表應補充說明.	補充標題內容及圖表說明.	第二章 2.3-2.4 -2.6.10-2.6.11 第三章 -3.3.1-3.4 節.
	文獻參考建議再補充.	依委員建議增補文獻參考.	文獻參考 75-76 頁. 增 17-19 條.

