

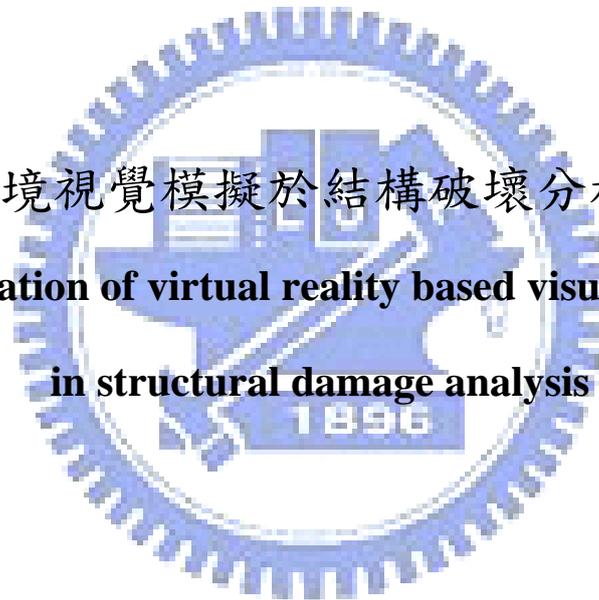
# 國立交通大學

## 土木工程學系

### 碩士論文

虛擬實境視覺模擬於結構破壞分析之應用

**The application of virtual reality based visual simulation  
in structural damage analysis**



研究生：詹雅晶

指導教授：林昌佑 博士

中華民國九十六年八月

虛擬實境視覺模擬於結構破壞分析之應用

**The application of virtual reality based visual simulation  
in structural damage analysis**

研究生：詹雅晶

Student : Ya-Jing Jhan

指導教授：林昌佑博士

Advisor : Dr.Chang-Yu Lin

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fullfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

In

Civil Engineering

August 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年八月

# 虛擬實境視覺模擬於結構破壞分析之應用

學生：詹雅晶

指導教授：林昌佑 博士

國立交通大學土木工程學系(研究所)碩士班

## 摘要

結構物在管理維護階段的結構分析是相當重要且不可忽略的預防性防範措施，而以往判定建築物的安全總是以軟體程式進行分析並呈現數值化，但程式分析的數值結果總是十分龐大且複雜，在非相關專業人員認知上很容易造成解讀不一或判讀困難，無法可靠的傳遞訊息而產生了資訊障礙。為了能讓有關的數值成果以具體的視覺化表現，將分析結果以 3D 方式產生虛擬互動，藉由簡單的表單選取動作即可進行身歷其境的解說與導覽。本研究乃藉由此項發展，以校園建築結構物視覺模型與破壞分析進行探討，建立其虛擬實境並應用。

本研究著重於建築結構物破壞分析視覺化模擬探討。結構破壞的分析為依據非線性靜力分析 (Nonlinear Static Pushover Analysis) 工程軟體 SAP2000 所產生的數值結果為參考，並透過開發系統 Virtools 製作虛擬實境，視覺模擬說明破壞之位置與其所發生的預警作用，以直覺圖形化程式介面讓使用者透過電腦視覺模擬對 3D 空間產生聯想，呈現真實的多樣化虛擬，分享和體驗高互動的 3D 內容，為即時且無空間的限制性，有助於使用者的需求方便讀取與分享應用。

運用本研究模型從事使用管理維護階段預防性防範措施，可以獲得災害發生時的破壞狀況，判定安全等級；並藉由虛擬實境模擬真實狀況，成為知識取向的破壞分析虛擬實境學習系統。

關鍵字：虛擬實境、Virtools、SAP2000

# **The application of virtual reality based visual simulation in structural damage analysis**

Student : Ya-Jing Zhan

Advisor : Dr. Chang-Yu Lin

Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## **Abstract**

Structural analysis is quite an important job for the structure in its administration and maintenance. It's a preventive measure that should never be ignored. In the past, we utilized software analysis to estimate the safety status of a building. These analyses were based on numerical values. However, their results were always enormous and overly complicated, and then confused the non-professionals. Obstacles were produced by such unreliable information transfer. In order to present the relevant numerical values in a detailed and visualized manner, we establish a 3D virtual interaction based on the results of analysis. After a few easy steps of menu selection, we can be on the scene with definitions and navigation. In this study, we are going to discuss the visual models of campus buildings and their damage analysis. A virtual reality model will be established and put into use.

This study tries to discuss the visual simulation of architecture's damage analysis. The damage analysis is based on the results of Nonlinear Static Pushover Analysis, which are generated by SAP2000. A system called Virtools is developed to produce the virtual reality in order to simulate the positions being damaged and warnings. Intuitional graphical user interface associates the users with the 3D space by visual simulation. A variety of virtual reality models can be presented to share the experience of highly interactive 3D content. It's real time and beyond any limit of space. Reading, sharing, and utilizing these data are quite easy.

If we utilize the models of this study as preventive measures in administration and maintenance, it's possible for us to monitor the status of damage during the disasters and determine its safety class. Based on the simulations, we can also construct a learning system for the structural damage analysis.

Keywords: Virtual Reality, Virtools, SAP 2000

## 誌謝

在交大兩年來研究求學過程當中，很感謝恩師昌佑教授在學業上，悉心教誨與栽培及論文研究，耐心指導其研究方向和提供新的研究資訊，擁有良好的研究環境及設備，使論文得以順利完成，師恩浩瀚，學生銘記於心。

同時於論文口試階段，承蒙洪士林和趙文成教授提供寶貴的意見，使得本文更臻完善，在此表達最由衷的謝意。

論文研究及撰寫期間，感謝研究室之友志偉、啟勇、弘毅、秉廷學弟和奕銘學長給予的勉勵與支持，謝謝你們，使得我研究生生活更加豐富絢麗；亦感謝信宏、耀邦、欣晏、志軒、俊成、巍羸、靜云、紀勛這些朋友們在研究生涯的陪伴，輔我成長，更在相互切磋過程中，增進對專業知識的了解。

最後要感謝父母和家人，於我求學期間無微不至的照顧以及關懷，讓我在學業無後顧之憂，進而專心致力於論文的研究。

在此將論文完成的喜悅奉獻給上述提及的師長、朋友及家人，願他們能健康順心，平安快樂。

# 目錄

摘要 .....	I
Abstract .....	II
誌謝 .....	III
目錄 .....	IV
表目錄 .....	VI
圖目錄 .....	VII
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	1
1.3 研究內容 .....	2
1.4 研究方法與流程 .....	3
第二章 研究背景與文獻探討 .....	5
2.1 結構健康監測 .....	5
2.1.1 結構健康監測的理論與定義 .....	6
2.1.2 結構健康監測的目的 .....	7
2.1.3 結構健康自動監測 .....	8
2.2 虛擬實境 .....	10
2.2.1 虛擬實境簡介 .....	10
2.2.2 虛擬實境的三大要素 .....	12
2.3 虛擬實境的硬體設備與相關軟體 .....	13
2.3.1 虛擬實境相關的硬體配備 .....	14
2.3.2 虛擬實境程式語言 .....	15
2.3.3 虛擬實境應用軟體 .....	17
2.3.4 虛擬實境在土木建築的相關應用 .....	17
2.4 電腦輔助視覺模擬 .....	20
2.4.1 電腦輔助視覺模擬之應用 .....	21
2.4.2 視覺模擬應用之步驟 .....	21
第三章 研究說明 .....	23
3.1 工程軟體 SAP2000 簡介 .....	23
3.2 非線性靜力分析簡介 .....	24
3.3 Response-2000 簡介及破壞模式分析 .....	25
3.3.1 Response-2000 介紹 .....	25
3.3.2 破壞模式分析 .....	26

3.4 Auto CAD 軟體簡介 .....	27
3.5 3Ds MAX 簡介 .....	27
3.6 虛擬實境製作軟體 Virtools 簡介 .....	28
3.6.1 前言 .....	28
3.6.2 Virtools 特色 .....	29
3.6.3 Virtools 開發環境與流程架構 .....	30
3.6.4 Virtools 系統需求 .....	31
3.7 立體設備設定 .....	32
3.7.1 立體原理簡介 .....	32
3.7.2 雙投影機立體設備校正與設定 .....	33
3.7.3 Virtools Stereo Pack 及立體檔案製作 .....	33
3.7.4 立體播放設定 .....	33
第四章 研究與成果 .....	35
4.1 研究範例與分析限制 .....	35
4.2 校園結構破壞分析 .....	36
4.2.1 SAP2000 非線性靜力分析 .....	36
4.2.2 Response 2000 斷面性質分析 .....	38
4.2.3 結構物破壞分析與成果 .....	38
4.3 結構破壞模擬設計 .....	40
4.4 虛擬實境場景的邏輯編輯與互動設定 .....	41
4.4.1 模擬製作流程 .....	41
4.4.2 將研究結果轉為 3D 的互動內容—利用 Virtools 3D/VR 編輯工具 .....	46
4.5 結果呈現 .....	50
4.5.1 操作介面設定 .....	50
4.5.2 立體設備設定 .....	51
4.6 小結 .....	51
第五章 結論與建議 .....	52
5.1 結論 .....	52
5.2 建議 .....	52
參考文獻 .....	54

## 表目錄

表 4.1 柱之斷面尺寸及配筋情形(交通大學-工程二館).....57



## 圖目錄

圖 1.1	研究流程圖 .....	58
圖 2.1	頭盔式顯示器 .....	59
圖 2.2	力回饋搖桿及控制臂 .....	59
圖 2.3	3D 滑鼠 .....	59
圖 2.4	偏光式立體眼鏡 .....	60
圖 2.5	液晶鏡片的有線眼鏡 .....	60
圖 2.6	NIST 之火災研究廠污染控制系統虛擬實境模擬 .....	60
圖 2.7	公路漫遊模擬虛擬系統 .....	61
圖 2.8	用 VRML 之 Web 3D GIS 立體建物管理系統 .....	62
圖 2.9	浦東地區城市規劃的模擬應用 .....	62
圖 3.1	SAP2000 程式之預設結構模型 .....	63
圖 3.2	基底剪力-頂層位移曲線 .....	63
圖 3.3	平面設計圖 .....	64
圖 3.4	室內設計裝潢配置圖 .....	65
圖 3.5	大樓外觀立面圖 .....	65
圖 3.6	工業模具圖 .....	66
圖 3.7	3Ds MAX—空間與燈光應用 (1) .....	66
圖 3.8	3Ds MAX—空間與燈光應用 (2) .....	67
圖 3.9	3Ds MAX 建築外觀—未貼覆材質與彩現 .....	67
圖 3.10	3Ds MAX 建築外觀—貼覆材質與彩現 .....	68
圖 3.11	3Ds MAX—空間機能配置 .....	68
圖 3.12	Arup 公司規劃 30 英里的高速公路及 3.1 英里的 Tappan Zee 大橋 .....	69
圖 3.13	Virtools 開發環境 .....	69
圖 3.14	Virtools 開發流程架構圖 .....	70
圖 3.15	Virtools 編寫互動介面 .....	70
圖 3.16	Virtools 邏輯編輯腳本 .....	71
圖 3.17	Virtools 互動體驗呈現 .....	71
圖 3.18	立體設備架設示意圖 .....	72
圖 3.19	雙投影機校正順序(1) .....	73
圖 3.20	雙投影機校正(2) .....	73
圖 3.21	校正圖型 .....	74

圖 3.22	載入 Virtools 立體模組 .....	74
圖 3.23	載入 Stereo Camera.nmo .....	75
圖 3.24	N-View 顯示設為水平擴展 .....	75
圖 3.25	PC 的解析度 .....	76
圖 3.26	設定全螢幕單一畫面解析度 .....	76
圖 3.27	全螢幕播放設為 2048 x 768 .....	76
圖 4.1	交通大學-工程二館之建築全景 .....	77
圖 4.2	交通大學-工程二館之建築平面圖 .....	77
圖 4.3	交通大學-工程二館之建築立面圖 .....	78
圖 4.4	柱編號對照之平面圖 .....	78
圖 4.5	SAP2000 程式建立模型 .....	79
圖 4.6	SAP2000 程式建立塑鉸 .....	79
圖 4.7	彎矩與剪力破壞塑鉸建立位置 .....	80
圖 4.8	Response-2000 斷面資料設立完成圖 .....	80
圖 4.9	斷面彎矩—曲率的關係圖 .....	81
圖 4.10	斷面剪力—位移的關係圖 .....	81
圖 4.11	Pushover X 方向分析塑鉸產生模型 .....	82
圖 4.12	Pushover Y 方向分析塑鉸產生模型 .....	82
圖 4.13	Y 方向推覆分析塑鉸位置圖 .....	83
圖 4.14	Pushover 容量曲線圖 .....	83
圖 4.15	第一階段塑鉸產生位置—藍點 .....	84
圖 4.16	第一階段容量曲線圖—藍點 .....	84
圖 4.17	第二階段塑鉸產生位置—綠點 .....	85
圖 4.18	第二階段容量曲線圖—綠點 .....	85
圖 4.19	第三階段塑鉸產生位置—黃點 .....	86
圖 4.20	第三階段容量曲線圖—黃點 .....	86
圖 4.21	第四階段塑鉸產生位置—紅點 .....	87
圖 4.22	第四階段容量曲線圖—紅點 .....	87
圖 4.23	模擬製作流程圖 .....	88
圖 4.24	工程二館平面圖 .....	88
圖 4.25	設定對應單位 .....	89
圖 4.26	Auto CAD 匯入 3Ds MAX .....	89
圖 4.27	設定群組 .....	90
圖 4.28	凍結平面圖 .....	90
圖 4.29	3D 工程二館繪製—柱 (2D 平面拖曳) .....	91

圖 4.30	3D 工程二館繪製一柱 (取消勾選 Start New Shape)	91
圖 4.31	3D 工程二館繪製一柱 (擠出所需高度)	92
圖 4.32	3D 工程二館繪製一柱 (完成)	92
圖 4.33	3D 工程二館繪製一梁 (移動)	93
圖 4.34	3D 工程二館繪製一牆 (牆物件指令)	93
圖 4.35	3D 工程二館繪製一牆 (完成)	94
圖 4.36	3D 工程二館繪製一門 (門物件指令)	94
圖 4.37	3D 工程二館繪製一窗 (窗物件指令)	95
圖 4.38	3D 工程二館繪製一門窗 (完成)	95
圖 4.39	3D 工程二館繪製一貼覆材質設定	96
圖 4.40	3D 工程二館繪製一貼覆材質	96
圖 4.41	3D 工程二館繪製一景觀配置	97
圖 4.42	3D 工程二館全景一正向圖	97
圖 4.43	3D 工程二館全景一右向圖	98
圖 4.44	3D 工程二館全景一背向圖	98
圖 4.45	3D 工程二館全景一左向圖	99
圖 4.46	3D 工程二館全景一俯視圖	99
圖 4.47	Virtools Interface ( Version 4.0 )	100
圖 4.48	建築物及場景模型存成.nmo 的檔案	100
圖 4.49	匯出.nmo 場景檔案	101
圖 4.50	未調整時的狀態	101
圖 4.51	視野、距離及角度設定	101
圖 4.52	視野、距離及角度調整後結果	102
圖 4.53	新增三個點光源 Point Light	102
圖 4.54	平面 3D 物件	102
圖 4.55	位置與 Scale 大小的設定	103
圖 4.56	材質貼圖	103
圖 4.57	材質貼圖成果	103
圖 4.58	十字貼圖法將樹木物件單獨儲存成個別的.nmo 檔	104
圖 4.59	樹木物件的.nmo 匯入到編輯場景並複製	104
圖 4.60	草坪、樹木完成模型	104
圖 4.61	Camera 3D frame 腳本視窗	105
圖 4.62	腳本邏輯一滑鼠控制 Camera 方向	105
圖 4.63	腳本邏輯一跟隨速度	105
圖 4.64	腳本邏輯一攝影機行進方向	105
圖 4.65	碰撞的 3D 物件 Group	106
圖 4.66	腳本邏輯一碰撞設定	106

圖 4.67	2D Frame 圖文資訊.....	106
圖 4.68	腳本邏輯－滑鼠點選物件.....	107
圖 4.69	腳本邏輯－物件加入個別的 Group.....	107
圖 4.70	腳本邏輯－2D 文字與 2D Frame 貼圖.....	107
圖 4.71	腳本邏輯－2D Frame 顏色設定.....	108
圖 4.72	2D 資訊互動.....	108
圖 4.73	腳本邏輯－貼圖.....	108
圖 4.74	製作天空效果.....	109
圖 4.75	Virtools 互動作品成果 (1)－外觀.....	109
圖 4.76	Virtools 互動作品成果 (2)－內部.....	110
圖 4.77	Virtools 互動作品成果 (3)－內部.....	110
圖 4.78	Virtools 互動作品成果 (4)－整體外觀.....	111
圖 4.79	重疊的影像.....	111



# 第一章 緒論

現今資訊科技的發展一日千里，在時代變遷日新月異之際，單純的工程專業知識與應用已不足以應付與滿足今日知識蓬勃的現況。許多專業工程分析表現還是必須有其他的輔助技術相結合應用，透過一些大眾化可接受的表達方式讓未具備專業技術領域的使用者可以輕易上手與瞭解。例如在土木工程領域內，如何維護建築物結構安全上的穩定狀態始終是一項重要的課題，當然這在土木工程方面有許多的專業軟體可以進行分析與探討，但是探討完後怎樣去表現分析後的數據與結果，或讓不熟悉此方面的非專業使用者去瞭解與應用，卻是一大難題，更何況判定建築物的穩定狀態總是以軟體程式進行分析並呈現數值化，而程式分析的數值結果卻是十分龐大且複雜，若是讓不熟悉這方面技術的人員去鑽研其中的相關資訊，以期達到全盤面的瞭解，勢必會花費更多的時間與浪費更多的資源，也不一定可以達到相當的效果。尤其非相關專業人員應用軟體程式分析數值更是容易造成認知上的解讀不一或判讀困難，無法正確可靠的傳遞訊息而產生錯誤，而人為因素造成的錯誤後果更是不容小覷，也並非緊急補救即可挽回。

## 1.1 研究動機

為了避免上述情形的發生，而產生不可彌補的憾事，將工程結合其他功效，運用大眾可容易接受的方式，將工程專業的分析結果簡單易懂地表現出來，有效地幫助吸收、分享、瞭解與應用。

## 1.2 研究目的

為了將繁雜與專業的內容簡單清楚的表現出來，本研究透過具體的視覺化表現來呈現相關專業軟體分析出的數值成果，將分析結果以 3D 方式產生虛擬互動為一種可行的表現方法，藉由虛擬實境與簡單的表單選取動作即可進行身歷其境

的解說與導覽。讓使用者透過電腦視覺模擬介面對情境化空間產生正確與真實之聯想，提昇傳統溝通方式的效益，有助於幫助使用者瞭解與應用。而在虛擬實境中，使用者可變成場景中主動的角色，自行主導想要學習與使用的內容，讓原本單純的被動接收轉為積極的主動學習，使其易於達到事半功倍的效果。

### 1.3 研究內容

由於台灣位於地震帶，迫使人民的生命財產安全總是暴露在危險的狀態中，隨即而來的常會因不知自己是否處於某種程度危險的環境下，又缺乏冷靜判斷的能力，忽略緊急防範措施的補救機會而產生憾事。為了確保建築結構物因承受任何不可預測的外力時，能即時判斷其安全性，以期將可能會發生的災害減至最低，達到保障人民生命財產安全之目的，故建立一套可靠且準確的建築結構物破壞分析系統為當務之急，這套結構破壞分析系統必須能自動監測其災害發生後之狀態，並主動顯示其受損或穩定情況，使管理人員能夠迅速獲得監測資料，監控維護結構物安全等級，並對監測狀況做出最適當的反應措施，以確保建築物的安全，減少二次災害與不必要的損失。而結構破壞分析系統最重要為，監測到災害可能發生的先兆，迅速處理研判並將確實訊息傳佈，以爭取因應時間達成主動安全及預警防災的目標。

另外由於建築結構體量龐大，自由度繁多，對於建築結構物穩定狀態的監測，若普設感測器來進行監測，其量測結果雖較為可靠，但所要花費的監測設備成本以及繁雜的佈線維護成本也會相對提高。為了避免上述條件因素所帶來的安全與成本上的考量與顧慮，本論文乃研究建築結構物在完工後的管理維護階段內進行結構破壞分析，並將研究分析完後的結果套用至虛擬實境情境內，進行視覺化模擬探討，希望藉著虛擬實境的應用來表現出一些文字或圖片無法表達的部份，讓使用者能夠迅速獲得其相關資料，做出最適當的危機處理。

## 1.4 研究方法與流程

本研究著重於建築結構物破壞分析模擬評估，以國立交通大學工程二館(土木工程館)為例進行分析探討，首先利用 SAP2000 進行非線性靜力推覆分析 (Nonlinear Static Pushover analysis)，找出結構體較脆弱的環節，可於適當位置擺放適合的自動監測儀，此方式不僅有效率監控結構狀態在穩定安全範圍內，立即針對弱點位置進行補強與修復，更可降低監測系統的設置成本，避免普設監測儀器提高設備及維護的成本，作為管理維護階段長期監測建築物的健康安全管

理。並藉由開發系統 Virtools 作校園視覺景觀模擬，利用虛擬實境的視覺化模擬說明結構體破壞的依序位置、監測儀適合放置之位置與其所發生的作用，將分析位置利用模型表現其真實感，提供維護管理人員能迅速了解位置所在，以此判斷結構物安全等級，使相關的分析結果能被非相關專業工程領域易於吸收與應用。

本研究相關流程詳述如下，研究流程圖可參閱圖 1.1。

### 1. 確立研究目的

說明研究動機、目的，界定研究範圍與研究方法及架構。

### 2. 研究背景與文獻探討

探討國內相關論文獻與期刊論文，以深入瞭解有關結構監測與破壞分析、虛擬實境、電腦輔助視覺化模擬與設計……等等之相關整合。

### 3. 研究說明

介紹本研究所應用到的相關工程軟體程式。包含結構破壞分析模擬評估所使用到的 SAP2000 程式和破壞模式分析的 Response-2000 程式，以及建構虛擬實境視覺模擬系統中所使用的 Auto CAD、3Ds Max 和開發系統 Virtools 3D/VR 相關軟體，利用上述相關軟體的背景探討作為本文研究應用的基礎。

### 4. 研究與成果

本章節分為兩部份，為結構破壞模擬評估及虛擬實境視覺化模擬應用。

其中結構破壞模擬評估為應用工程軟體 SAP2000 進行非線性靜力推覆分析 (Nonlinear Static Pushover Analysis) 來尋找整體結構物中受到任何外力時，塑鉸形成的先後順序及判斷整體結構物安全與否的關鍵位置。且利用 Response-2000 程式預先計算出鋼筋混凝土柱斷面的極限彎矩與極限剪力強度，並以此判斷柱為何種破壞模式。其結構破壞分析範例為國立交通大學工程二館(土木工程館)進行評估，可分析出柱斷面破壞的順序及預警的關鍵位置，作為後續虛擬實境分析應用的資料。

另一部份虛擬實境視覺化模擬為應用開發系統 Virtools 將校園實際景觀導入虛擬實境中，校園景觀模型則是以 Auto CAD、3Ds Max 建構而成。將整個校園結構破壞塑鉸形成的位置及相關資料帶入所建構好的虛擬實境中，實際體驗模擬點的分佈與運作情形。

## 5. 討論與建議

本章整理本研究相關的貢獻及研究討論，並說明與建議未來可繼續研究發展的方向。



## 第二章 研究背景與文獻探討

台灣的建築物卻面臨地震、颱風或其他不可抗拒的外力因素，使得再堅固的建築結構物均有被摧毀破壞的可能，更何況目前建設繁多且日趨複雜，所以必須有著保障安全、提供使用者適合的機能品質等種種使命，當然絕對不允許有任何地方的差池偏廢。一般建築結構物在「工程規劃設計階段」的生命週期內，各種荷重的組合均是經過精密的計算與考慮而設，若是在「施工階段」亦能依據法規與設計圖說確實施工，並對環境與品質有所掌握的話，其結構理當是安全無虞的。為祈使每一階段的工程都能面面俱到，在生命週期最後的「運作及管理維護階段」更是不容忽視，尤其結構物經過長時間的營運服務，亦有可能會因為活載重的額外添加或使用期間過久而有疲勞老化現象發生，故有專屬的結構破壞分析系統，負責監控與維護結構物的安全與正常使用，是保障使用者生命財產的一大重要課題。

但在非具有相關領域的工程人員將分析結果進行運作及管理維護階段應用時，會因為不熟悉、不瞭解分析的數據、位置或損壞程度等所代表的意義，而喪失最佳搶救的黃金時機，但若將上述分析的資料以視覺化表現出來，藉由電腦輔助視覺模擬來呈現結構分析的結果，並以虛擬實境情境化的空間讓使用者進行身歷其境的互動操作與體驗模擬，相信在表現相關的研究成果方面，必有事半功倍的效果。

本章節即針對以上相關文獻進行分析彙整，並對當土木建築遇上資訊時代，虛擬實境與電腦輔助視覺模擬的應用方面加以討論，主要探討研究方向可分為以下三大部份：(一) 結構健康監測 (二) 虛擬實境 (三) 電腦輔助視覺模擬，並針對此三大部份作相關的研究與說明。

### 2.1 結構健康監測

### 2.1.1 結構健康監測的理論與定義

建築結構物經長時間使用，結構桿件會日趨老化，或是結構受外力作用引起的動態反應，如：加速度、位移.....等，除了會造成嚴重的生命財產損失外，亦會造成結構物本身嚴重的損毀，而降低其安全性甚或喪失其應有的機能，影響層面極大。尤其是近年來地震的衝擊，如何診斷該結構系統，評估其健康狀態、損壞程度及損壞位置，並建立完善的監測與預警系統，及早察覺結構的缺陷，規劃設計結構補強或補救策略，避免結構持續擴大惡化與二次傷害，實為目前最重要的課題。

結構健康監測（Structural health monitoring, SHM）為監測到災害可能將會發生的先兆，迅速處理分析研判並確實將訊息傳佈，以爭取應變的時間來達成主動安全及預警防災的目標。災害的發生乍看之下多為瞬間發生，但無論環境、大地或房屋，多多少少都會事先發生一些徵兆和警訊，因此適量的健康監測系統乃為安全防護的重要防線。有鑑於預防重於事後的補救，必須嚴格要求確實掌握環境變化之趨勢，並能提出改善補強措施的建議。目前國內外的學者對結構健康監測的定義各有不同，但內容不外乎都是以安全目標為健康監測的前提，例如如何有效的監控、可靠的資料分析、合理資料的解釋與正確的決策等，均是期望早期預警發現結構物異常，避免更大的損失，增加安全度為重要目的。國外學者 Park.G 等[1]說明「結構健康監測也可稱為結構破壞性檢測或者診斷，這概念是運用結構上的量測來決定一個結構狀態的完整性或是說明其結構物狀態。」；

Ettouney,M.M.等[2]提出「結構健康監測為可在任何結構中檢測出損害的層級和損害的位置」；Farrar,C.R.等[3]說明「結構健康監測最佳的執行策略為結構破壞診斷」；Inaudi,D. [4]說明「結構健康監測對土木工程而言是最強大的管理工具之一」；Barrish,R.A. 等[5]亦說明「結構健康監測在土木工程常被認為是量測或掌握一個架構的營運和環境負載的方法，用以檢測評估結構系統異常、退化或

損壞可能在服務期間或對安全可靠性的影響。」；國內學者張國鎮等[6]提及「土木建築物，例如橋樑、建築物、大壩等，由於材料的老化、風化、超載、缺乏適當的維修保護，或是施工設計本身之問題，及地震所造成之損壞，或是其使用狀態之情形，皆有必要長期性監測結構材料瀕臨損壞或監測結構體的損傷，利用智能控制的診斷警示系統以警示結構體的損傷狀態。」；黃吉賢等[7]指出「監測系統可隨時檢驗結構物的健康狀態，並於危急時主動發出警告訊息，讓使用者有足夠的反應時間，以確保民眾生命財產安全。」中國文化大學余蔚莉[8]研究將「結構狀態監測」建議定義為：『運用監測儀器在建築物結構上自動量測所得之參數，來決定建築物結構狀態是否具有危害性或處於衰退老化現象。其重要監測參數包含位置（變位）、變形、傾斜、沉陷、應變、應力、壓力、加速度及振動、溫度及環境因子。』雖然上述之定義略有不同，但最終的意義還是在為利用長時間持續的監測，可以幫助工程師或使用者瞭解建築物目前階段所發生的狀況，並可以依照這些狀況作需要的保護措施，以保護結構物的安全。將結構狀態監測暨災害防治之應用上，藉由對感測原理之熟悉，進而適當且有效選用感測裝置，達到對大型結構物及機具監測及預警之目的。

### 2.1.2 結構健康監測的目的

台北市政府捷運工程局「標準技術規範」中列舉監測目的如下：

1. 監測之目的為監測各種移動、載重、應力、結構構件之應變、土壤與岩石中孔隙水壓力之變化，以提供可靠資料，俾預先得知問題並預測結構不穩定及地盤移動之範圍。
2. 監測儀器係用以提供早期資料，使承包商能適時採取措施，使用適當之補救方法，防止結構設備及公共管線受損。

黃南輝[9]說明監測的目的當然不只是為了安全，許多監測儀器是為了獲得

基本的設計參數，或者為了結構體的行為而設置，如長期水位觀測井、地震儀、裂縫計、傾斜計等，而其中監測儀器之數量、監測位置、量測頻率、安裝示意圖以及各個監測的管理值等，皆需要依循相關規範。例如欲進行結構監測或檢測，瞭解構體受力產生形變情況，最直接的定量方式為於結構體表面或內部裝設應變感測計，故應變感測計可視為結構及橋梁監測系統基本感測器。應變量化常可應用量測兩點間之位移，除以兩點間原距離得到，因此量測位移之方式皆可引用為應變量測。有些監測儀器是為了提升工程技術而設置，而技術的提升是促進未來工程安全的不二法門。

健康監測不只在施工過程中備受重視，在災變的後續作業更是重要，除了鑑定災變的原因需要借助於監測資料外，所有的應變及復舊措施都要利用監測以確定其成效，並根據監測結果不斷的修正設計，以達到最佳化的設計。

### 2.1.3 結構健康自動監測

近年來由於國內社會環境變遷劇烈，國內營建業亦面臨勞工短缺、公安及環保意識高漲的問題，有鑑於此，發展應用自動化技術乃必然之趨勢。監測可以說是一切工程及未來相關研究領域發展的基礎，如在施工中的安全監測，它不只防止意外災害的發生，更可作為後續現場實測資料的研究發展。而目前現況的監測作業相當耗費人力，又兼具有及時維修的特性，監測儀器亦必須適應環境與功能之要求，使得自動化監測儀器的推廣應用上面臨相當大的瓶頸與困難。目前國內使用的監測儀器通常自國外引進居多，本土化的監測儀器發展空間又受限太多，但外國的監測儀器也不一定適合國內環境變化使用，不僅維修不易，價格也昂貴，目前現今國內電腦技術及通訊科技上的發達，不論在量測技術、無線通訊技術、感測裝置及結構可靠度評估等各方面，都已發展地相當成熟，只要能適當地整合，相信落實於工程實務之應用必定有一番可觀的發展。

結構健康自動監測主要為監測建築物主體各種結構狀態，監測建築結構狀態

是否超出安全範圍之現象，經由防災警示系統將訊號連接至監視系統，以便進行長期監視紀錄。在電腦監測結構設施，以提高環境安全並防止災害損失。對於先兆的訊號取得，有賴感測技術，研判及傳佈則可利用電腦的分析及網路的傳輸提高效益。況且監測作業的自動化在電腦科技突飛猛進的當下，必定有相當的成就，例如許多儀器，如：支撐荷重計、水壓計等等，已經可以作連續性的自動監測了，並且可透過網路直接將數據輸入電腦。有些儀器可以半自動化，即是以人工量測，再以電子儀直接將數據儲存在記憶體內，相信之後以無線電傳輸數據的觀念將會更普及。

黃南輝[9]說明理想的預警系統需包含的功能：1. 主從架構容許共享。2. 自動比對及發出預警。3. 關聯相關資訊。而相關資料包括有儀器配置圖、剖面圖、建物及管線資料等，這些相關資料對災變的處理相當有幫助，並盡可能以圖示方式表示，甚至錄音及語言皆可以納入之。預警的發佈方式也必須傳達迅速，以避免因時間拖延而產生憾事。大部分監測預警與診斷技術，皆需大量且穩定的感測器提供適當資訊，作為分析評估的依據，現今國內亟需研發可靠性與穩定性高的監測量測技術與系統，平時可監測結構體之使用情形，更可於水災、風災、地震等災害來臨時或災害發生後，做持續且即時之監測，以供工程管理相關單位評估結構體之安全。故建立一個專業的監測資訊網及預警系統實為當務之急。

本研究乃是利用結構分析來判斷待測物是否處於正常的狀態。依序分析出整體結構受外力作用時，塑鉸形成的順序，並找出當達到耐震容量時，當下發生的塑鉸為哪根柱，藉此關鍵的柱位，來判定整體結構物是否還在安全範圍內或是已經超過安全管理值，以便進行下一步的緊急應變措施，強制驅離或結構補強等。此預警為預知保養維護工作，須賴有效的安全監測手法，以期發現早期的異常現象，早日進行修繕的工作，提供建築物使用者一個安全舒適的工作場合或居住環境。

## 2.2 虛擬實境

近年來虛擬實境為一當前的熱門話題，我們可以看到多關於虛擬實境的話題與報導，此現象正代表著它對人類的衝擊與影響視與日俱增。它提供人類與電腦的溝通的介面，亦提供了互動的媒介，帶領人類進入一個嶄新多樣化的仿真世界，利用無窮的想像力滿足了我們有限的感官能力，應用虛擬實境的技術將環境、空間、人類緊緊連接在一起。以下本節將探討虛擬實境的發展技術與應用。

### 2.2.1 虛擬實境簡介

虛擬實境 (Virtual Reality, VR) 為電腦利用電腦繪圖或影像合成技術並結合聲音處理所模擬建構的虛擬世界，能充分模擬人類的感知，使人類浸遊其中而能夠擁有近乎真實的體驗。由電腦硬體及軟體所模擬出類似真實情境，使用者不用在真實情境中，卻可以隨時掌握真實狀況。藉由特殊電腦圖像及時空模擬所產生三度空間，人不再是螢幕畫面中被動的接收者，是可以主動的前進掌握虛擬實境的特徵。概念是整合人與電腦模擬出的 3D 虛擬環境，透過這種人機介面所提供各種感官即時模擬和互動，讓使用者有身歷其境的感覺。凡是一切結合電腦系統週邊的軟硬體，如網際網路、顯示器、資料庫、3D 繪圖軟體、數位手套、立體眼鏡……等，用來表現現實生活中物件真實的場景或是一個想像未來的空間世界，都可稱之為虛擬實境。

近年來資訊的崛起，以及網際網路 (Internet) 快速的發展，讓資訊的傳達方式徹底得改變，使人們接受訊息與相關知識的方式也隨之起了變化。現今虛擬實境是一項熱門的話題。虛擬實境的概念，起源於電腦圖學之父——Ivan E. Sutherland，他在西元 1965 年提出「The Ultimate Display」的概念，而這種概念正是現今虛擬實境的技術人員所努力以達成的理想。在那個年代，"The Ultimate Display" 還只是一種概念，但對今日虛擬實境的研究及實際應用能有長足發展有

很大的貢獻與影響。

虛擬實境意思就是在一個無中生有的環境裡，但是卻讓人覺得跟真實環境一樣，事實上虛擬實境就是一種幻覺，而這種幻覺是由電腦所模擬出來的，經由我們的感官產生一種難以分辨真假的感覺。換言之，即是模擬現實中可能存在的場景，利用電腦繪圖或是影像合成技術並結合自己的五官感應來建構此虛擬世界，藉此引起使用者的共鳴。例如在虛擬實境系統的環境中，戴上頭盔顯示器，手握3D滑鼠或感應手套等設備，即可盡情的於虛擬世界中遊走張望，並且控制或觸及物件；而此時間，系統將根據使用者所表現出來的行動，由設備上的感應器接收訊息並傳至系統中作運算處理，以即時更新顯示畫面或反應你的行為，如此樣的循環達到人機介面的互動性。

由功能特性的觀點來描述虛擬實境，它可以說是由3D電腦繪圖(3D computer graphics)、3D音效與其它感知介面，所造成的一個模擬環境，並以此創造出一個擬真的虛擬世界。虛擬實境可以定義為一個高階的使用者介面，這個介面包含了透過人類多重感知的管道來達到即時的模擬與互動之能力。這裡所指的即時性的互動意味著電腦可以隨時感知、偵測使用者在虛擬環境中的活動，而即時作出適當的反應與回饋；而這即時性互動的能力伴隨而來的是讓使用者有融入在整個模擬的虛擬環境中的感覺。除了視覺外，虛擬實境還更應融入其他感知的通道，使得使用者能以觸覺、嗅覺、聽覺等和虛擬環境作互動。

虛擬實境的效果主要在完成一項工作或創造經驗的環境。可分「操作的效果」與「經驗的效果」兩方面。操作的虛擬實境系統(operational VR system)提供一個特殊用途的人的感知與肌力系統之電腦界面，使使用者能夠執行操作；經驗的虛擬實境系統(experiential VR system)具有如同電影導演能夠激起觀眾情緒般的效果，能讓使用者專注於環境中而獲得平常不容易獲致的經驗，可說是一種藝術型態。另外虛擬實境又分為虛擬世界與虛擬物件，虛擬世界為互動式的模擬環境，由一個個的虛擬物件所組成，包含一個大型的資料庫，資料庫中儲存有每一個虛

擬物件的基本屬性、動作、聲音、行為等等的資料，以及虛擬世界的原始設定：如背景、控制台、視窗等等。另一虛擬物件表示，虛擬世界中的虛擬物件不僅需要以立體的方式呈現出原本的形態外，更重要的是每一個物件都必須具有原本世界中的特質—必須根據真實世界中的本份，與使用者達成互動式的溝通；如同虛擬世界中的電腦，當使用者按下電源後就必須有出現螢幕，更進一步時當使用者在鍵盤上打字時螢幕也應該出現使用者所打的字。因此虛擬物件比一般的物件多了一種與使用者達成互動的行為責任。

### 2.2.2 虛擬實境的三大要素

依據 Grigore Burdea 教授與 Philippe Coffet 教授兩人所撰寫的” Virtual Reality Technology” [10]這本書中提出虛擬實境必須要有的三大要素-想像

(Imagination)、融入性(Immersion)、互動性(Interaction)，以下即針對這三要素簡單介紹。

#### 1. 想像力 (Imagination) :

感覺器官在接受刺激之後，由神經傳輸至腦中，再藉由過去的經驗產生幻覺，是一個想像的世界，也許模仿自真實世界，但卻充滿更多的可能性。

#### 2. 融入性(Immersion):

人類以感覺器官來體會整個虛擬實境，而感覺好像真的置身其中。許多的虛擬實境皆運用了多項技巧來增加使用者的沉迷度。如：營造神秘感、製造新鮮度、伴隨各式圖片、聲音的刺激、皆在鼓勵使用者的探索欲望，讓使用者讚嘆虛擬世界的魅力。當融入情境並沈溺在某件事物上時，可以得到較佳的學習效果與工作成效，在虛擬實境的模擬系統上也會有明顯的助益。要使人們增加融入性的方法，主要有下列四點：[11]

(1) 虛擬實境中的事物要儘量營造神秘感、製造新鮮度，激發使用者的探索

慾望。

- (2) 虛擬實境的系統要有適當的刺激、鼓勵使用者參與使用，給予使用者滿足感。
- (3) 避免外界干擾，整個環境的設計中儘量避免外界的侵入。一旦使用者被外界干擾，再進入虛擬實境時，就會喪失不少沈迷的興致。
- (4) 在虛擬世界中儘可能多多製造事件引導使用者，讓使用者認同虛擬環境進而增加沈迷的心態，流連忘返於虛擬世界中。

### 3. 互動性(Interaction):

人與機器之間的互相回饋。虛擬環境須具備互動功能，當使用者對電腦下達命令，虛擬實境便能隨時偵測到使用者的狀況與指示，即時的給予使用者適當的反應與回饋，達到互動的效果。就如同我們日常生活一般的慣性，推門門會開，球撞到牆壁會反彈。同樣一套虛擬實境軟體，經由不同使用者的使用及參與，將會得到不同的結果。未來虛擬實境將會與多媒體結合，其互動性的表現將更大放異彩。

虛擬實境可算是 3D 繪圖的極致表現，與其他類似的模擬系統和多媒體最大的不同，就是虛擬實境有觸覺與視覺直接回饋的作用，並和人類的感官有緊密的關係。虛擬實境是人與電腦溝通的新介面，讓我們在電腦的使用上更接近人類的本能，讓我們用電腦創造的想像空間，不再只是觀看而已，而是實際的真實體驗！

## 2.3 虛擬實境的硬體設備與相關軟體

除了基本的電腦軟、硬體之外，虛擬實境為了在視覺、聽覺、觸覺等各方面的感知都能夠親身去體驗，所以需要一些特別的輸出入設備，來達到真實的效果。以下即介紹虛擬實境有關的硬體設備與目前市面上的主流軟體。

### 2.3.1 虛擬實境相關的硬體配備[12]

#### 1. 頭盔式顯示器(Head-Mounted Display, HMD)

是一種戴在頭上、廣角度、立體的顯像系統，由使用者的位置、聲音及手勢來控制。這個系統提供使用者一個多樣感知、交談的顯示環境，使其能於虛擬環境中探索。主要包括：(1)麥克風，用來播放說話聲音；(2)耳機，用來接收立體聲音信號；(3)頭部追蹤裝置(Head-Tracking Device)，用來追蹤使用者的動作，使用者所看到、感覺到以及身體的移動等訊息均由此傳回電腦主機；以及(4)支撐液晶顯示螢幕(LCD Screen)和眼睛的視覺光學設備。屬於軌跡系統，是電腦的輸入設備之一。如圖 2.1 所示。

#### 2. 力回饋搖桿及控制臂 (Force Feed-Back Joystick and Arm)

亦是觸覺訊息的輸出入裝備。又稱訊息手套。手套是以萊卡布配合光纖構成，在每隻手指上都附上兩條光纖，光纖在指尖處連接一個發光二極體，另一端則是在手指肘背後連接一個光學識別晶體。由二極體發出訊號透過光纖傳遞給光學識別晶體，再由晶體將光波轉微成為電子訊號。由於手套內部具有許多精密的感應器，所以價格方面並不低廉。目前手套多半運用於工程設計方面的研究。如圖 2.2 所示。

#### 3. 3D 滑鼠

此種硬體配備是屬於虛擬實境硬體中比較平價的配備。他們主要的功能是改進傳統的 2D 輸入，將輸入方式改良成為具有 3D 輸入的一種裝置。依賴使用者指尖的推壓作為訊息輸入的依據，讓使用者可以在三度空間移動與旋轉。目前市面上的 3D 滑鼠大約有：由搖桿所改良的三度空間板、空間球、三度空間鼠等等。如圖 2.3 所示。

#### 4. 立體眼鏡

##### (1) 塑膠鏡片的眼鏡

係利用光線折射的原理去製造的，多半利用塑膠鏡框搭配紅色與藍色的塑膠鏡片來製造完成。此種眼鏡不能讓我們的眼睛與螢幕之間傳遞任何同步訊號，因此多半只能拿來觀看被動式圖片或是動畫。

## (2) 偏光式立體眼鏡

其原理為以互為垂直的偏光鏡片，以左眼看左像，右眼看右像，即能看到立體圖像。未帶眼鏡時所呈現的是兩個影像所疊合而成的，而透過立體眼鏡對於光的選擇，分別呈現在你的右眼以及左眼中，使你產生立體影像的感覺。這兩種影像是利用兩個角度稍微不同的攝影機所拍攝的，然後再藉由不同偏振方向的光線呈現在螢幕上面，而立體眼鏡上面是由兩塊不同的偏振片所組成，當光線通過偏振片時會濾去偏振方向與偏振片不同的光線，只保留方向相同的光線，結果你的兩眼就分別接受到不同的光線，而產生視覺上的錯覺。如圖 2.4 所示。

## (3) 液晶鏡片的有線眼鏡

係透過一條同步的傳輸線和電腦相連接，於螢幕輸出是以交叉輸出至左右眼，當螢幕顯示左眼的畫面就只有左眼可看到，右眼就只能看到右眼的影像，如同我們眼睛真正的構造。讓使用者用來觀看主動式的虛擬實境場景時，多半都是使用此種眼鏡。劇情會隨著使用者的操作而有所反應的，便是主動式的虛擬實境場景。如圖 2.5 所示。

## (4) 液晶無線眼鏡

眼鏡和螢幕間沒有一條同步的傳輸線，是一種專業的眼鏡，而且又不會受到傳輸線的牽制，並擁有很好的立體呈現效果。

### 2.3.2 虛擬實境程式語言

#### 1. VRML (Virtual Reality Modeling Language)

一種可以於網路上描述出虛擬空間的一種語言。特別強調平台的獨立性、擴充性、能運用於低頻寬網路上等特性。圖形、聲音、文件和虛擬空間都可以整合在一起，使用者可以在虛擬的空間裡游走，如同在真實日常生活中般自然地去接觸人、事、物，使用者亦可透過外掛程式解讀於瀏覽器呈現設計者所描述的 VR 環境[13]。相關的研究應用有交通大學廖健羽[14]將 VRML 視覺化的操作模式觀念，引入傳統的資料庫查詢中，提供大眾使用者查詢介面另一種新的新的選擇，建立了 VRML 介面結構物視覺化資料庫查詢系統。

## 2. X3D

X3D 是一種描述三維圖形的標籤語言，有多種編碼方式，其中包含了 XML，不但可望成為未來三維圖形的標準語言，更具有跨平台、應用方便等優點，可以實現各種應用程式和網路程式之間的即時傳輸。由於使用 XML 語言來作為文件格式，因此可以很簡單地達到標準性和可延伸性的優點。不論是桌上式或是行動裝置皆可利用，不需要任何的轉介介面。開發的旨在於 X3D 是開放標準的檔案格式，適合作為 3D 資料的統一交換格式，更可以應用於跨平台的即時網路環境中。其中台灣大學謝東穎[15]利用 X3D 產生的虛擬實境模擬鋼結構工程現場的 3D models，並利用 X3D 中的 SAI 介面操作虛擬實境場景，發展 A4D 模擬系統，達成工程量體與工程排程相結合的 4D 模擬目的。

## 3. Java 3D

Java 3D 整合 Open GL、Direct3D、QuickDraw3D 與 XGL 等繪圖硬體應用程式介面標準繼承了以往繪圖硬體 API 的優點，與 Java 技術緊密結合，也具有跨平台之特性。Java 3D 以資料樹的方式將場景資料(Scene Graph Data)拆解成一樹狀結構，樹狀結構中每一環節都含有形狀、光源、聲音等子節點，並以 Java 3D 所提供之類別 (Class) 與方法架構場景，在

以 Java 程式產生著色後之場景[16]。相關的研究有中山大學夏文洋[17]以 HLA 為基礎系統架構，利用 Java3D 設計應用程式的核心和介面，因應現今網路使用者對網際網路應用程式的需求，配合目前電腦視覺領域中極為熱門的 3D 圖形和 Visual Reality 技術，設計出一套網路的、即時性的、互動的、多媒體的、多人連線的應用程式系統模組。

### 2.3.3 虛擬實境應用軟體

目前最常使用的虛擬實境軟體，程式的定位在於讓使用者能夠設計出一套遊歷程式，或是體驗一下虛擬實境的觀念。例如 Virtus Walk Through Pro 來體驗虛擬實境的觀念；Supercapex 公司研發的一套 Superscape VRT 專業級，具有和 C 語言類似的程序式個體控制語言的虛擬實境軟體；Virtual Reality Studio 讓使用者能去建構出相當複雜的虛擬個體行為；以及 Virtools 支援多種開放架構 3D 檔案格式，供使用者便捷的整合設計、分享和體驗高互動的 3D 內容，使所有參與研發的專業或非專業人士都能體驗到產品和環境，提供了便捷的整合溝通與分享三維體驗的開發平台。

本論文研究即是利用開發系統 Virtools 製作虛擬實境模擬於結構破壞分析之應用，並可搭配線性偏光眼鏡，提供使用者一個多樣立體呈現效果、交談互動的顯示環境，使其能於虛擬環境中進行探索。有關 Virtools 軟體的相關介紹將於第三章中作更詳細的說明。

### 2.3.4 虛擬實境在土木建築的相關應用

隨著科技的日新月異，資訊傳播的腳步也愈來愈發達與快速，虛擬實境應用的領域也大幅的擴展，範圍甚廣至醫學、教育、軍事、科學、娛樂、工程……等，皆被廣泛運用著。在建築設計領域上，從以二度空間呈現的繪圖，以三度空間呈

現的透視圖和模型，到現今電腦繪圖、電腦模型與動畫的發展。在工程領域上，可以提供模型或 3D 立面的表現，提供各種模擬與展示，可以檢核與掌握整體的成果。陳正忠、吳嘉偉[18]針對此相關之研究，說明虛擬實境在土木建築的相關應用。

#### 1. 災害與防災教育的模擬

在防災方面，可以對水災、火災、風災、地震等災害作模擬與演練，以虛擬環境可以讓使用者感受各種危害程度，並作相關的模擬與演練，教導其緊急應變的措施及危機處理的能力。相關的範例有美國 NIST 之火災研究廠污染控制系統虛擬實境模擬[19]，參閱圖 2.6。

#### 2. 工程機具操作訓練的模擬

以虛擬實境模擬施工階段各項工程的使用情形，確認正確的施工步驟與相關解說，或是結合工程管理軟體，進行施工進度的模擬，以虛擬環境的操作模擬可能遭遇的狀況與處理方式，並可先行熟悉此項工程的挑戰性。例如 NIST 利用網路虛擬實境所建立之挖土機、砂石車、吊車操控虛擬系統，使用者可以藉由虛擬面板上之按鈕控制桿熟悉挖土機、砂石車、吊車之操作[19]；挪威的 Octaga 公司與 FMC 科技及 Industriell Dokumentasjon 應用 VR 技術所開發的海底設施安裝模擬教育訓練系統，學員不必下水即可實際體驗與熟悉相關施工步驟[20]。

#### 3. 道路設計與交通狀況模擬

將道路設計立體化、網路化。設計者可以任意的角度下檢測現行設計或道路標示的狀況，身歷其境地感受空間、尺度、環境、光線甚至於聲音的變化，進而使設計創作更加完美。相關的範例有圖 2.7 為公路漫遊模擬虛擬系統[21]。

#### 4. 建築結構設計的應用模擬

將傳統的平面圖、剖面圖、透視圖與 3D 的虛擬空間作結合、技術模擬出

產品或工程的功能與配備，並可直接進行設計、分析與評估，更可以模擬出結構行為以及營建計畫，不僅可大幅減少實際製造的時間與成本，更可事先預測在設計或營建過程中所有可能遭遇到的問題。

應用的實例有 RC 建築結構設計，虛擬實境在 RC 建築結構設計[22]，以及 NIST 之鋼結構配置模擬，發展結合分析程式、梁柱韌性設計與虛擬實境的應用系統，透過 3D 立體的虛擬實境模型，可以熟悉結構外型與各構件配筋的 3D 成果表現，達到共同評估、展示、檢核、施工與決策的目的，或對於房屋的架構可以直接利用虛擬實境來建構出 3D 空間的實際配置。

土木工程相關的建築設計成果，需由設計圖說來表現時，若是能融入三維電腦繪圖或虛擬實境技術來模擬設計意念、目的、施工過程或施工後的面貌與管理維護，除了可以讓業主、設計者、監造者、營造廠及一般社會大眾瞭解其工程內容，達到成果的完整性功效，不僅可成為監督工程的依據，並可藉此來提高工程品質。

## 5. 教學系統模擬

有別於傳統以教師為主要角色的教學方法，因應資訊的蓬勃發展，透過電腦與網際網路的輔助學習，利用 3D 的教學突破 2D 教學的視野限制，讓學生能對空間的概念能更加清晰與瞭解。打破了傳統教學在時間與空間上的限制，教學對象亦可無限擴充，教材更能以豐富多樣化的形式來呈現，較能引起學生主動積極學習的意願及提昇學習興趣與學習效果，利用虛擬實境特有性質的與使用者互動，身歷其境的融入學習環境中，真實體驗所帶來的學習樂趣，更可減少因危險的工作場合所帶來的意外事件。

交通大學傳播所研發出結構力學虛擬環境學習，以在「做中學」(Learning by doing) 觀念為學習核心，讓學習者以第一人稱親自學習，因為擁有高度的控制權以及虛擬實境的感官浸入特性，利用直覺而自然的互動方式，可將複雜的資料轉成容易瞭解的形式。交通大學土木系邱明祺[23]架構虛擬材料實

驗室，將圖片用虛擬實境的方式表現，文字則使用網頁製作表達，增加學習者的主動學習意願。交通大學土木系陳奕銘[24]利用相關力學論和 VRML 技術相結合，在材料力學虛擬教室中，除了有各種教學的資訊，包含應力應變、軸力分析、扭矩分析、彎矩分析……等多個主題教室，再利用互動式對話視窗來呈現十七道材料力學複選題，以及聲音的講解來研究虛擬教室在教學的表現與成效，利用虛擬實境的聲光效果吸引學習者的學習意願，加強其參與性與沈溺度，達到真正教學目的。

## 6. GIS 與城市規劃模擬

在 GIS 模擬應用方面，一般的 Web GIS 平面技術展現地理資訊，無法真實的表現出地形地貌，但是用 VRML 之 Web 3D 立體建物展示可提供視覺化的立體效果，不僅表現出完整的規劃，亦可以連結後端的地政資料庫，將土地資訊、建物、地形地貌資訊完整展現，並整合網際網路、地理資訊系統、虛擬實境技術運用於管理上，將相關的多種屬性資料集合，包含建物資料、地籍資料、數值地形圖……等進行分類，提供更完整的資訊，提高廣度應用性及多元價值性。可參考圖 2.8 應用 VRML 之 Web 3D GIS 立體建物管理系統[25]。

在城市規劃模擬方面，結合 VRML 與數位化的航空攝影、三維建模及其他專業技術，建構出一套可以透過網際網路的 3D 視覺化環境，帶領使用者進入一個擬真的境界。圖 2.9 為浦東地區城市規劃的模擬應用[23]。

## 2.4 電腦輔助視覺模擬

處於這個科技發展的社會，併隨著網路時代的來臨，尤其在強調資訊化的今日，電腦輔助的模擬與資訊科技的結合將會同步而行。電腦目前已經改變了人類的生活步調與方式，亦改變了對整個世界的感覺和領會，運用電腦來輔助模擬相

關的事項，可以減少時間與成本的浪費，勢必成為未來趨勢。由此可見，電腦輔助模擬的應用已成為社會一項極重要的環節。

#### 2.4.1 電腦輔助視覺模擬之應用

視覺感受是人類獲取信息與接收資料的重要來源，視覺經驗的感知是最主要的感官體驗。而電腦視覺模擬的主要目的，是透過影像處理的技巧再加上一些幾何分析，再利用電腦強大的演算能力，把二維影像的投影還原成三維空間的物體。將真實環境中或是模擬設計上作視覺上的圖像分析，依照空間秩序與複雜設計元素的改變來建構空間結構，利用視覺化的資訊，讓人類能夠判斷出物體的遠近、空間的差異與交錯性。藉由電腦的輔助模擬下，進行空間與視覺化的虛擬關係，讓使用者與系統產生真實與虛擬之間的情境互動，達到了溝通與相互應用的目的。

一般人受限於無建築、設計或營建方面的相關背景，故對於 3D 立體空間的概念總是沒辦法將意念完整的呈現或藉由文字、2D 圖片表達出來，而空間立體場景若無法深入瞭解，溝通必然成為一大問題，所傳達的意義也易遭受誤解。如何將這些多樣的 3D 視覺模擬的專業技術呈現，讓影像傳達一切，讓一切都變成可能，透過電腦的媒介進行互動溝通，建構一個良好的互動環境，勢必成為未來重要的發展。

利用視覺模擬所產生的效果來進行被模擬物體上的任何互動與行為，例如園區廠房的配置、都市計畫與文化區的規劃、高速鐵路的景觀視覺模擬或是校園虛擬導覽.....等相關研究，並利用視覺化的過程，結合相關電腦輔助繪圖與設計（如 3Ds Max、AutoCAD）與整合性的資訊系統（如 Virtools）來模擬欲表現出此互動行為的研究。

#### 2.4.2 視覺模擬應用之步驟

邱茂林[27]提出一般視覺模擬的步驟分為以下五點，本研究依據此模擬應用步驟方式，依序說明在後。

#### 1. 充分瞭解原計畫的內容與確定模擬之目的

本研究模擬內容為建築結構物破壞模擬評估，目的在於管理維護階段長期監測建築物的安全管理，讓使用者能夠迅速獲得監測相關資料，做出最適當的危機處理，達到安全監測的目的。

#### 2. 確認模擬實景的位置與內容

以本校工程二館（土木工程館）進行模擬探討，利用工程專業技術軟體找出結構體較脆弱的環節，於適當位置擺放適合的自動監測儀與其所發生的作用，作校園景觀視覺模擬。

#### 3. 蒐集相關實景資料，包含現況環境及原計畫內容

應用本校工程二館的建築圖、結構圖及相關現況環境與內容，作結構分析後續的成果展現。

#### 4. 決定模擬的方式與技術

結構破壞分析方面，以 SAP2000 進行非線性側推分析（Pushover analysis），找出達到耐震容量的關鍵位置；虛擬實境視覺模擬方面，則運用了 AutoCAD 繪製平面圖作為 3Ds Max 建模的底圖，再以 3Ds Max 拉伸處理成為立體模型，最後進行 Virtools 互動導覽的呈現。

#### 5. 展示模擬結果

本研究最後進行結構破壞分析與虛擬實境視覺模擬的成果展示，藉由上述之方法，使相關的分析結果能被非相關專業工程領域易於吸收與應用。

### 第三章 研究說明

建築結構物施工完成後，實施長期性的結構分析是結構物生命週期—管理與維護階段內重要的課題之一，藉由結構分析的結果來判定待測物受任何外力時是否仍處於正常的狀態，以及判斷整體結構物是否還在安全範圍內或是已經超過安全管理值。

本研究的建築結構物破壞分析模擬評估，是以工程軟體 SAP2000 進行非線性靜力推覆分析 (Nonlinear Static Pushover analysis)，來尋找整體結構物中受到任何外力時，塑鉸形成的先後順序及判斷整體結構物預警的關鍵位置，藉此關鍵的柱位，加以評估其健康狀態、損壞程度及損壞位置。並以 Response-2000 程式預先計算出鋼筋混凝土柱斷面的極限彎矩與極限剪力強度，來判斷柱的破壞模式。且為了能將上述複雜與專業的分析結果簡單清楚的表達出來，透過具體的視覺化來呈現相關專業軟體分析出的數值成果為一可行的表現方法，以 Auto CAD 及 3Ds MAX 建構建築物模型，再利用 Virtools 3D/VR 開發平台製作虛擬實境場景與虛擬互動。

本研究即是利用虛擬實境視覺化模擬建築結構物破壞分析，進行從事使用管理維護階段預防性防範措施。本章節將介紹所應用到的相關工程軟體程式。包含結構破壞分析評估所使用到的 SAP2000 程式和破壞模式分析的 Response-2000 程式，以及建構虛擬實境視覺模擬系統中所使用的 Auto CAD、3Ds Max 和開發系統 Virtools 3D/VR 相關軟體，利用上述相關軟體的背景探討作為本文研究應用的基礎。

#### 3.1 工程軟體 SAP2000 簡介

SAP2000 軟體為目前國際工程界普遍採用之結構分析軟體，乃是由美國加州大學柏克萊分校 Dr. Edward L. Wilson 及 Professor Emeritus 等人所發展出來的一

套工程分析-設計軟體。此為台灣土木工程界所普遍使用之結構設計分析軟體，許多重大工程及公共建設皆使用本軟體作為設計及分析的工具。

SAP2000[28]不僅可進行結構線性靜力及動力分析，也可進行考慮材料非線性或幾何非線性靜力及動力分析，並為一操作迅速方便的視窗化介面，分析的模型可建立 2D 平面桁架、3D 空間桁架、2D 平面構架、3D 空間構架等三維空間的幾何形狀、桿件或薄殼元素的斷面幾何性質，如圖 3.1 所示；分析的材料包含鋼筋混凝土材料、鋼結構材料、非線性元素力學性質或可以定義材料之材料特性；另外可以進行反應譜分析、歷時分析、側推分析等，程式還內建許多常用之材料性質與斷面（鋼筋混凝土之梁柱、鋼骨結構之樑柱），皆可於 SAP2000 內達成。

由於 SAP2000 具有圖形介面視窗化的優點，所以分析完後的結果可以直接以標準圖形顯現，避免文字的說明複雜與解說，除去傳統分析程式無法針對元素定義各項破壞模式的缺點，但亦可選擇標準的文字格式輸出，因此非常便利於工程師或研究人員所使用。如靜力變形載重、軸力、剪力、彎矩圖、動力振形應力分析圖、歷時分析結果、側推分析的塑鉸分佈、結構配筋或斷面設計等，皆可以利用視窗圖形化的介面清楚地瞭解結構模型的力學行為，更有利於後續的分析處理。

SAP2000 的特色除了上述之外，也可對於分析完成後的結構模型從事鋼筋混凝土或鋼結構設計的檢核，並可依據多種的載重組合或不同的設計規範，提供設計彈性及便利性。並可分析端點位移、施加預力、P-Delta 效應、Pushover、考慮各個自由度的束制情況、剛體性質等等。而程式有內建非線性靜力分析功能，可以塑性鉸來判斷構材破壞情形及其發生時機，使分析模型更能接近現實的結構情況，均可藉此程式得到較為精準的分析結果。

### 3.2 非線性靜力分析簡介

非線性靜力分析又稱為推覆分析(Pushover Analysis)，亦可稱為推垮分析。此分析目的為找出建築物在地震力作用下的破壞機制，得知在不同地震級數侵襲下，建築物的破壞程度、預知建築物由何處開始崩塌與崩塌的方式，讓設計者可以針對較脆弱的環節進行健康監測、修復或補強。

非線性靜力分析模型為一漸增的側向力或漸增的變位作用，將側向力分段以等載重或變載重分式施加，若發生降伏或減載，則更改有效勁度矩陣及計算不平衡力後，再行施加側向力增量，如此循序漸進直至結構崩塌為止。亦即將一組很小很小的地震力施加於結構體，計算在這極小的地震力下結構體的變形量與梁、柱承受的力量，此時結構反應仍保持在彈性範圍內，而後逐漸加大地震力，當某一地震力會使結構構件受力超過彈性極限時，該地震力便會使結構開始進入降伏階段，此時持續地加大地震力，直到結構體接近完全崩塌的邊緣，這個地震力便是使結構崩塌的地震力大小。

在上述的推覆分析過程中，可藉由基底剪力與頂層變位關係圖，如圖3.2所示即是所謂的結構體容量曲線，此關係圖可代表結構物的抗震能力，當側向力不大時，結構物仍保持在線彈性範圍內；當側向力逐漸增加時，結構物中的某些桿件進入非線性階段，造成容量曲線的斜率開始變緩，直到結構物的韌性用盡，最後基底剪力急遽下降。藉由此容量曲線可分析出層間變位角值、塑鉸產生順序、位置、桿件得變化等等，預測結構體發生降伏後的行為，並進一步推估在不同地震力下，建築物破壞的情形與程度。

### 3.3 Response-2000 簡介及破壞模式分析

#### 3.3.1 Response-2000 介紹

Response-2000[29]程式乃加拿大多倫多大學所發展的「鋼筋混凝土樑-柱斷面分析程式」，程式的研究、編寫及測試總共歷經二十餘年，於近幾年才將程式

執行檔與使用說明免費提供於網頁上，讓所需要的工程可方便取得。本程式是一個易於使用的斷面分析程式，可以計算出鋼筋混凝土斷面受剪力、彎矩或軸力的情形下、其斷面的強度與韌性，改善了傳統梁柱的繁雜計算方式。其快速的輸入和輸出，以及視窗化的工作介面，讓工程師或使用者便於分析後續的探討或查核結果。分析時將斷面參數資料輸入分析程式中，進行分析後即可得該梁柱斷面相關的分析結果，包含梁柱斷面彎矩與曲率關係圖、剪力與位移關係圖等。本文係利用此程式計算柱斷面的強度，以供使用者合理設定桿件斷面的塑鉸性質或其極限強度。

### 3.3.2 破壞模式分析

斷面的標稱彎矩與剪力強度均需乘上強度折減係數(若為彎矩破壞， $\phi$ 取 0.9；若為剪力破壞， $\phi$ 取 0.75)以得到極限強度。並將此柱斷面的極限彎矩強度轉換成等效剪力強度後，最後比較等效剪力強度與極限剪力強度之大小，判斷此柱的破壞模式為何，如式(3.1)所示：

$$\begin{aligned}
 V_{u,M} = \frac{2(M_u)}{h} &\geq V_{u,S} && \text{剪力破壞} \\
 V_{u,M} = \frac{2(M_u)}{h} &\leq V_{u,S} && \text{彎矩破壞}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

其中， $V_{u,M}$ ：等效剪力強度，

$M_u$ ：極限彎矩強度，

$V_{u,S}$ ：極限剪力強度，

$h$ ：柱之有效高度。

至於鋼筋混凝土的剪力破壞行為乃利用 ACI 規範所建議的標稱剪力強度公式計算柱的剪力極限強度，如下：

$$V_n = V_c + V_s
 \tag{3.2}$$

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} b_w d \quad (3.3)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yh} d (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s} \quad (3.4)$$

其中，

$\alpha$  為剪力筋的傾斜夾角，若  $\alpha=90^\circ$ ，則  $V_s = \frac{A_v f_{yh} d}{s}$ ；

$A_v$  為剪力筋的兩肢面積；

$f_{yh}$  為剪力筋的降伏強度。

### 3.4 Auto CAD 軟體簡介

AutoCAD[30]是由美國 Autodesk 公司所研發的一套繪圖工具軟體，是使用在 CAD 的領域範圍內的一套軟體。現已經成為國際上廣為流行的繪圖工具。而 CAD (COMPUTER-AIDED DESIGN) 是泛指電腦在設計師、工程師或是建築師的設計過程中扮演設計的媒介工具，所以 CAD 的範圍包含極廣，包含了從設計概念、分析概念、產品配置、組合模型、工具設計、工程圖、產品設計及細部設計模型等。

AutoCAD 2D 平面精準的設計能力，像是圖 3.3 建築業的大樓平面設計圖、圖 3.4 室內設計的裝潢配置圖、圖 3.5 大樓外觀立面圖、圖 3.6 製造業的模具及產品製造圖等等，均大部分由 AutoCAD 的 2D 平面設計，即可完成。AutoCAD 3D 立體繪圖功能，不管是建築及機械設計，或是廠房的設計及影像處理等，都可以仰賴 AutoCAD 軟體來進行設計、模型製作、繪製、影像處理等工作。

### 3.5 3Ds MAX 簡介

3Ds Max 使用領域應用範圍廣泛，包含電腦動畫、建築、室內平面設計、遊

戲場景設計、科技模擬、教育應用等，此視覺化設計可定義和擴展三維動畫，建模等等。在室內設計及展場設計的運用主要為展現出炫麗的室內配置美感及展示展場所欲表現出的現場效果，內容包含：空間的構成、燈光應用、貼圖材質的展現、夜景變化應用、顏色材料表現、動線機能應用、創意概念發展…等。如圖 3.7 及圖 3.8 呈現室內空間與燈光的應用，圖 3.9 所示為未貼覆建築外觀材質的模型，圖 3.10 為材質貼圖完成的表現，圖 3.11 則加入一些室內配置，充分表達所需要的機能動線等[31]。另外有關於 3Ds Max 在土木工程方面強大功能的應用上，紐約市全球化多元工程建設公司 Arup 為紐約州高速公路管理部門規劃差不多 30 英里的高速公路以及 3.1 英里的 Tappan Zee 大橋，所應用的設計工程軟體即是 3Ds Max，由圖 3.12 可看出此模型的擬真程度與設計是如此的精細，此公司讚嘆 3Ds Max 軟體提供他們所需要的工具，至今還未找到如此高質量的快速三維軟件[30]。有鑑於上述 3Ds Max 的多樣強大功能，故本研究選擇此軟體來建立此虛擬實境場景內所應用到的模型，有關於本研究建模的步驟與方式請參閱 4.4.1 節模擬製作流程。

## 3.6 虛擬實境製作軟體 Virtools 簡介

### 3.6.1 前言

Virtools 公司於 1993 年在法國成立，一開始的業務主要是針對國際公司，如 Peugeot SA, Airbus Industries, Aerospatiale 及 Coktel/Sierra/Havas 開發 3D 即時互動專案。爾後公司則自行研發互動行為引擎，並發展出世界級的 3D 虛擬實境建構套裝軟體—Virtools 等系列產品。由於其產品競爭性及可親性高，近年來已被廣泛地應用於國防、醫學、建築、電玩遊戲、藝術…等領域。

Virtools[32]「3D for All」開發平台，以完全的視覺化模式建構互動體驗，開放架構支援多種 3D 檔案格式的讀取，使即時 3D 技術的應用變得更多元廣泛。

另外「直覺式圖形開發介面」和內建超過 500 組的行為模組，開發人員只需要拖曳所需要的行為模組即可建構出豐富的互動應用程式，可同時滿足無程式背景的設計人員以及高階程式設計師的需要。

### 3.6.2 Virtools 特色

關於 Virtools 產品特色說明如下[32]：

1. 全新概念的 PCS((Product Context Scenario)製作流程，提供各階層的參與者從初期產品設計、虛擬實境模擬到 3D 互動操作的完整體驗。
2. 整合多元 3D 檔案格式，延伸產品設計與 3D/VR 更更豐富深度深度的結合 3D XML (CATIA、DELMIA、ENOVIA、SMARTEAM、SolidWorks)，3Ds Max、Maya、XSI、Lightwave、Collada。
3. 支援 DirectX 的 HLSL 與 OpenGL 2.0 的 CgFX 著色器語言，包含可用程式編寫的頂點 (Vertex) 以及像素 (Pixel) 著色功能。
4. 先進的播放體驗 3D Office/XE/Life Players，或整合至 VR 沈浸式虛擬展示系統，擴充多樣化的 3D/VR 體驗。
5. 「直覺式圖形開發介面」開發人員只需拖曳所需要的行為模組即可建構出豐富的互動應用程式。
6. 超過 500 組的行為模組檔案，搭配使用 SDK、多種外掛模組套件或是其他使用者所撰寫的行為程式，讓創意依照需求無限擴充。
7. 網際網路行為模組提供即時的模型、影像、聲音與資料動態下載，並可由開發人員自行設計各種內容與載入方式。
8. 提供 Virtools 程式語言 VSL(Virtools Scripting Language)，並具備有智慧型關鍵字顏色顯示系統 (coloring system)、指令字串提示功能 (context sensitive completion) 以及函式引數顯示 (function arguments display) 等功能。

9. 提供完整的程式語言開發工具，讓高階程式人員可以使用 Virtools 的 SDK 程式庫來開發功能更為強大的行為模組，並開放其 500 多個互動模組的完整程式碼供使用者參考、學習與修改。

### 3.6.3 Virtools 開發環境與流程架構

Virtools 開發環境大致是利用建模軟體，以及輸入的硬體設備，透過 Virtools 虛擬實境開發平台，並可應用開發的平台模組，輔以輸出的硬體設備，來展示欲表現出的系統，其開發環境如圖 3.13. 所示。而開發流程架構分為四階段，依序為模型匯入、內容開發、發行展示、播放體驗階段。以下針對上述的四階段作更加詳細的說明，其流程架構圖可參閱圖 3.14。

#### 1. 模型匯入階段

在 3Ds max、Maya、XSI Softimage、Lightwave 建構完模型後、即透過轉檔工具匯入建模模型。此 Virtools Plugin 轉檔工具可至愛迪斯科技公司網頁上免費下載。

#### 2. 內容開發階段

即是利用 Virtools 工具進行開發 3D 數位內容，並透過外掛模組套件，即可擴充豐富的互動應用，例如複雜的 Physics 物理學模組、AI 人工智慧、Multi-users 多用戶製作和編輯環境…等，另外還包括使用者自行撰寫的行為程式應用，可讓創意需求無限擴充。

#### 3. 發行展示階段

依據專業需求確定展示階段。在此階段提供沈浸式的 Virtools VR Pack，可使用 PC 播放沈浸式的 3D/VR 數位內容；亦有 Virtools Publishing Server 網路伺服器，可設定製作客製化的外掛程式原件與內容，以及 WAN 與 LAN 無人數限制的連線功能。

#### 4. 播放體驗階段

Virtools 4 延伸了 3D 內容的體驗範圍，包括：Microsoft™ Windows® 和 Apple™ MacOS® 系統的電腦、Microsoft™ Xbox® 遊戲機和 Sony™ PSP® 遊戲控制器、3D Office 和 3D XE Players 支援局域網路播放、3D Life Player 支援網際網路分享，還可以利用 VR Library 將作品整合至沉浸式的 VR 系統中。這樣廣泛的應用範圍增加了內容呈現的多樣性，並且為不同需求的使用者提供了一種整合開發與分享體驗 3D 內容的強大解決方案。

本研究在此先以一簡單範例說明關於 Virtools 的行為互動模式，如圖 3.15 所示，欲設計當正方體物件接近茶壺物件一定範圍內時即顯示文字訊息，編寫互動的邏輯行為模組如圖 3.16 所示，內容包含正方體鍵盤的移動控制、接近範圍的限制以及文字的顯示訊息腳本等，當互動設定完成後即可進行測試，如圖 3.17 所示當正方體穿過茶壺時於左上角即顯現欲表現的訊息。有關 Virtools 的更多範例可於愛迪斯科技網站進行相關的互動體驗。

#### 3.6.4 Virtools 系統需求

Virtools 擁有圖形化使用者介面、行為引擎、繪圖引擎、SDK 以及開放式架構等諸多功能，為了能在使用過程中能順利進行，其基本配備將有所限制，所搭配的系統需求如下[32]：

##### 1. 硬體

(1) 處理器：Pentium III 以上

(2) 記憶體：128 MB 以上

(3) DVD 光碟機

(4) 支援 1024 × 768 解析度，16 位元色彩的顯示器 (65536 色)

(5)指標裝置（滑鼠、軌跡球等）

(6)顯示卡：至少 8 M 以上記憶體與 Direct3D 或 OpenGL 相容的顯示卡

(7)支援 DirectSound 的音效卡（建議）

## 2. 軟體

(1)Microsoft Windows（2000、XP）

(2)Microsoft DirectX 7.0, 8.0 或者 9.0C，利用 DirectX 技術進行 3D 圖形加速顯示

(3)支援 OpenGL、OpenGL 1.5 的顯卡驅動程式

(4)Microsoft Internet Explorer 4.0 以上瀏覽器

## 3.7 立體設備設定

### 3.7.1 立體原理簡介

立體影像的成像原理為將兩張不同視角的影像傳達給左右眼即可夠成立體影像。事實上在沒有戴立體眼鏡之前，立體影像之所以會顯得模糊不清，是因為立體影像實際上是由兩個影像所疊合而成的，而透過立體眼鏡對於光的選擇，而分別呈現在你的右眼以及左眼中，使你產生立體影像的感覺。

而偏光式立體眼鏡原理是以互為垂直的偏光鏡片，光線前進的方向與振動方向垂直，若有兩部投影機 P1 和 P2，P1 鏡頭前放一垂直偏光鏡，P2 鏡頭前放一水平偏光鏡，兩部投影機重疊投影在同一投影幕上。另一方面，觀眾戴左為垂直偏光，右為水平偏光的眼鏡，則左眼只能看到 P1 的畫面，右眼只能看到 P2 的畫面，若 P1 和 P2 投影有視差的兩畫面，則觀眾可看到立體的畫面。如圖 3.18 所示立體設備架設示意圖。

### 3.7.2 雙投影機立體設備校正與設定

依照愛迪斯科技公司[32]所研發的雙投影立體設備，其校正與設定的步驟為先將兩台投影機分別接上 PC 的兩個影像輸出端，將 PC 的解析度設為 1024 x 768，再將 N-View 顯示設為仿製（N-View 的選項一定要兩個影像輸出端都接上了才會顯示），如圖 3.19 和圖 3.20。接著執行光碟中 Redist\ Player.exe，利用校正圖型，將兩台投影機校正至投影在重疊畫面上如圖 3.21。需注意第一次設定完成後，爾後每次開啟投影機務必要先按遙控器或投影機機身上的 Autopro 鍵，讓投影機回復原先設定。

### 3.7.3 Virtools Stereo Pack 及立體檔案製作

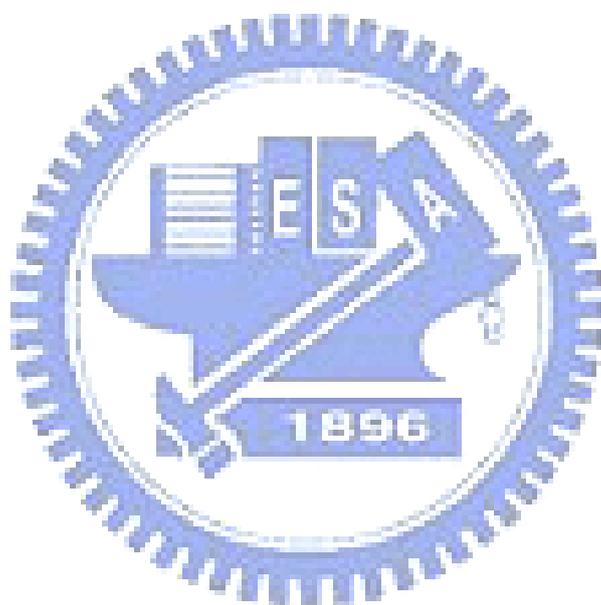
在 Virtools 檔案中加入 Virtools Stereo Pack 會自動生成兩台 Camera，模擬人的左右兩眼。立體檔案製作流程說明如下[32]：

1. 開啟 Virtools 檔案\*.cmo
2. 載入 Virtools 立體模組，如圖 3.22 所示。
3. 開啟 Virtools Stereo Pack 光碟中 Virtools Stereo Pack 資料夾載入 Stereo Camera.nmo。如圖 3.23 所示。
4. 完成後開新資料夾另存新檔（因調整視差及視角後，可將參數儲存，會在檔案所在資料夾新增一個 array\_cfg.txt）
5. 預覽播放

### 3.7.4 立體播放設定

完成雙投影機校正後，將 N-View 顯示設為水平擴展，如圖 3.24 所示，此時 PC 的解析度會自動變為 2048 x 768，如圖 3.25 所示。圖 3.26 所示播放立體檔案時，設定全螢幕單一畫面解析度（水平：1024，垂直：768）。並將 Virtools 全螢幕播放設為 2048 x 768，再開啟 Fullscreen，如圖 3.27 所示。最後進行 Virtools

Stereo 相關設定，設定攝影機距離、角度、初始設定等，即可馬上體驗虛擬互動立體實境。



## 第四章 研究與成果

本研究依據第三章的相關背景資料，進行校園建築結構物破壞分析模擬評估，範例為交通大學工程二館（土木工程館），其分析結果將作為後續虛擬實境的視覺模擬資料。

本研究首先使用 Response-2000 分析柱斷面的彎矩和曲率，以及剪力及位移的關係，並計算出鋼筋混凝土柱斷面的破壞形式，最後進行 SAP2000 非線性靜力分析，分析出柱斷面破壞的順序及預警的關鍵位置，找出了結構體較脆弱的環節，藉由推覆分析的結果對結構進行最佳化補強設計，或是監測儀器主要的擺放位置，讓設計者能針對結構體較脆弱的環節進行修復或補強。如此可有效率監控結構狀態在安全範圍內，相對的也降低監測系統的設置成本。並將上述分析的結果導入虛擬實境視覺化模擬系統內，以 Auto CAD、3Ds Max 建構校園景觀模型，最後將整個校園破壞分析塑鉸形成的位置與順序及相關資料帶入所建構好的虛擬實境中，實際體驗模擬監測點的分佈與運作情形。

### 4.1 研究範例與分析限制

本研究採用交通大學—工程二館（土木工程館）為範例進行分析與探討。本建築位於新竹市東區的交通大學內，其結構尺寸為 X 向（長向）長 70 公尺，Y 向（短向）長 42.5 公尺，總樓高為 14.4 公尺，屬於四層樓的鋼筋混凝土造建築物，每層樓高均為 3.6 公尺，其結構物全景如圖 4.1 所示，平面圖如圖 4.2、立面圖如圖 4.3 所示，柱之斷面尺寸及配筋情形如表 4.1 所示，圖 4.4 所示為平面圖對照柱的編號。分析時假設鋼筋之降伏應力  $f_y=2800 \text{ kgf/cm}^2$ ，而混凝土抗壓強度  $f_c'=210 \text{ kgf/cm}^2$ ，單位樓版面積之活載重為  $250 \text{ kgf/cm}^2$ ，結構物總重  $W=3035.2 \text{ tf}$ 。

本研究進行校園建築結構物破壞分析模擬評估，在分析過程中有諸多限制，說明如下：

1. 進行 Pushover 分析時，僅針對柱設定塑鉸性質而已，關於牆體資料引起的短柱效應，把被窗台圍束的柱以一般柱當做應力分析而忽略掉該柱真正的高度，所導致的嚴重剪力破壞情形，則不在本研究範圍內。
2. 結構體若配置較複雜或平面非對稱的建築物，則需考慮扭力對分析的影響。本研究為簡化其分析，假設結構體具有高度對稱性並配置較為簡單，故忽略扭轉效應造成的影響。
3. 本研究是以交通大學工程二館校園實例做為個案之研究，並以此建構起安全監測的實際理論，希冀作為國內大專院校進行災害防治的參考，但由於不同地形、地區、建築結構與環境均各有差異，分析的結果會有部份落差。
4. 本研究架構僅以個案進行分析與探討，因此，容或有其他不同種類之研究使用不盡相同之研究或變數等，此則非本研究所能涵納與解釋之處。

## 4.2 校園結構破壞分析

### 4.2.1 SAP2000 非線性靜力分析

本研究分析的主要目的以容量曲線與塑鉸形成順序來呈現結構物之非線性行為，以下將說明本研究以SAP2000進行非線性靜力推覆分析的方式與步驟。

#### 1. 建立結構模型：

依據桿件的不同，包含梁、柱、接頭方面，依照材料性質及斷面形狀建構其模型，並設定好其相關束制條件。如圖4.5所示此範例的結構模型。

#### 2. 定義塑鉸性質

SAP2000 有四種塑性鉸的形式，分別為（1）軸力塑性鉸（Axial hinge）：除了考慮桿件的軸向降伏強度外，亦包含桿件的挫屈分析；（2）軸力與彎矩塑性

鉸 (P-M-M hinge) :柱破壞時其軸力與彎矩值恰巧於 P-M 包絡線上為止；(3) 剪力塑性鉸 (Shear hinge) : 以此塑鉸性質考慮其桿件的剪力破壞強度 (4) 彎矩塑性鉸 (Moment hinge) : 以此塑鉸性質考慮其桿件的彎矩破壞強度。

本研究為簡化分析，假設柱的彎矩破壞為純彎矩的行為造成，不包含軸力破壞，並只分析柱的破壞情形，忽略牆的破壞行為。在評估分析中，兼具剪力與彎矩破壞，塑鉸性質定義在剪力破壞中柱的極限剪力強度與位移；彎矩破壞中柱的彎矩與曲率關係。其柱的破壞模式分析為剪力破壞或是彎矩破壞，將於 4.2.2 節詳細說明分析方式。

### 3. 指定塑鉸性質

彈性階段的最大彎矩處通常會最先降伏，所以塑性鉸通常都設置在此位置。在彎矩破壞中，最常將塑鉸指定在有效柱高的兩端處；剪力破壞指定在有效柱高的任一位置，本研究將剪力破壞的塑性鉸的位置指定在有效柱高的中間處。如圖 4.6 所示為指定塑鉸性質的位置。圖 4.7 可以看到當剪力破壞時，塑鉸建立位置為有效柱高的中間處；彎矩破壞時，塑鉸建立位置為有效柱高的兩端處。

### 4. 執行 Pushover 分析

在定義完上述的塑鉸性質後，在進行 Pushover 分析之前，結構模型需先完成靜力分析，先執行力量控制的非線性靜力分析，將靜載重施加在結構物上，而後再進行 Pushover 分析。加載方式可將控制點設定達到目標位移或建築物倒塌為止，所謂控制點一般是指建築物頂層的形心位置；目標位移為建築物設計地震力下之最大變位。側向力分佈方式會隨結構物的變形而有所調整，常見的形式有集中力頂層側推、均佈力側推、倒三角形分佈側推或基本模態分佈側推，本研究為簡化分析，則取倒三角形形式的側向力進行分析，並考慮 P-Delta 效應，反覆迭代直到桿件內力及變形收斂為止，當水平荷載不斷增加，結構側移亦相應增大，直到達到目標位移為止。

依據上述的步驟完成後，程式可顯示結構基底剪力與頂層位移之容量曲線、各構件的塑鉸變形情況和破壞順序，可實施安全監測或檢測結構其健康狀態，作為後續安全評估之依據。

#### 4.2.2 Response 2000 斷面性質分析

Response-2000 程式輸入的方式是採用圖形化介面模式，在程式中提供了公制 SI 與英制 UI 單位使用，建立斷面資料可以使用程式中快速入門 (Quick Start) 單元，第一步即確定需求的單位，之後在選單欄選擇 (Define/Quick Define) 功能開始輸入資料，第一步主要輸入混凝土與鋼筋等材料性質；第二步輸入桿件形狀及該桿件的尺寸、大小；第三步為輸入縱向鋼筋的數量及尺寸；第四步則選擇箍筋或肋筋數量及尺寸。依照上述步驟建立斷面資料完成如圖 4.8 所示。

執行(Solve/Sectional Response)選項，開始進行斷面分析，可得到彎矩一曲率的關係，如圖 4.9 所示；執行 (Solve/Member Response) 選項，開始執行桿件分析，可得到剪力一位移的關係，如圖 4.10 所示，於圖形中按右鍵 (View Data) 可取得詳細的數據結果，以表列的方式輸出。最後將分析完成的資料進行判斷其破壞模式，作為塑性鉸設定破壞類別的依據。

#### 4.2.3 結構物破壞分析與成果

本研究是利用非線性靜力分析得知柱構件與結構超過彈性範圍後的非彈性反應，分析的過程中，地震力不斷的加大，且由地震力加大的過程觀察結構的反應與行為，找出塑性鉸產生的地方以及順序，評定結構現況安全性，以便進行最佳化的補強或緊急應變措施。

本結構推覆分析方向分為 X 向(長向)與 Y 向 (短向)，X 方向分析塑鉸產生模型詳如圖 4.11 所示，Y 方向分析塑鉸產生模型詳如圖 4.12 所示，分析結果

顯示施側力於 Y 方向時其容量曲線內的基底剪力數值 721533 kgf 小於施側力於 X 方向的基底剪力數值 915438 kgf，另外 Y 方向的位移量 1.1566cm 亦小於 X 方向的位移量 1.4614cm，為了安全考量與保守估計，祈使結構物的狀態能實際且正確的發生預警的作用，分析的結果取施側力於 Y 方向的數值為破壞分析的依據。

以圖 4.13 來說，圖中標示的圓點代表的是塑鉸產生的地方，說明地震來時低樓層的特定位置，會產生損壞，而後損壞位置將會持續向上蔓延。

本研究整理 Y 方向分析塑性鉸的順序與位置，以平面圖標示如圖 4.13 所示、容量曲線如圖 4.14 所示。將塑鉸產生的順序分為四個階段，依序以色塊藍、綠、黃、紅色點標示。即最先產生塑鉸的位置以藍色點表示；次發生的以綠色點表示；再次發生以黃色點表示；最後達到最大基底剪力發生的以紅色點表示。以下為各階段產生塑鉸所代表的意義：

1. 第一階段：發生的塑鉸位置以藍色點標示，平面位置圖如圖 4.15 所示，容量曲線圖如圖 4.16 所示，所對應的基底剪力為 361289 kgf，位移量為 0.5459 cm，此時有 1 根柱產生塑鉸，塑鉸產生比例為整體 70 根柱的 1.43%。此階段為結構柱最先產生塑鉸的位置。
2. 第二階段：發生的塑鉸位置以綠色點標示，平面位置圖如圖 4.17 所示，容量曲線圖如圖 4.18 所示，所對應的基底剪力為 516288 kgf，位移量為 0.7799 cm，此時有 1 根柱產生塑鉸，塑鉸產生比例為整體 70 根柱的 1.43%，累計第一階段有 2 根柱產生塑鉸，塑鉸產生比例為整體 70 根柱的 2.86%。
3. 第三階段：發生的塑鉸位置以黃色點標示，平面位置圖如圖 4.19 所示，容量曲線圖如圖 4.20 所示，所對應的基底剪力為 595140 kgf，位移量為 0.9023 cm，此時有 20 根柱產生塑鉸，塑鉸產生比例為整體 70 根柱的 28.54%，累計第一、二階段有 22 根柱產生塑鉸，

塑鉸產生比例為整體 70 根柱的 31.4%。

4. 第四階段：發生的塑鉸位置以紅色點標示，平面位置圖如圖 4.21 所示，容量曲線圖如圖 4.22 所示，所對應的基底剪力為 721533 kgf，位移量為 1.1566 cm，此時有 3 根柱產生塑鉸，塑鉸產生比例為整體 70 根柱的 4.3%，累計第一、二、三階段有 25 根柱產生塑鉸，塑鉸產生比例為整體 70 根柱的 35.7%。

此紅色點視為「柱破壞時，極限層已達基底剪力，代表結構已用盡韌性容量 (R)，其極限位移( $\Delta_u$ )所對應之基底剪力即為該結構之耐震容量。」本建築結構共有 70 根柱，依照上述的理論，塑鉸比例在 35.7%，亦即當柱產生 25 根塑鉸時其極限層已達到基底剪力。故以此紅色點代表最後發生塑鉸的三個位置，來判定此結構物破壞與否的關鍵位置，可特別針對此位置進行嚴謹的安全監測，這些發生損壞的順序，亦可供房屋使用者為災害過後的重點檢查目標，說明哪裡最危險、地震過後的檢查重點以及若要設置監控儀器時，應設置的位置，並判定建築物是否處於安全範圍內，以便進行緊急應變措施。

### 4.3 結構破壞模擬設計

運用上述非線性靜力分析所評估的結構安全穩定位置與關鍵點，建立起災害防治的監控系統，藉由電腦模擬技術進行模擬探討，並建構出本校工程二館校園景觀虛擬實境視覺化場景，模擬結構物的安全狀態、受外力時損壞的位置、發生的順序與監測儀適合放置的位置等，作為長期監控建築物管理維護階段的安全管理，

模擬設計的方式為將非線性靜力分析 (Nonlinear Static Pushover analysis) 塑鉸形成的先後順序完整呈現出來，並以顏色區分結構物的危險程度，來預知建築物由何處開始破壞以判定結構物安全與否。

本研究將非線性靜力推覆分析最先發生塑鉸的柱位以藍色點標示，次發生塑鉸的柱位以綠色點、黃色點、紅色點依序標示。以顏色區分表結構狀態的重要程度，重要程度順序分別為紅、黃、綠、藍，亦即以藍色點柱位代表最先形成塑鉸的位置，但此柱位形成塑鉸後並不一定會對整體建築結構物的安全產生威脅，有可能此柱位斷面已經破壞了，但此結構卻仍在安全範圍內，還不至於崩塌破壞，可進行補強或修復即可；柱位以紅色點標示即代表此為判定整體結構物安全與否的重要關鍵位置，此位置亦可為必須謹慎密集安全監測的地方，一旦此紅色點柱位形成塑鉸，此結構物則為危險狀態，必須有緊急的應變措施或疏散隔離人潮等；柱位以綠色點或黃色點標示則代表此危險程度介於藍色點與紅色點之間，可作為塑鉸形成的順序判斷與評估。故以各構件的塑鉸變形情況和破壞順序，以顏色區分標示，來實施安全監測或檢測結構其安全狀態，並將此結果套用至虛擬實境場景中，可讓未具有專業工程領域的使用者能儘快熟悉與瞭解此結構安全監測的位置與破壞情形，將工程專業的分析結果簡單易懂地表現出來，幫助吸收、分享、瞭解與應用，並讓使用者能夠迅速獲得監測相關資料，做出最適當的危機處理，達到安全監測的目的。

虛擬實境場景內除了將塑鉸的形成順序以顏色標示區分外，另將位置以平面圖表示，並以結構體容量曲線圖來表示基底剪力與頂層變位的關係，還有各階段塑鉸形成的比例，皆可於虛擬實境場景內點選顯現。應用電腦模擬視覺介面對情境化空間產生聯想，使其能夠對整體的監測環境更具體的瞭解與應用，有效的掌控結構物全面的安全狀態。以上將研究結果呈現的內容與方法於 4.4 節作更詳盡的解說。

## 4.4 虛擬實境場景的邏輯編輯與互動設定

### 4.4.1 模擬製作流程

欲製作校園場景虛擬實境，讓使用者進行身歷其境的真實體驗，首先需要的是將平面的東西轉為立體。首先即是要建立校園建築物的模型，待模型建立完成之後，加入物件的屬性，使其達到需要的互動功能。本論文研究製作校園虛擬實境的方式為運用 Auto CAD 繪製平面圖，作為 3Ds MAX 建模的底圖基準，再以 3Ds MAX 拉伸處理成為立體模型，最後是使用 Virtools 軟體將上述的模型轉為展示場，設定相關互動模式，建立其虛擬實境。圖 4.23 所示說明模擬製作的流程。

### 1. 繪製平面圖

依照工程二館設計時使用之建築圖，運用 Auto CAD 軟體，按照圖示比例繪製出平面圖，如圖 4.24 為完成的交通大學工程二館平面圖。

### 2. 3Ds MAX 模型建構

繪製出來的平面圖匯入 3Ds MAX 軟體，將此平面圖當作建構建築物的底圖，以此作為結構物整體的模型基準，從 Auto CAD 將平面圖匯入 3Ds MAX 以及 3D 模型的建立步驟如下說明：

#### (1) 設定對應單位：

首先先設定對應單位，如圖 4.25 所示此單位的設定依據為依照 Auto CAD 繪製平面圖所設定的單位。

◎ 從功能表 Customize/Units Setup/Display Unit Scale 勾選

Metric(公制)選擇 Centimeters(公分)。

◎ 按下 System Unit Setup 也選擇 Centimeters(公分)，對應 Auto CAD 的圖檔。

◎ 在 File/Import 找到平面圖.dwg 檔，若找不到檔案要注意檔案類型是否為 Autocad Drawing，參閱圖 4.26 匯入步驟。

#### (2) CAD 圖檔處理方法：

◎ 先建立此平面圖的 Group 群組，先將圖檔全部圈選起來，按功能

表 Group(群組)/ Group(群組)，並設定此名稱為平面圖，圖 4.27。

- ◎ 然後按下 Display 底下的 Freeze 凍結此平面圖，如圖 4.28 所示，此時平面圖會呈現灰階狀態，將此圖當作拉伸結構物的基準，凍結的目的為作為建模的底圖，不為此建模圖形的一部分，不管做任何指令動作均不會受到影響。

### (3) 建立柱：

- ◎ 轉換單一及四視景，將 Top 上視景放大，因視窗放大以利於選取。
- ◎ 接下來並按照建築平面圖的外觀輪廓，先在 Creat /Shape(2D) /Rectangle (矩形) 按住左鍵，依照平面圖拖曳出 2D 平面的第一根柱子，圖 4.29。
- ◎ 並取消勾選 Start New Shape，圖 4.30，再繼續繪出第二根柱，以此類推，取消的目的為設定為同群組，並非單獨分開顯示，以利於後續拉伸柱高度時，要分別拖曳出高度的麻煩。
- ◎ 點取上述所建立的 2D 柱平面，接著在 Modify/Extrude 擠出所需之高度，Amount=360cm，圖 4.31。柱建立完成如圖 4.32。

### (4) 建立梁：

- ◎ 梁的建立方式如同柱的建立方式，依照平面圖梁的位置圖拖曳出梁的 2D 平面，並同樣在 Modify/Extrude 擠出所需要的高度 60cm。
- ◎ 接下來要移動梁的位置到所需要的高度，先選取此梁物件，按下 Select and Move，可去調整此選取物件 X、Y、Z 向的距離，將它搬移到所需要的高度，圖 4.33。

### (5) 建立牆：

- ◎ 牆的建立方式如同梁及柱的建立方式，一樣先使用 Creat / Shape(2D) /Rectangle (矩形) 按住左鍵拖曳出 2D 平面，並同樣在 Modify/Extrude 擠出所需要的高度 300cm。

- ◎ 唯一不同的是若此牆有門窗的設計，則不可使用上述的方式，必須使用 Wall 建立，才可配合 Door 與 Windows 自動穿洞。方式為在 Creat / AEC Extended / Wall(牆)中設定牆的 Width、Height 尺寸，並在指定的點拖曳出即可，圖 4.34。牆建立完成如圖 4.35。

#### (6) 建立門：

- ◎ Creat / Geometry(3D) / Doors(門) 選取所需要形式的門，鎖定牆的邊緣按住左鍵不放，向右拖曳，並放開左鍵，點一下另一邊的牆邊緣，再往上拉伸出門的高度，點一下左鍵，即完成門的繪製，圖 4.36。

- ◎ 在 Parameters(參數)下調整 Width、Height、Depth 尺寸。

#### (7) 建立窗戶：

- ◎ Creat / Geometry(3D) / Windows(窗戶) 選取所需要形式的窗戶，之後拖曳出了方式如同建立門的方式。

- ◎ 一樣在 Parameters(參數)下調整 Width、Height、Depth 尺寸後，保持窗戶在選取的狀態，在移動工具上按右鍵，將窗戶升高到所需要的高度，圖 4.37。門及窗的完成圖如圖 4.38。

#### (8) 材質的設定：

- ◎ 打開 Material Editor 材質編輯器選擇第一顆材質球，按下 Diffuse 後面的小方塊，並雙擊兩次 Bitmap 取得材質的檔案，之後去選擇欲給予的物件將材質貼覆上去，圖 4.39。

- ◎ 若貼覆的材質未在目前的視窗顯現，要在視景中顯示材質要按下彩現之後經算圖後即可呈現。材質貼覆完成如圖 4.40 所示。

- ◎ 一個物件的貼圖大小可由材質編輯器內的 Tiling(拼接)設定即可。兩個物件以上的貼圖大小，需由 UVW MAP(貼圖軸向)或 Map Scaler(貼圖縮放)來設定。

### (9) 景觀配置：

- ◎ 則在 AEC Extended /Foliage 中選擇所要的內建樹木造景，並調整其所需的高度與大小及其位置，圖 4.41。
- ◎ 在此建立景觀配置所佔的資源浩大，會拖慢之後虛擬實境建立與互動的速度，若可以最好在 Virtools 內使用十字貼圖法，再進行相關的景觀配置。

### (10) 燈光設置：

- ◎ 建議燈光的部分不要包含在輸出的檔案中，在 Virtools 中並不會使用到 MAX 中的燈光，可直接在 Virtools 內進行虛擬實境場景的基本環境，

### (11) 建模完成：

- ◎ 依照上述的步驟將本研究建構的模型一一建立完成。
- ◎ 工程二館模型完成圖可參閱圖 4.42 正向圖、圖 4.43 右向圖、圖 4.44 背向圖、圖 4.45 左向圖、圖 4.46 俯視圖。

以上依序將結構物的組物件繪製出來，繪製順序為柱圖、梁圖、牆圖、樓梯圖、樓板圖、門窗圖以及結構設備等，為了強調生動真實，更添加了結構物的附屬物件，例如景觀樹木造型、館內佈告欄等，依此依序拉伸成為 3D 立體模型。需注意的是，建模過程中若有需考慮到未來場景某些物件要有互動的功能行為，則在建模時需要獨立分開繪製，匯入 Virtools 軟體中才會有個別的幾何模型資料產生，分別對物件作互動功能。

## 3. Virtools 虛擬場景與互動式設定

待模型建構完成後，匯出 Virtools 專用檔案\*.NMO、\*.CMO、\*.VMO 檔，即可進行相關的互動設定，本研究所運用到相關的互動說明請參閱 4.4.2 節。

#### 4.4.2 將研究結果轉為 3D 的互動內容－利用 Virtools 3D/VR 編輯工具

以往製作虛擬實境除了需要擁有 3D 建模(如:AutoCAD、Solidwork、Pro/E、或 3Ds MAX、Maya)的技術外，尚須擁有 DirectX、OpenGL 的程式撰寫基礎尚可進入製作 3D 互動內容。所幸隨著一些軟體公司的努力，將一段一段複雜的程式碼組合成圖形化模組的 3D 互動製作工具一套套地出現在市面上，簡易的操作介面讓來自不同領域的使用者撇開程式語法及除錯的複雜門檻，得以直接進入製作 3D 互動內容的領域，縮減開發時程及拉近美術與程式設計的距離。

而其中為國內眾多學術研究單位所採用的一套工具即是此次研究中使用的 Virtools，這套 3D/VR 開發工具除了簡易的圖形化操作介面及近似邏輯圖的互動設計基礎外，尚提供各種建模軟體的輸出 Plug-in 配件，將模型與材質順利地輸出及匯入到 Virtools 來製作互動。

如圖 4.47 為 Virtools 介面將 3Ds MAX 所製作的場景模型透過 Virtools for 3Ds MAX 之 Exporter 匯入後，即可利用圖形化的行為模組及邏輯圖式的互動編輯及參數調整來製作互動。

此小節將本研究結果利用 Virtools 3D/VR 轉為 3D 互動內容的製作，過程說明如下：

##### 1. 規劃

將工程二館建築物模型以建模軟體 3Ds MAX 繪製後，匯入 Virtools 製作 3D 即時互動介面，互動功能為：

- (1) 使用者可透過滑鼠控制自由攝影機方向。
- (2) 使用者可透過鍵盤控制自由攝影機前進及後退。
- (3) 自由攝影機與場景建築物需有碰撞 Collision 的效果。
- (4) 點選不同顏色的塑鉸可產生不同的 2D 圖文資訊，點選塑鉸外的物件可取消 2D 圖文視窗。

## 2. 模型製作

因為本研究在於將虛擬的 3D 模型透過 3D 互動編輯軟體製作即時互動效果，亦即使用者可透過鍵盤、滑鼠或搖桿等，在互動內容中作即時的互動操作，以至於必須考慮到電腦即時運算的效能，所以在模型的製作上就必須以 Low Polygon 低面數的作法來減輕即時運算的負擔，例如樹木的部份就不能使用 3Ds MAX 軟體預設的植栽模型，而必須利用較簡易的十字貼圖法來表現樹木的模樣。

## 3. 匯入模型

利用 Virtools 安裝在 3Ds MAX 的 Exporter Plug-in 將製作完成的建築物及場景模型存成.nmo 的檔案，如圖 4.48 所示。

開啟 Virtools 編輯介面，在上方工作列選單中，選擇 Resources → Import File，選擇之前由 3Ds MAX 匯出的.nmo 場景檔案，如圖 4.49 3Ds MAX 匯出方式。

## 4. Virtools 場景配置

### (1) 新增、調整 Camera 及燈光

模型成功匯入 Virtools 後，首先至 3D Layout 視窗左方的新增工具列，新增一個 Camera，並利用調整工具列調整到一個適當的視野、距離及角度。未調整時狀態如圖 4.50 所示，有些物件呈現黑色物件狀態。其設定及結果如圖 4.51 所示，調整後結果如圖 4.52。此外，在(  $X = 61.9063$  ,  $Y = 41.5786$  ,  $Z = 90.0008$  )、(  $X = -90.6355$  ,  $Y = 55.0561$  ,  $Z = 69.2224$  )、(  $X = -58.6569$  ,  $Y = 46.7375$  ,  $Z = -102.0248$  )新增三個點光源 Point Light，如圖 4.53 所示。

### (2) 加入草坪、樹木等 3D 模型

至 Virtools 預設的素材庫 Virtools Resources / Patch Primitives / 中找到” Patch Plane 10x10.nmo” ，利用這個平面的 3D 物件當成草坪，如圖

4.54。位置與 Scale 大小的設定如圖 4.55。在場景編輯畫面中點選該物件後按滑鼠右鍵，進入 Texture Setup，該改貼圖為 grass 512x512.jpg，此圖檔亦存在於 Virtools Resources / Textures / Material 中，將其直接拖拉至 Texture Setup 左邊的方框即可，如圖 4.56。調整後結果如圖 4.57。接下來，同樣利用 VirtoolsResources / world 裡的 MountainWorld.nmo，將其中以十字貼圖法的樹木物件單獨儲存成個別的.nmo 檔，如圖 4.58。將此樹木物件的 nmo 匯入到編輯場景中，再以複製的方式分配到建築物的各個位置，整個場景物件的配置大致上已完成，如圖 4.59。圖 4.60 為完成模型圖。

## 5. Virtools 互動編輯

### (1) 利用滑鼠控制 Camera 方向

新增一個虛擬物件 3D frame，針對此物件 Create 一個 Script 腳本視窗，如圖 4.61。接下來由 Virtools 右上方的 Building Block 視窗，找到以下兩個 Building Block：

Interface/Screen/ 2D Picking

3D Transformations/Basic/ Set Position

再來依以下的邏輯連結 Behavior Link 及 Parameter Link，將 2D Picking 的 Inter Section Point 值傳到 Set Position 的 Position 參數，如此一來，當執行時滑鼠滑過的位置即是攝影機可選擇前進或後退的方向，如圖 4.62。

### (2) 使用者可透過鍵盤控制攝影機前進及後退

針對一開始新增的 Camera 去 Create 一個新的 Script 腳本視窗，再來先加入一個 Building Block：3D Transformations/Basic/ Look At，如圖 4.63。

點擊該 Building Block，將跟隨速度設為 1%，讓攝影機會自動注視 3D

frame 的位置。接下來加入 Controllers/Keyboard / Switch On Key，此 Building Block 在於可設定鍵盤按鍵對應後續觸發的功能，如圖 4.64，按” W” 、” A” 可觸發後續的 Translate (3D Transformations/Basic/)，第一個 Output 為 Z 正值( 攝影機前進 )，第二個 Output 透過 Parameter Operation : Multiplicatio 的運算為負 Z 值( 攝影機後退 )。

(3) 自由攝影機與場景建築物需有碰撞 Collision 的效果

至 Lever Manager 開啟一個 Group，將欲產生碰撞的 3D 物件拖拉到此 Group 中，並將此 Group 更名為” Collision”，如圖 4.65。回到 Camera 腳本環境中，加入 Building Block : Collisions/3D Entity / Object Slider，選擇剛剛建立的 Group，日後執行時即可產生碰撞效果，如圖 4.66。

(4) 點選不同顏色的塑鉸可產生不同的 2D 圖文資訊，點選塑鉸外的物件可取消 2D 圖文視窗。

利用新增工具列依照需求新增 10 個 2D Frame 置於畫面左方，如圖 4.67。在 Lever Manager 中點選 Level Script 新增一個腳本，加入 Building Block :

Controllers/Mouse/ Mouse Waiter ( 判斷滑鼠按鍵是否按下 )、

Interface/Screen/ 2D Picking ( 偵測滑鼠點選物件 )，如圖 4.68。

接下來至 Level Manager 新增不同塑鉸的四個 Group，分別將不同顏色( Blue、Green、Yellow、Red )的塑鉸物件加入個別的 Group 中，回到 Level Script 的腳本，加入 Building Block : Logics/Groups/ Is In Group 判斷點選物件是否在此 Group 中，如圖 4.69。接下來處理 2D 文字跟指定 2D Frame 貼圖部份，Script 腳本邏輯如圖 4.70。

使用的 Building Block 有：

Logics/Loops/Delayer (減緩時間間隔，避免滑鼠點選後產生的重複運算狀態。

Visuals/Show-Hide/Show ( 顯示 2D Frame )

Visuals/Show-Hide/Hide ( 隱藏 2D Frame )

Interface/Text/Text Display ( 顯示文字 )

Logics/Calculator/Identity ( 指定文字及圖片參數給其他 Building Block 使用 )

Materials-Textures/Basic/Set Texture ( 設定貼圖資訊 )

再利用 Building Block : Materials-Textures/Basic/Set Diffuse 設定 2D Frame 顏色，如圖 4.71。如此 2D 資訊的互動製作就完成了，如圖 4.72。

最後利用 Building Block : World Environments/Background /Sky Around(CubeMap)指定 Sky 的 Cube Map 貼圖產生天空的效果，Virtools 互動亦即完成，如圖 4.73 及圖 4.74。

## 4.5 結果呈現

將本研究結果利用 Virtools 3D/VR 轉為 3D 互動內容後，可運用多媒體立體設備將上述的互動功能轉為逼真的視覺感受，讓使用者感受到身歷其境的虛擬實境場景中。

### 4.5.1 操作介面設定

人機介面在虛擬實境中當中扮演很重要的角色，本系統操作虛擬實境以鍵盤和滑鼠同時進行。以滑鼠控制方向，執行時滑鼠滑過的位置即是攝影機可選擇前進或後退的方向；以鍵盤控制攝影機前進及後退，按鍵” W “控制前進，按鍵” A “控制後退，並單擊結構物柱上的圓點，可得結構分析塑鉸形成的相關資訊。本研究 Virtools 互動作品成果，如圖 4.75 所示為外觀以及單擊藍點所呈現的資訊狀態；圖 4.76 及圖 4.77 為工二管內部狀態；圖 4.78 則為建物整體的外觀，

可搭配上上述的控制行為，隨意遨遊工程二館虛擬實境與結構分析的真實體驗。

#### 4.5.2 立體設備設定

將虛擬實境互動與操作介面設定完成後，可將此檔案套用至立體投影設備，並透過立體眼鏡對於光的選擇，而分別呈現在你的右眼以及左眼中，使產生立體影像的感覺。圖 4.79 所示的立體影像是由兩個影像所疊合而成的，戴上立體眼鏡之後就會讓整個場景呈現景深的效果，可以清楚地辨別場景的遠近與 3D 立體感，但礙於立體的呈現必須配戴立體眼鏡，親自實地體驗與操作，故本研究無法展現此相關圖片。

#### 4.6 小結

本研究應用結構破壞分析於虛擬實境視覺模擬上，並運用本研究模型從事使用管理維護階段預防性防範措施，可以獲得災害發生時的自動監測時的狀況；並藉由虛擬實境模擬真實狀況，透過具體的視覺化表現來呈現相關專業軟體分析出的數值成果，藉著虛擬實境的應用來傳達文字或圖片無法表達的部份，讓使用者能夠迅速獲得分析相關資料，做出最適當的危機處理，使相關的分析結果能被非相關專業工程領域易於吸收、瞭解、分享與應用。

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本論文研究經過相關論文文獻探討，建築結構物破壞分析以及虛擬實境視覺化模擬應用等過程，並彙整歸納其量側結果，將本研究所得的結論敘述如下：

1. 藉由非線性靜力分析來尋找建築結構物較脆弱的環節，以及影響整體結構安全與否的關鍵位置，可於此位置放置監測儀或是進行最佳化的補強與緊急應變措施，有效率監控結構狀態在安全範圍內，並減少普設監測儀器設備及維護的成本，作為長期監測建築物的安全管理。
2. 利用虛擬實境視覺化的模擬應用於結構破壞分析上，將分析結果完整的虛擬呈現，直接將所蒐集到的數據、紀錄與分析進行整合，立即在校園虛擬實景中模擬狀況，清楚快速的在螢幕上掌握即時訊息，並從事真實的操作體驗，從而了解建築物的安全性而非模糊的概念或猜測。
3. 應用簡單的表單選取動作即可進行身歷其境的解說與導覽，表現出一些文字或圖片無法表達的部份，讓使用者透過電腦視覺模擬介面對情境化空間產生正確與真實之聯想，藉以提昇傳統溝通方式的效益，有助於幫助使用者瞭解與應用。

### 5.2 建議

本研究未來的研究方向有：

1. 本研究進行 Pushover 分析時，僅針對柱設定塑鉸性質而已，關於短柱效應的考慮，以及扭轉效應所造成的影響，為了簡化分析而予以忽略。若為了使安全監測有更明確的分析結果，可依上述的條件進行更深入的研究與分析。
2. 本文僅研究那裡是結構破壞監測的關鍵位置進行分析與探討，關於監測項目、監測儀器種類放置的最佳化位置等，可將上述的條件加以考慮並進行分析，使安全監測的研究更臻完整。

3. 從 3Ds MAX 匯出模型至 Virtools 前，模型的檔案內容及材質的相關條件必須先行設定完整，尤其是貼覆材質方面在 3Ds MAX 內設定會比在 Virtools 內設定更省下很多步驟與麻煩。另外建構場景使用的多邊形數量必須儘量降低，若欲切換不同場景，最好將模型個別切割再分別匯入，以避免檔案過大拖慢了 Virtools 內互動設定的速度。
4. 為了能讓虛擬實境的互動設定能在多媒體立體設備內呈現完整的 3D 效果，除了降低貼圖的解析度以減少記憶體消耗，模型材質的貼覆最好深淺、明暗、對比、凹凸效果明顯，如此在立體設備內播放與操作時，較能將 3D 遠近效果呈現出來，才能讓人有身歷其境的真實互動感。



## 參考文獻

1. Park, G., D.J. Inman “ Smart bolts: an example of self-healing structures ” , Smart Materials Bulletin , Vol.7, pp.5-8 , 2001.
2. Ettouney, Mohammed M., Raymond Daddazio, Adam Hapij, Amr Aly, “Health monitoring of complex structures” , SPIE ,Vol. 3326, pp.368-379 , 1998.
3. Farrar, Charles R., Hoon Sohn, Michael L. Fugate, Jerry J. Czarnecki, “Integrated structural health monitoring” , SPIE ,Vol.4335, pp.1-8, 2001 .
4. Inaudi, Daniele , “Application of civil structural monitoring in Europe using fiber optic sensors ” , Workshop on Bridge Engineering (3)-Health Monitoring and Diagnostic Techniques of Bridge , CBER , pp. 1--1-10, 2000 .
5. Barrish, Raymond A., Kirk A. Grimmelman, A. Emin Aktan, “Instrumented monitoring of the Commodore Barry Bridge” , SPIE ,Vol.3995, pp.112-116 , 2000 .
6. 張國鎮，林詠彬，陳振川，王倫，「光纖感測器於結構工程之應用」，橋樑工程研討會（三）：橋樑監測預警與診斷技術，國立中央大學土木工程系橋樑工程研究中心，第V— 1-8 頁，2000。
7. 黃吉賢，張坤煌，「電驅動智慧型複合材料」，強化塑膠，第85期，第24-29 頁，2000。
8. 余蔚莉，「建築物結構狀態之自動監測與監測資料之應用」，中國文化大學，碩士論文，2003。
9. 黃南輝，「工程安全監測規範之訂定」，工程安全監測技術研討會，台灣營建研究院，第1-16 頁，1998。
10. Burdea,Grigore. , Coffet,Philippe, Virtual Reality Technology , Wiley, New York, 1994.
11. 謝馥圭，PC 虛擬實境，儒林圖書公司，台北，1996。

12. 製作虛擬實境之相關硬體網站  
<http://www.lit.edu.tw/~eeweb/traverse/link07.htm>
13. J.Hartman., J Wernecke, The VRML 2.0 Handbook, Addison-Wesley, 1996.
14. 廖健羽,「結構物資料庫視覺化查詢系統 VRML 介面」, 國立交通大學, 碩士論文, 2000。
15. 謝東穎,「鋼結構工程 4D 模擬系統之研究」, 國立台灣大學, 碩士論文, 2005。
16. Sun Microsystems Inc.,Java 3D API  
<http://java.sun.com>
17. 夏文洋,「以 HLA 為基礎的 Java 3D 虛擬實境」, 國立中山大學, 碩士論文, 2000。
18. 陳正忠, 吳嘉偉,「善用虛擬實境, 競爭力加碼」, 營建知訊, 第 275 期, 第 27—35 頁, 2005。
19. R.T. Koehnen, Building 3D Geographic Models in VRML:An Experiement Using USGS DEMs to Build Internet Browser Viewable Terrains, University of Minnesota, 2002.
20. 挪威 octage 公司網站  
<http://www.octage.com>
21. 陳國, 陳圓, 張柏根, ” VRML 技術在公路設計中的研究與展望” , 2003。
22. 陳正忠等編著, 虛擬實境之應用研究(一) 基礎環境建立與 RC 建築結構之應用, 中興工程顧問公司, 2003。
23. 邱明祺,「虛擬實境學習環境之研究: 以結構力學之學習為例」, 國立交通大學, 碩士論文, 1998。
24. 陳奕銘,「材料力學虛擬教室」, 國立交通大學, 碩士論文, 1999。
25. 易立民, 周天穎, 袁嵐焜, 辜文元, 陳慧雯, ” 立體建物管理系統—應用 VRML 實現 Web 3D GIS” , 2006。

26. 上海市城市規劃管理局

<http://www.ncg.ac.cn/list.asp?unid=39>

27. 邱茂林，「建築工程模擬之虛擬實境系統之研究」，中國土木水利工程學刊，第十一卷第四期，第 711-722 頁，1999。

28. 李森柟，SAP2000 結構設計實務(V8&V9)，科技圖書，台北，2005。

29. Bentz E.C., M.P.Collins., Response-2000 Reinforced Concrete Section Analysis Using the Modified Compression Field Theory, Department of Engineering, University of Toronto, 2000.

30. 歐特克網站

<http://www.autodesk.com.tw>

31. 康題設計學苑，3Ds MAX 建築外觀與室內設計，松崗，台北，2006。

32. 愛迪斯科技股份有限公司

<http://www.axis3d.com.tw/>

33. 鄭瑞濱，邱暉仁，李森柟，「建物劣化評估與構造殘值之研究介紹」，台灣營建研究院。



表 4.1 柱之斷面尺寸及配筋情形(交通大學-工程二館)

柱形式	柱有效高度 (cm)	柱尺寸		主筋至邊 之長度d (cm)	d' (cm)	混凝土抗 壓強度fc (kgf/cm <sup>2</sup> )	箍筋根數	箍筋面積 A <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> )	主筋		箍筋		
		斷面深度h (cm)	斷面寬度b (cm)						降伏強度 f <sub>yh</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	號數#	降伏強度 f <sub>yh</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	號數#	間距s (cm)
C2	360	50	50	43.595	6.405	210	2	1.42439231	2800	9	2800	3	20
C3	360	50	50	43.75375	6.24625	210	2	1.42439231	2800	8	2800	3	20
C4	360	50	50	43.2775	6.7225	210	2	2.532253	2800	10	2800	4	20
C5	360	50	50	43.2775	6.7225	210	2	2.532253	2800	10	2800	4	20
C6	360	50	50	43.2775	6.7225	210	2	2.532253	2800	10	2800	4	20
C7	360	50	50	43.75375	6.24625	210	2	1.42439231	2800	8	2800	3	20
C8	360	50	50	43.75375	6.24625	210	2	1.42439231	2800	8	2800	3	20
C9	360	50	50	43.595	6.405	210	2	1.42439231	2800	9	2800	3	20
C10	360	50	50	43.595	6.405	210	2	1.42439231	2800	9	2800	3	20
C11	360	50	50	43.75375	6.24625	210	2	1.42439231	2800	8	2800	3	20
C12	360	50	50	43.43625	6.56375	210	2	2.532253	2800	9	2800	4	20
C13	360	50	50	43.43625	6.56375	210	2	2.532253	2800	9	2800	4	20
C14	360	50	50	43.2775	6.7225	210	2	2.532253	2800	10	2800	4	20
C15	360	50	50	43.595	6.405	210	2	2.532253	2800	8	2800	4	20
C16	360	50	50	43.75375	6.24625	210	2	1.42439231	2800	8	2800	3	20
C17	360	60	60	53.595	6.405	210	2	2.532253	2800	8	2800	4	20
C18	360	50	50	43.595	6.405	210	2	2.532253	2800	8	2800	4	20
C19	360	50	50	43.75375	6.24625	210	2	1.42439231	2800	8	2800	3	20
C20	360	50	50	43.2775	6.7225	210	2	2.532253	2800	10	2800	4	20
C21	360	50	50	43.595	6.405	210	2	1.42439231	2800	9	2800	3	20
C22	360	50	50	43.595	6.405	210	2	1.42439231	2800	9	2800	3	20
C23	360	24	40	18.07125	5.92875	210	2	1.42439231	2800	6	2800	3	25
C24	360	24	50	17.9125	6.0875	210	2	1.42439231	2800	7	2800	3	25
C7a	360	65	65	58.75375	6.24625	210	2	1.42439231	2800	8	2800	3	20
C9a	360	50	70	43.595	6.405	210	2	1.42439231	2800	9	2800	3	20
C24a	360	37	50	30.9125	6.0875	210	2	1.42439231	2800	7	2800	3	25



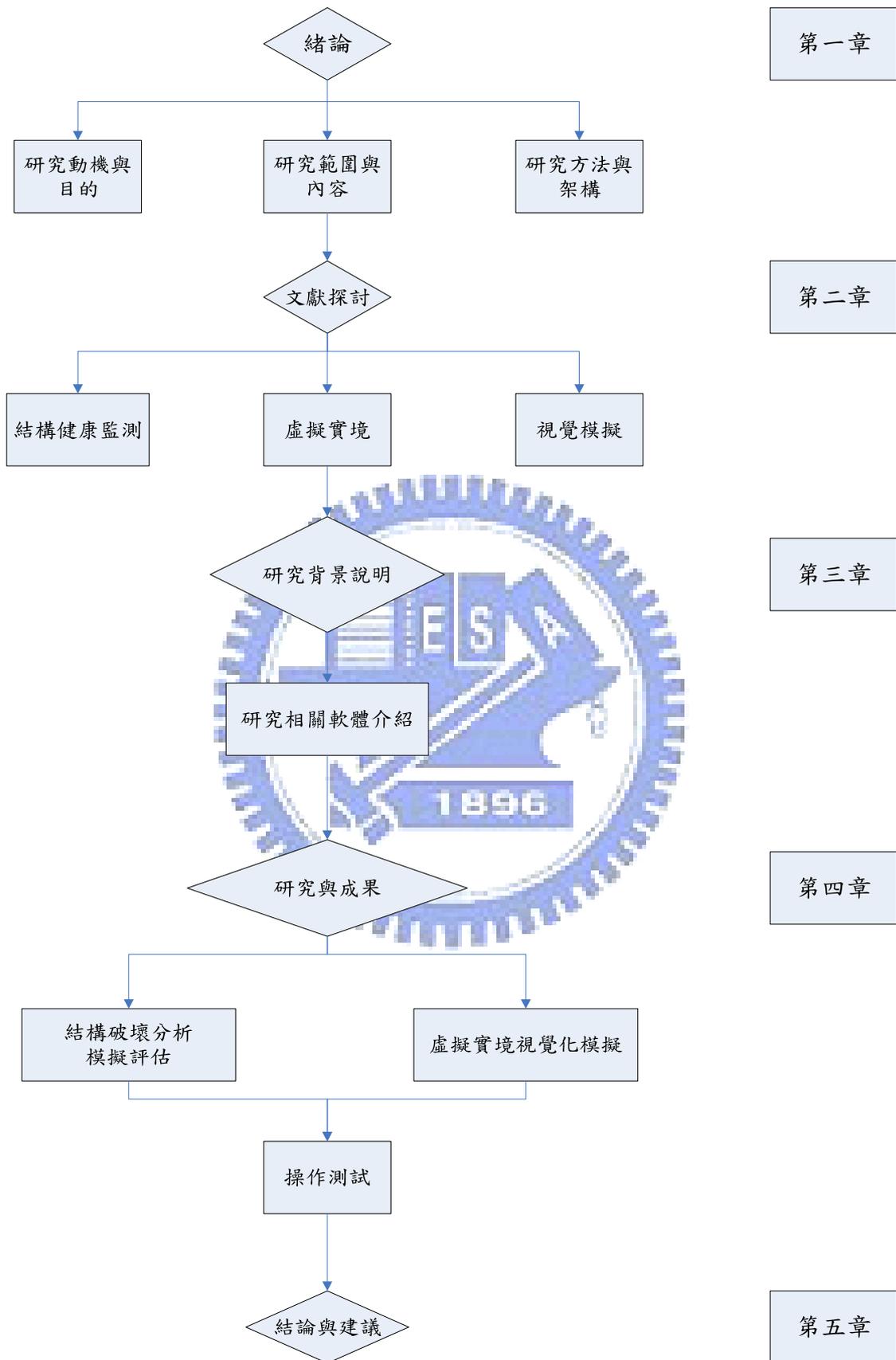


圖 1.1 研究流程圖



圖 2.1 頭盔式顯示器[12]



圖 2.2 力回饋搖桿及控制臂[12]



圖 2.3 3D 滑鼠[12]



圖 2.4 偏光式立體眼鏡[12]

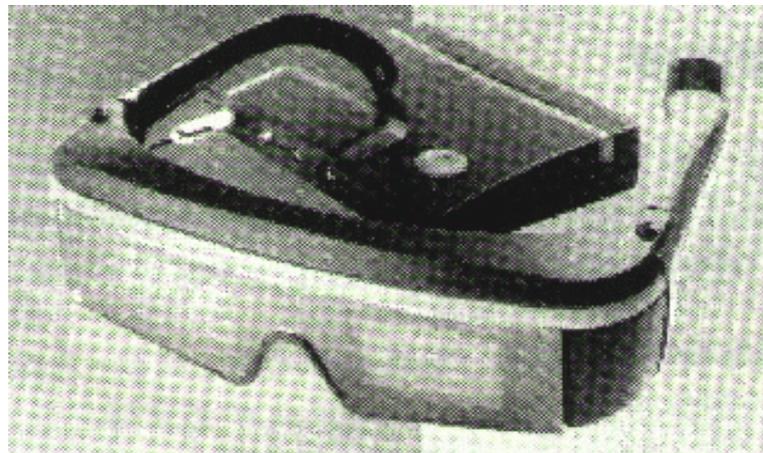


圖 2.5 液晶鏡片的有線眼鏡[12]

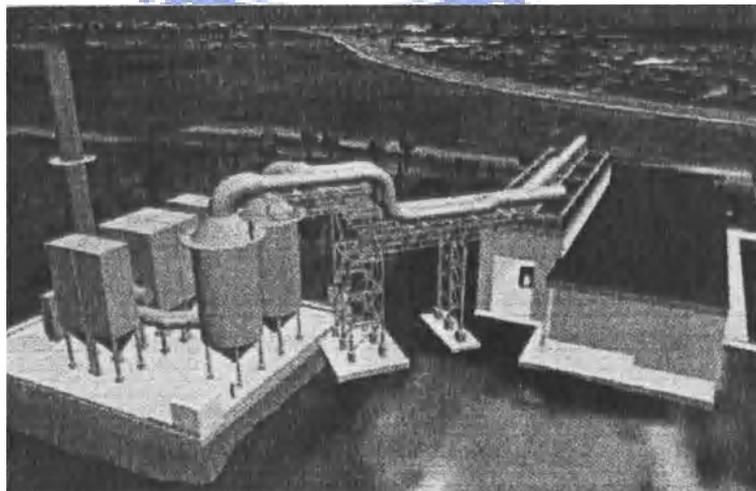


圖 2.6 NIST 之火災研究廠污染控制系統虛擬實境模擬[19]

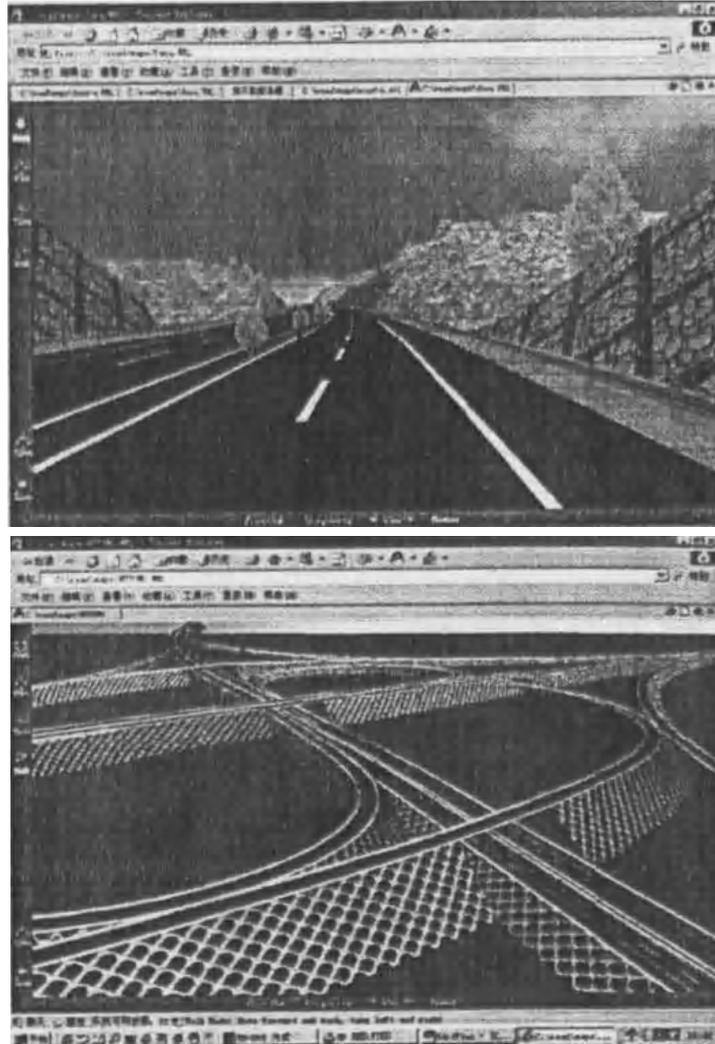


圖 2.7 公路漫遊模擬虛擬系統[21]

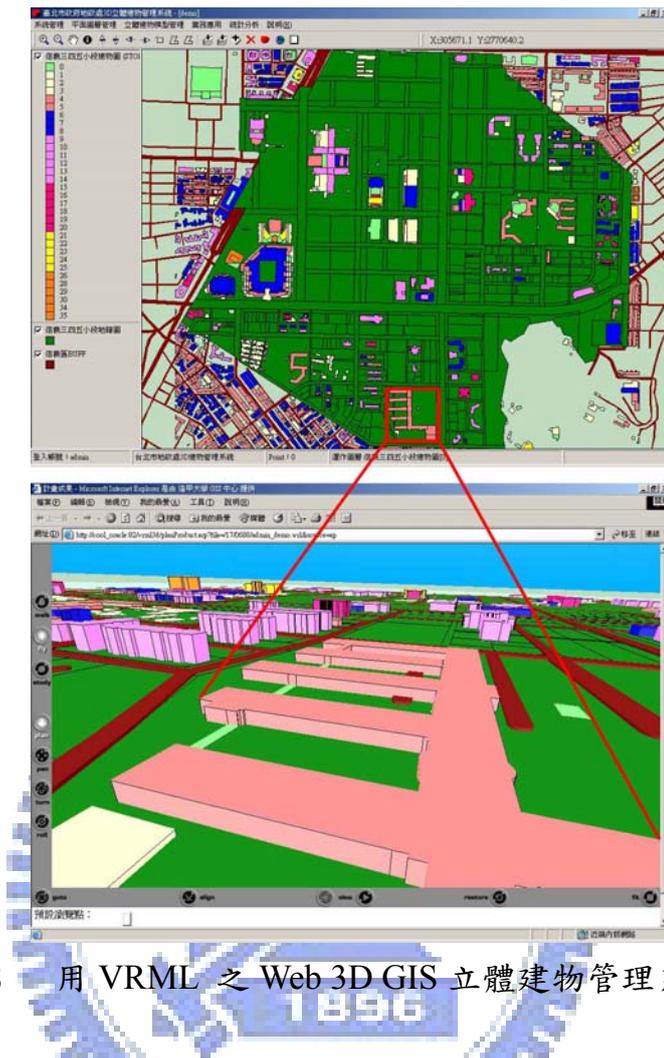


圖 2.8 用 VRML 之 Web 3D GIS 立體建物管理系統[25]



圖 2.9 浦東地區城市規劃的模擬應用[26]

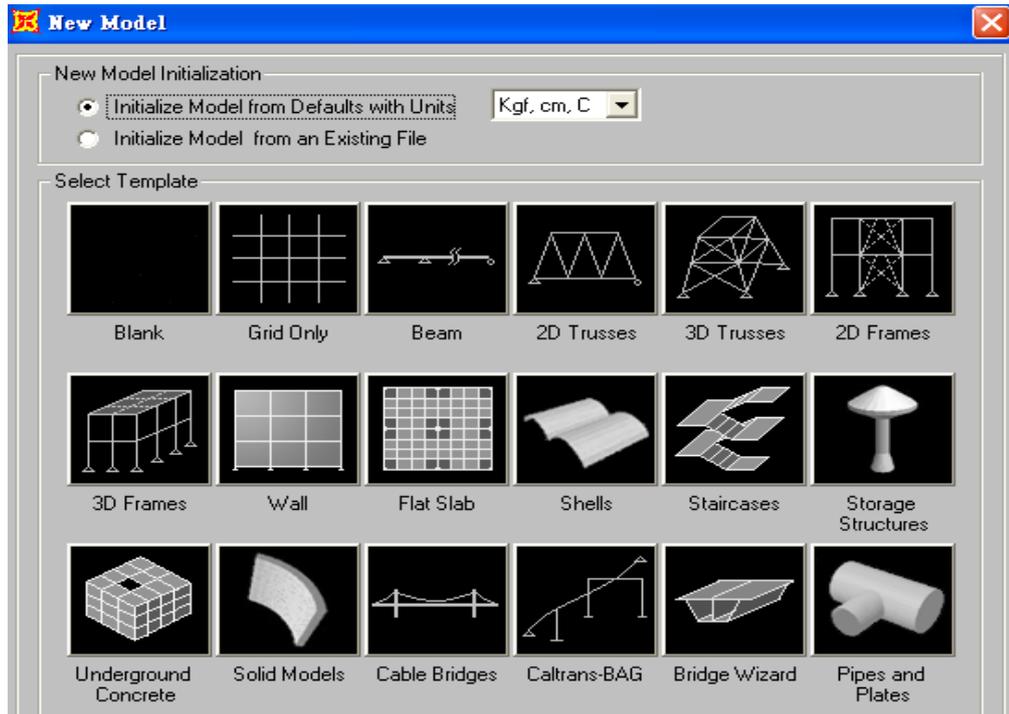


圖 3.1 SAP2000 程式之預設結構模型

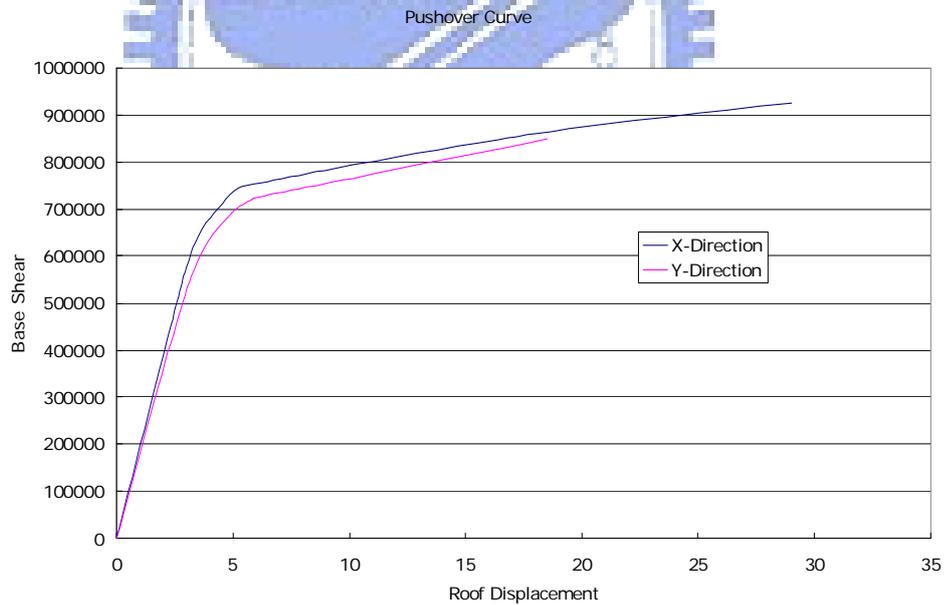


圖 3.2 基底剪力-頂層位移曲線[33]

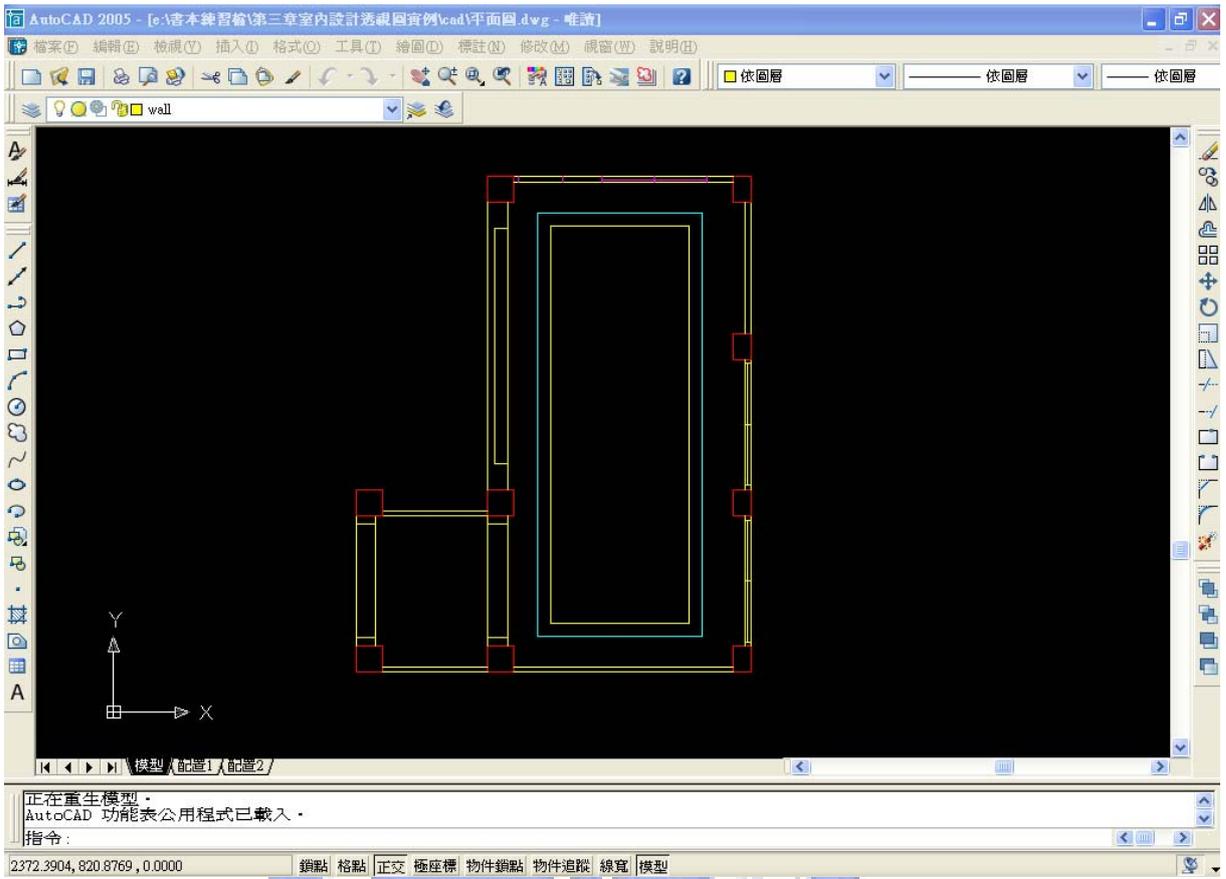


圖 3.3 平面設計圖 [31]

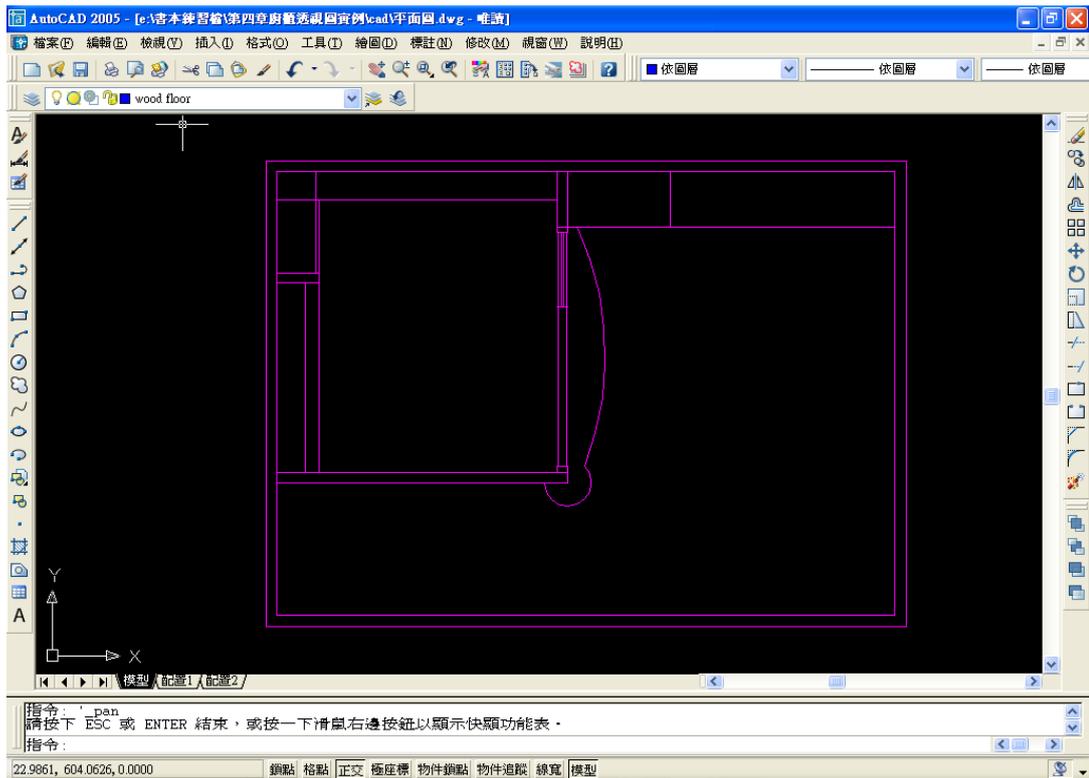


圖 3.4 室內設計裝潢配置圖[31]

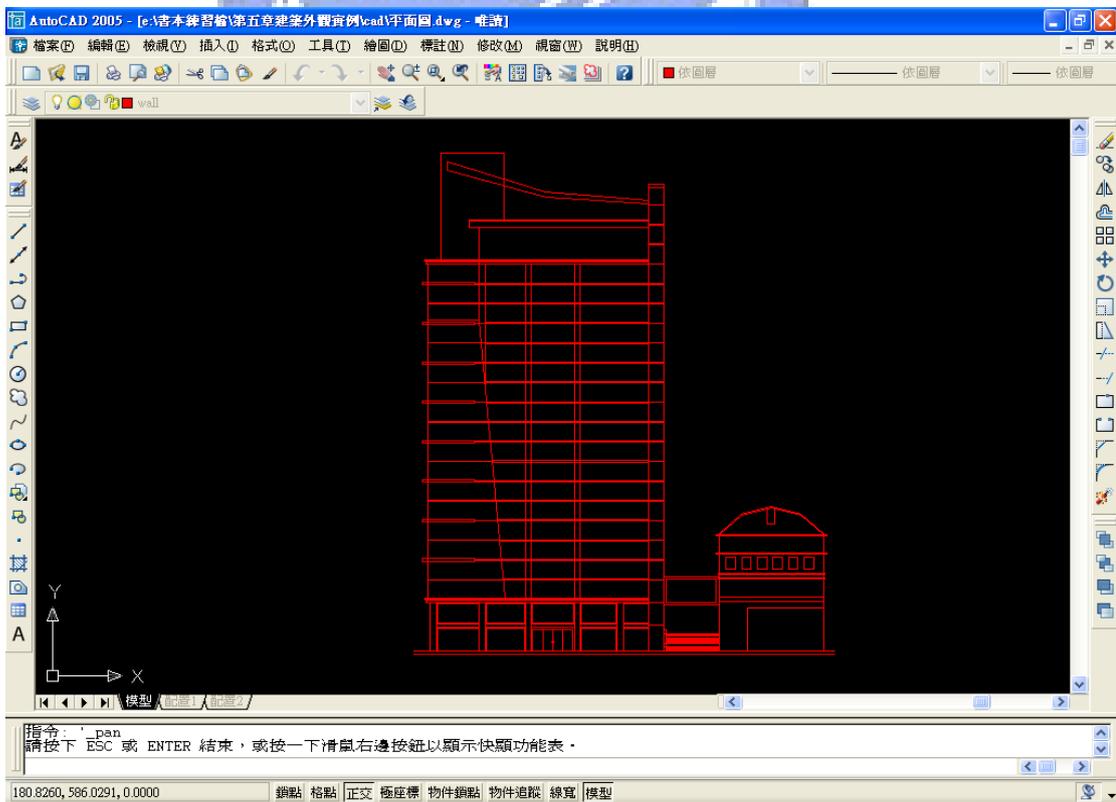


圖 3.5 大樓外觀立面圖[31]

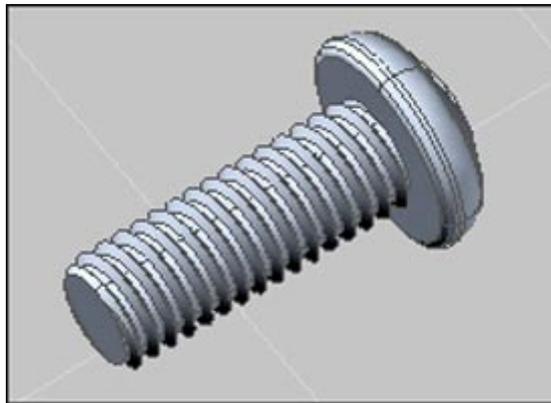


圖 3.6 工業模具圖

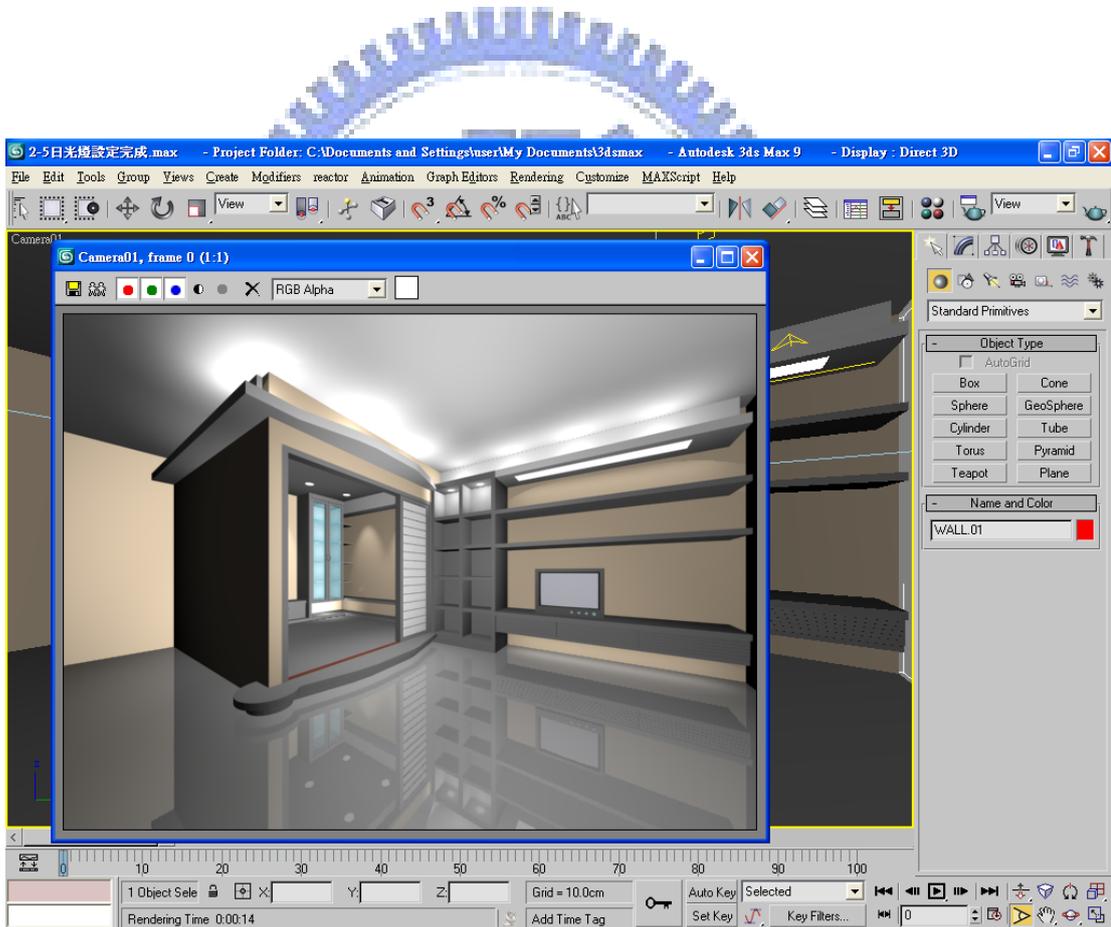


圖 3.7 3Ds MAX—空間與燈光應用 (1) [31]

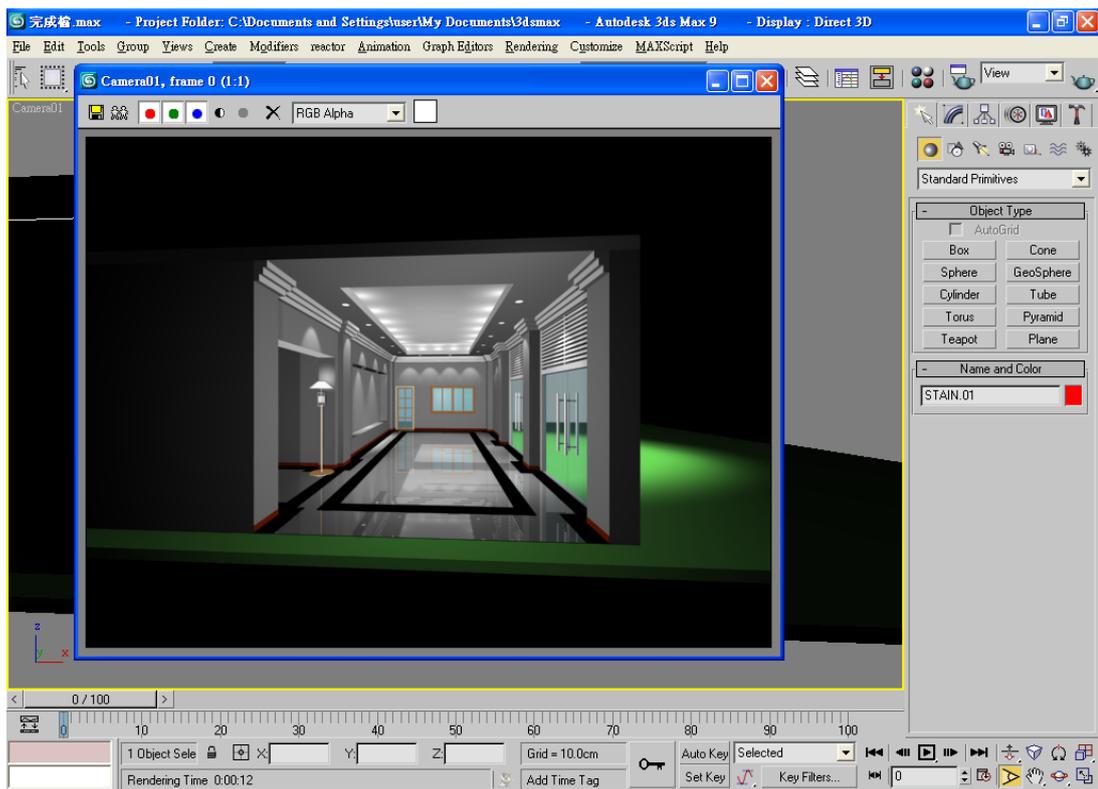


圖 3.8 3Ds MAX—空間與燈光應用 (2) [31]

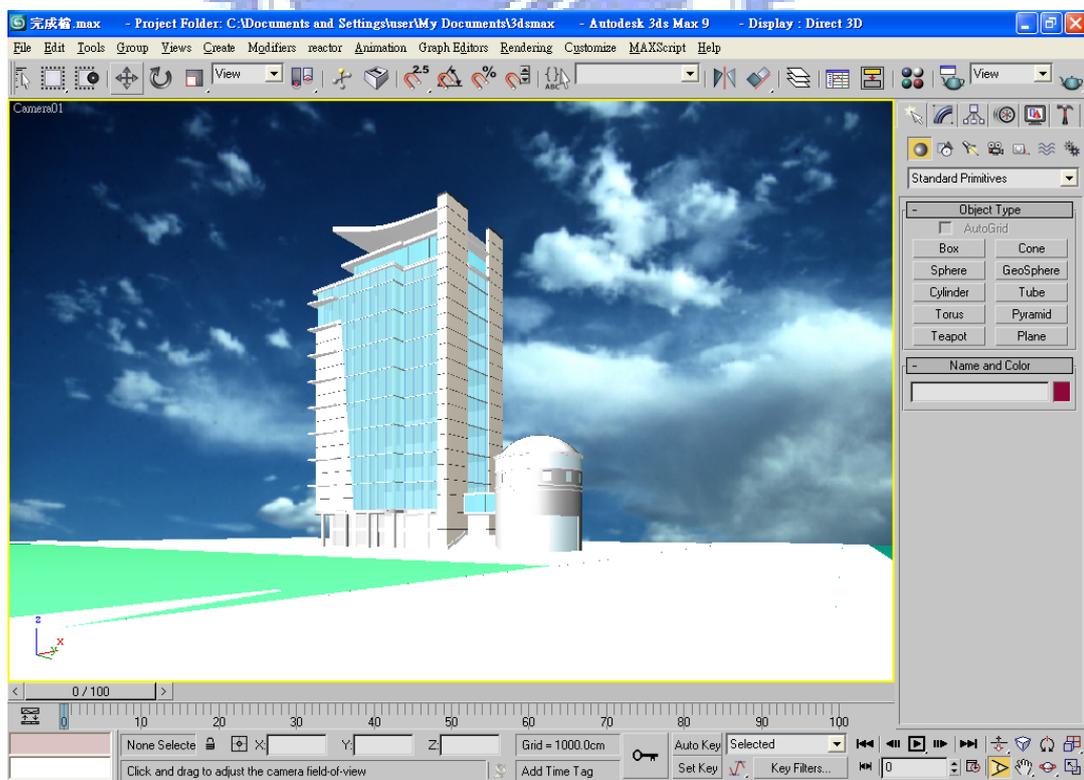


圖 3.9 3Ds MAX 建築外觀—未貼覆材質與彩現[31]



圖 3.10 3Ds MAX 建築外觀—貼覆材質與彩現[31]



圖 3.11 3Ds MAX—空間機能配置[31]



圖 3.12 Arup 公司規劃 30 英里的高速公路及 3.1 英里的 Tappan Zee 大橋[30]

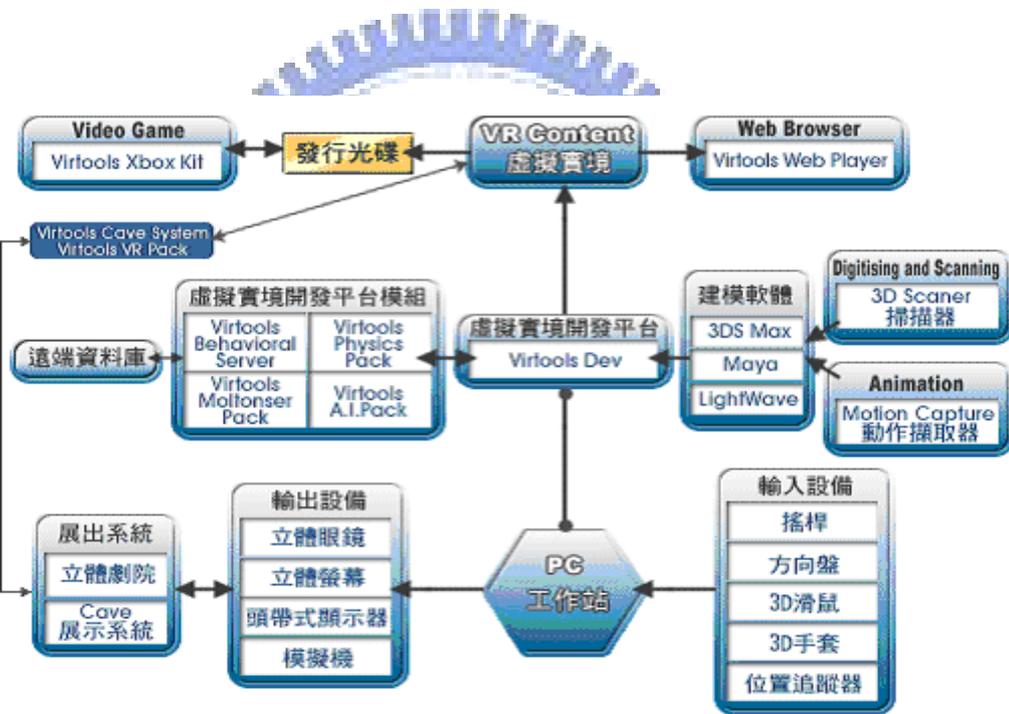


圖 3.13 Virtools 開發環境[32]



圖 3.14 Virtools 開發流程架構圖[32]

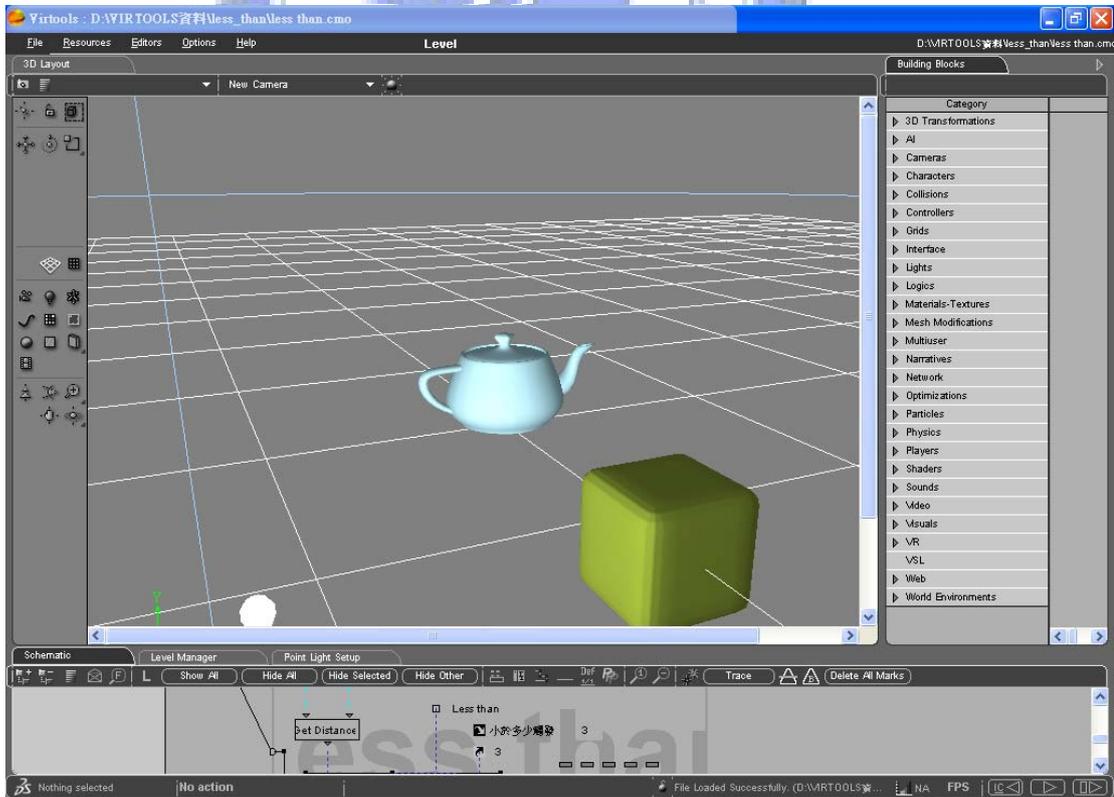


圖 3.15 Virtools 編寫互動介面

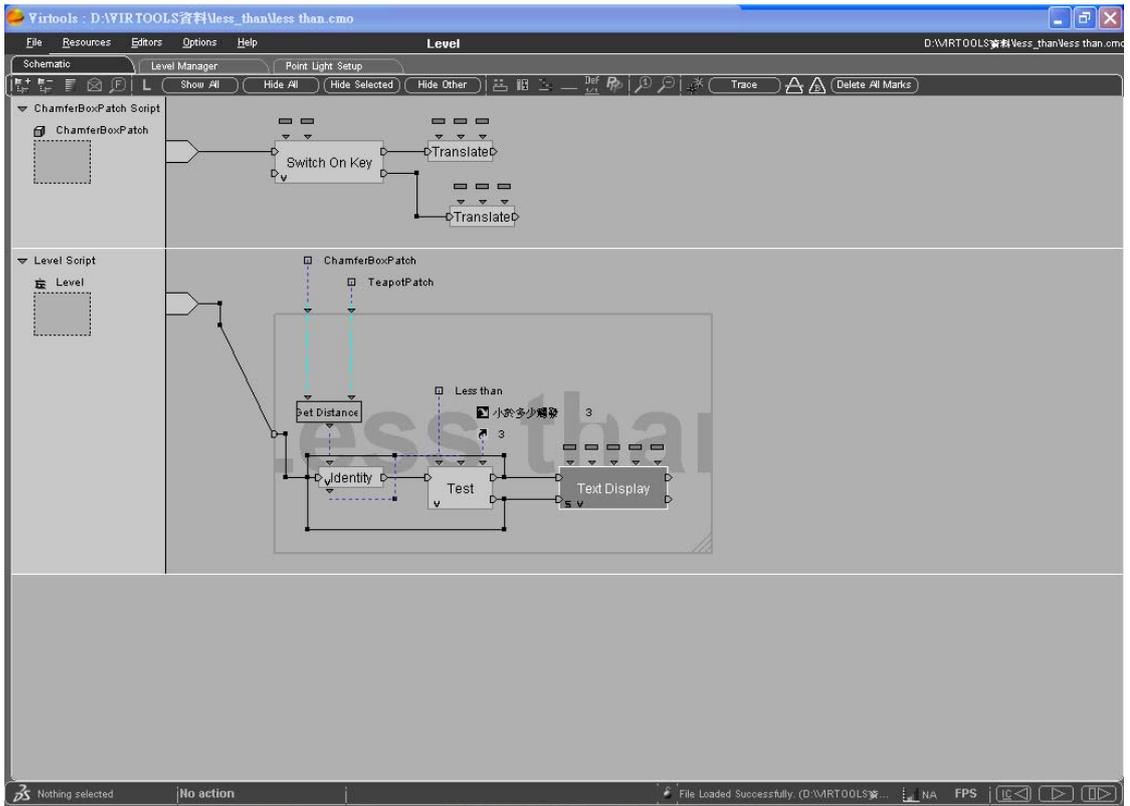


圖 3.16 Virtools 邏輯編輯腳本

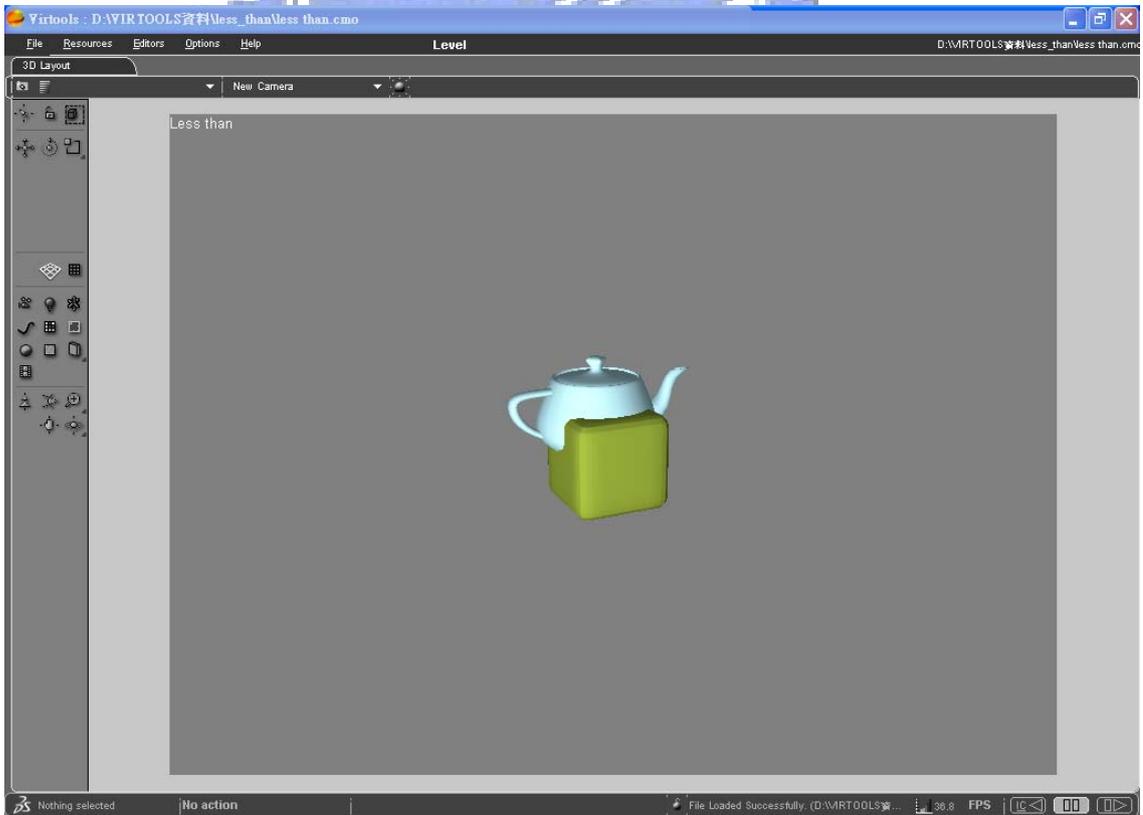
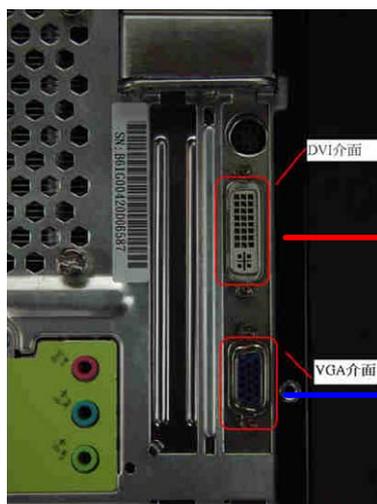


圖 3.17 Virtools 互動體驗呈現

Virtools  
Stereo Pack



PC



DVI介面

VGA介面

立體影像輸出

立體影像輸出 (左眼)

(右眼)

投影機

偏光鏡頭

偏光鏡頭

偏光眼鏡



3D鍍金屬銀幕



### 愛迪斯科技 Virtools 立體展示系統

圖 3.18 立體設備架設示意圖[32]



圖 3.19 雙投影機校正順序(1)



圖 3.20 雙投影機校正(2)

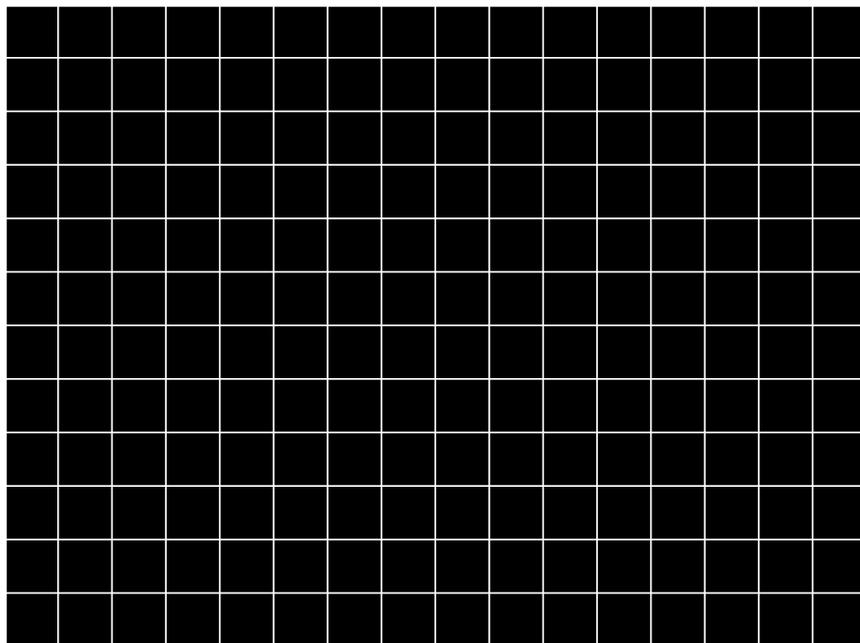


圖 3.21 校正圖型

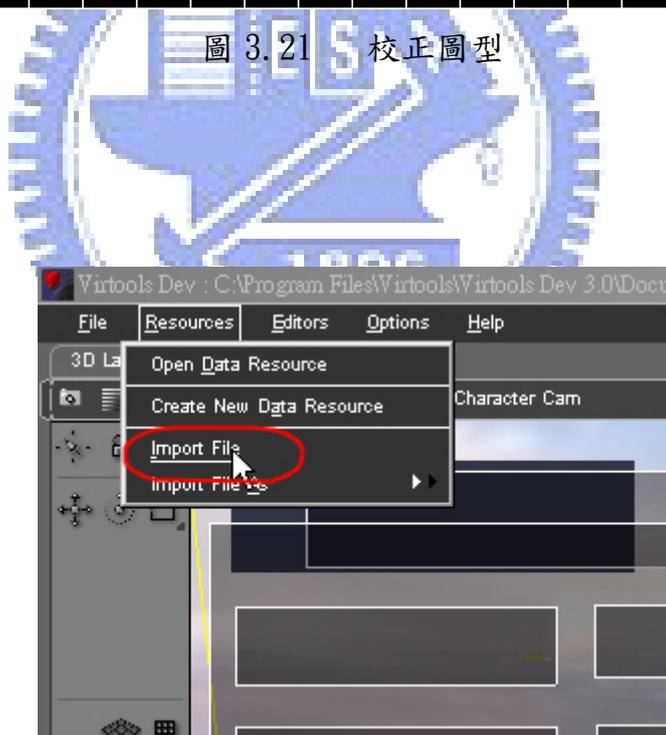


圖 3.22 載入 Virtools 立體模組

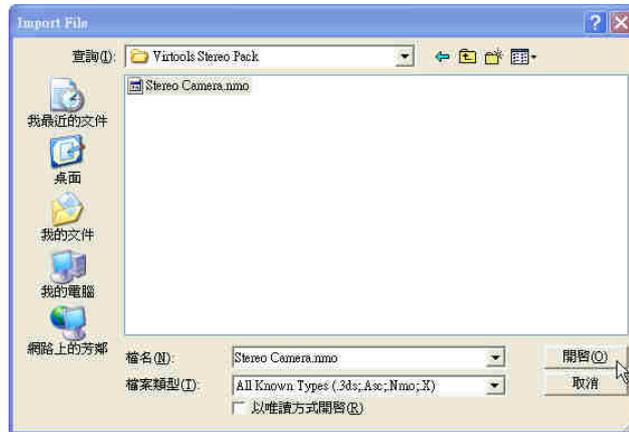


圖 3.23 載入 Stereo Camera.nmo



圖 3.24 N-View 顯示設為水平擴展



圖 3.25 PC 的解析度

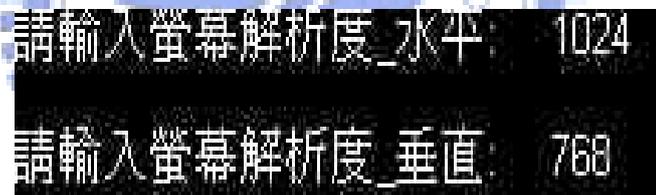


圖 3.26 設定全螢幕單一畫面解析度



圖 3.27 全螢幕播放設為 2048 x 768

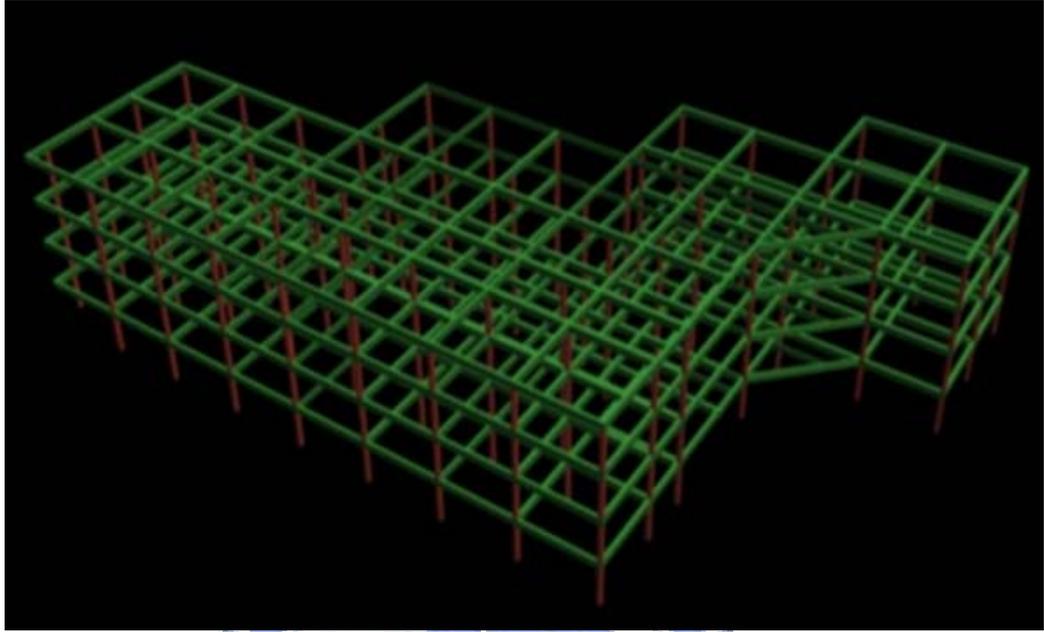


圖 4.1 交通大學-工程二館之建築全景



圖 4.2 交通大學-工程二館之建築平面圖

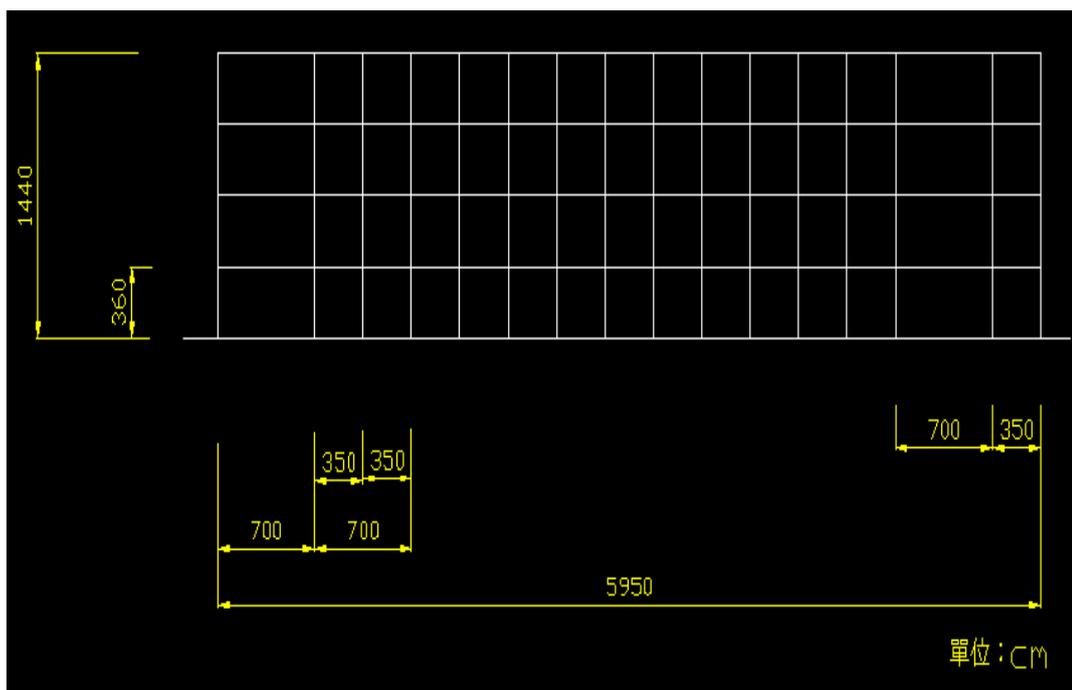


圖 4.3 交通大學-工程二館之建築立面圖

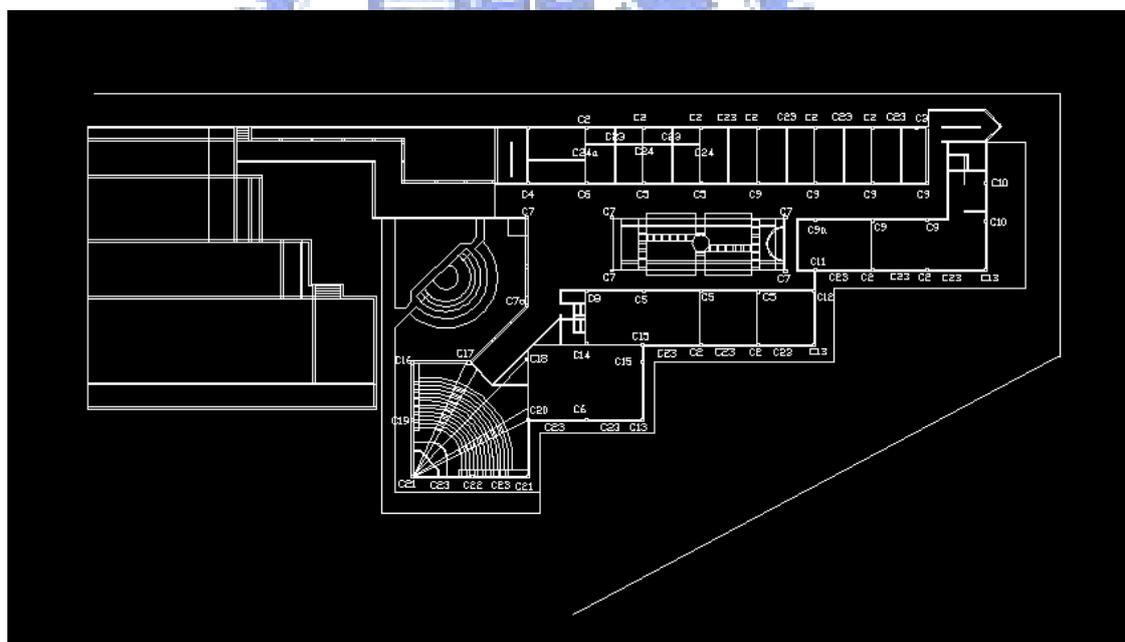


圖 4.4 柱編號對照之平面圖

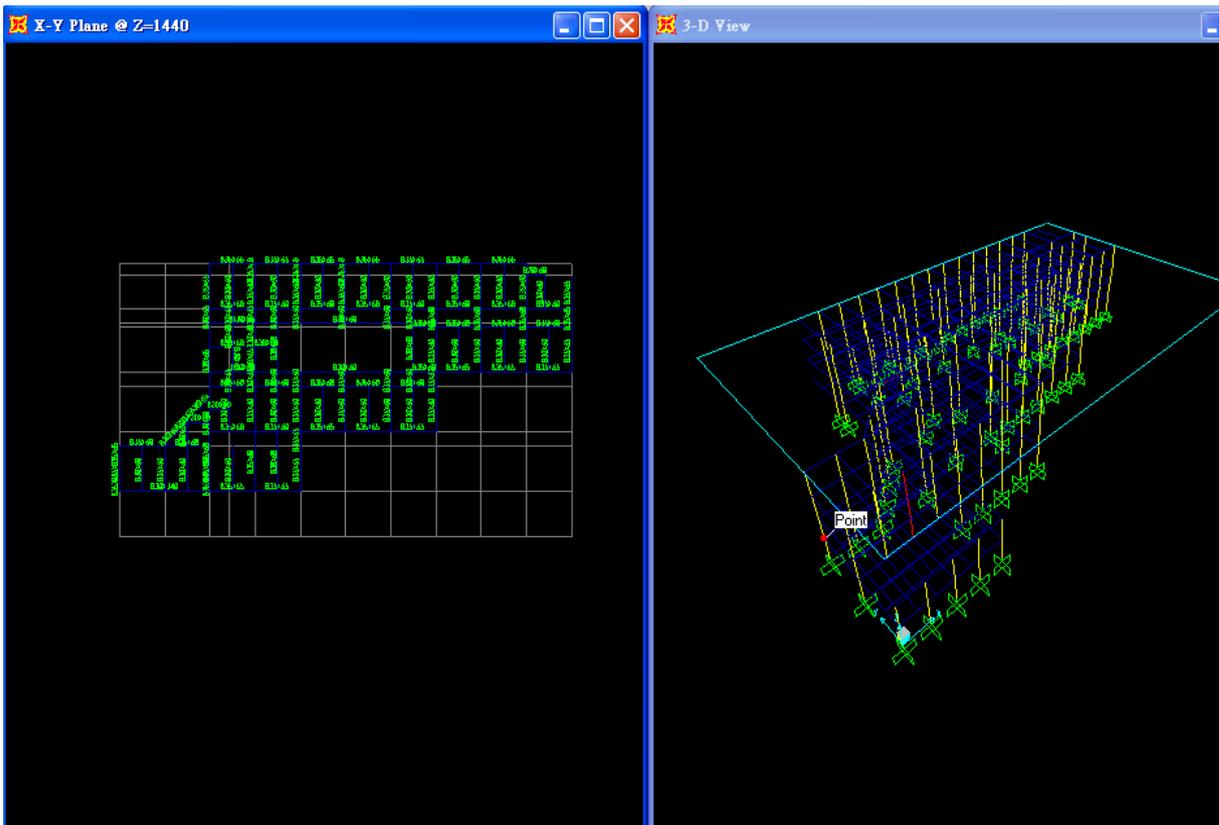


圖 4.5 SAP2000 程式建立模型

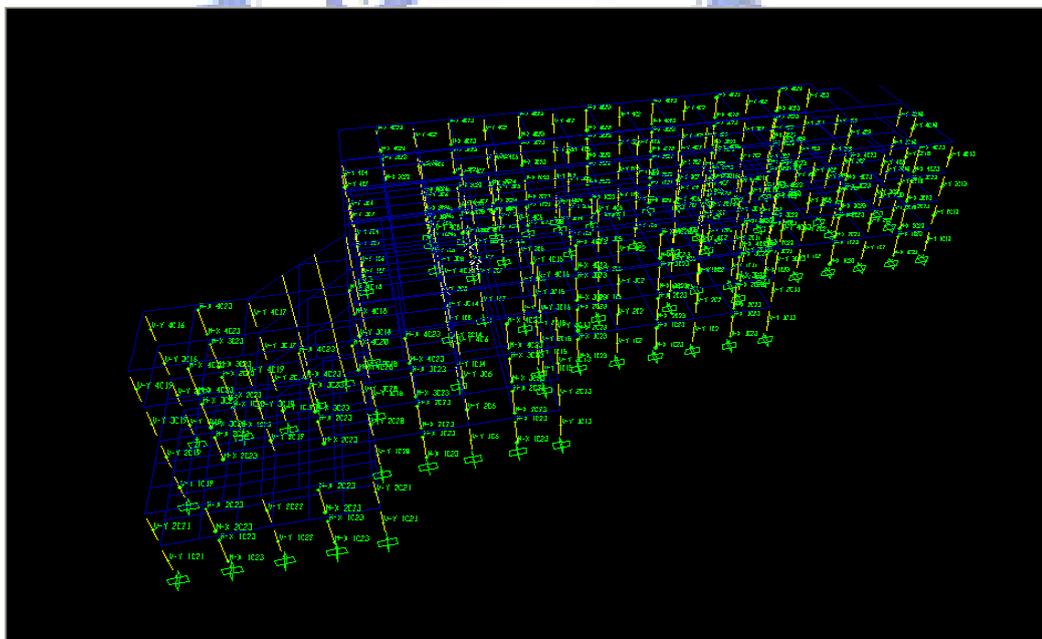


圖 4.6 SAP2000 程式建立塑鉸

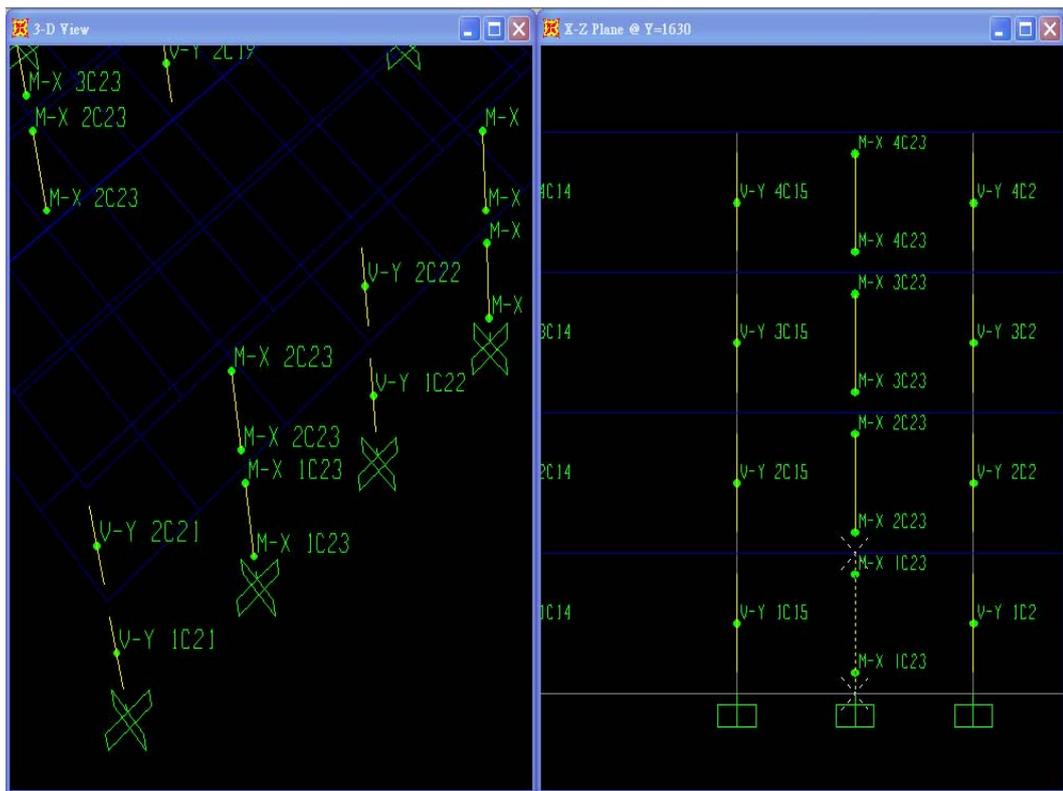


圖 4.7 彎矩與剪力破壞塑鉸建立位置

Response-2000 - c16

File Define Loads Solve View Options Help

Geometric Properties

	Gross Conc.	Trans (n=14.66)
Area (cm <sup>2</sup> )	2500.0	3613.6
Inertia (cm <sup>4</sup> ) x 10 <sup>8</sup>	520.8	799.9
y <sub>t</sub> (cm)	25.0	25.0
y <sub>b</sub> (cm)	25.0	25.0
S <sub>t</sub> (cm <sup>3</sup> )	20833.3	31997.0
S <sub>b</sub> (cm <sup>3</sup> )	20833.3	31997.0

Crack Spacing  
2 x dist + 0.1 d<sub>b</sub> / ρ

Loading (N,M,V + dN,dM,dV)  
0.0 , 0.0 , 0.0 + 0.0 , 1.0 , 0.0

**Concrete**

f'<sub>c</sub> = 210 kg/cm<sup>2</sup>  
a = 1.90 cm  
f<sub>i</sub> = 21.0 kg/cm<sup>2</sup>  
ε'<sub>c</sub> = 3.00 mm/m

**Rebar**

f<sub>y</sub> = 2.80  
ε<sub>s</sub> = 30.0 mm/m

5 - #8  
#4 @ 20.00 cm  
#4 @ 20.00 cm  
3 layers of #8  
#4 @ 20.00 cm  
5 - #8

All dimensions in centimeters  
Clear cover to transverse reinforcement = 3.1

Enter Title Here

2007

Cross Section

**RESPONSE**

圖 4.8 Response-2000 斷面資料設立完成圖

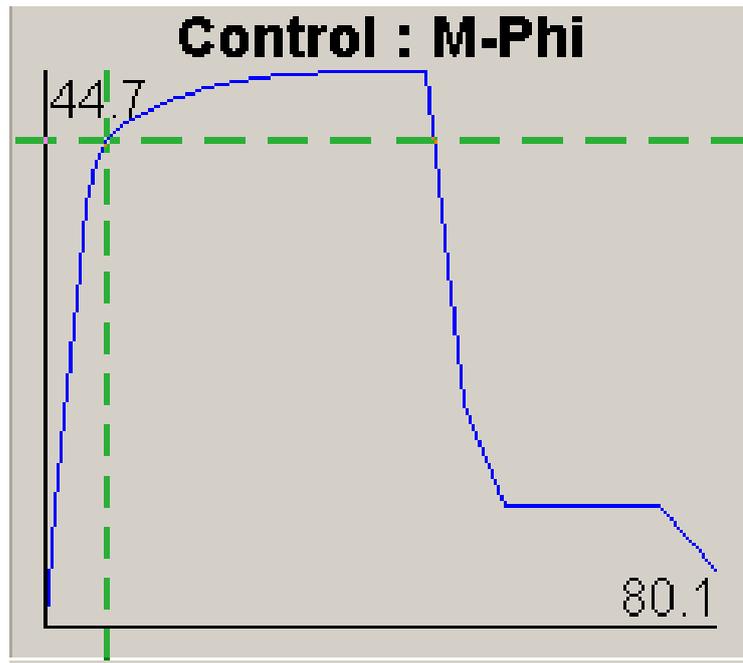


圖 4.9 斷面彎矩—曲率的關係圖

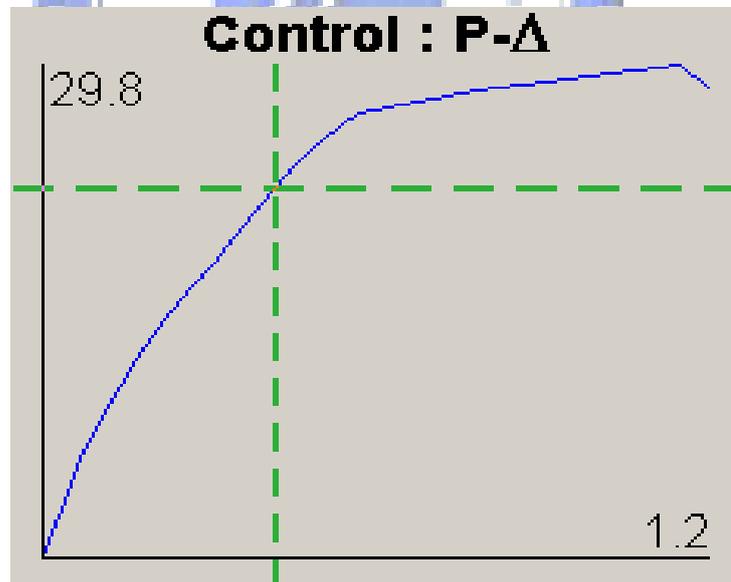


圖 4.10 斷面剪力—位移的關係圖

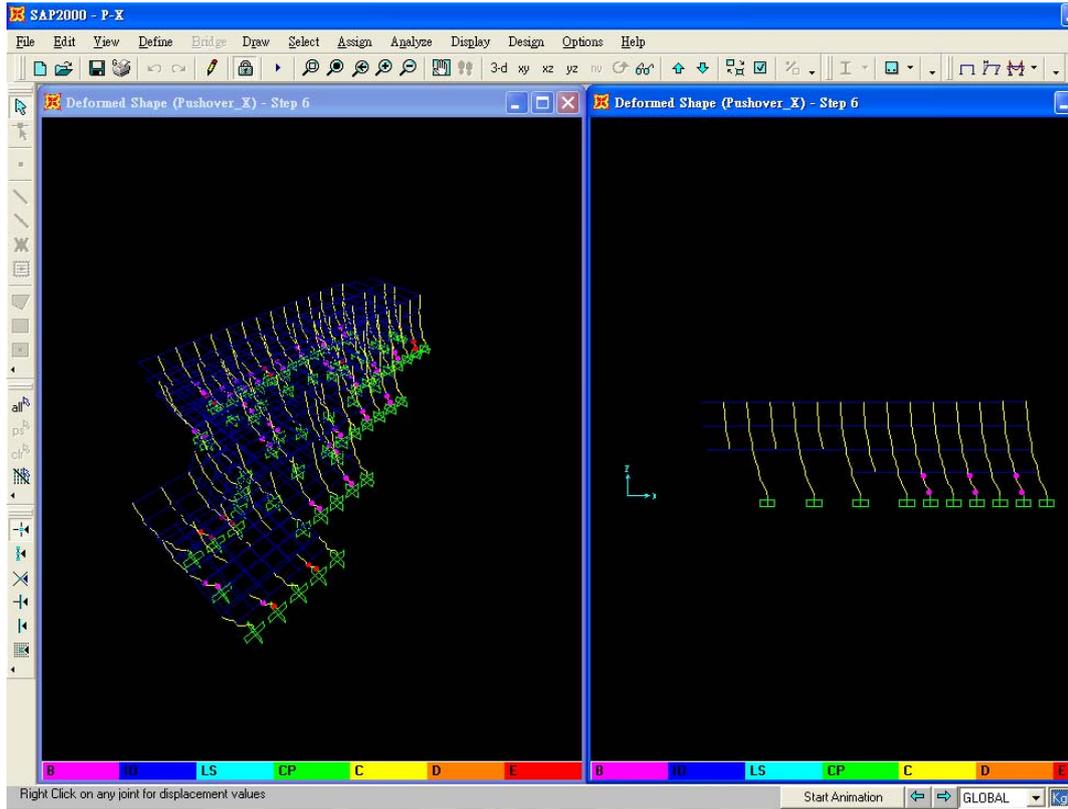


圖 4.11 Pushover X 方向分析塑鉸產生模型

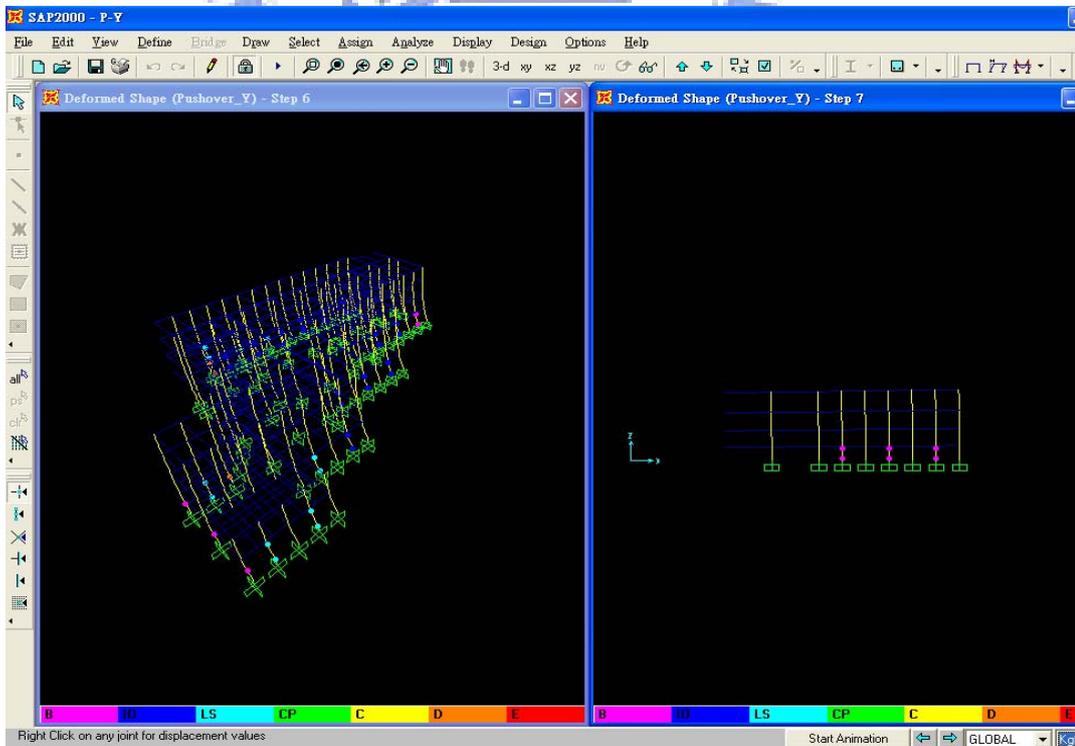


圖 4.12 Pushover Y 方向分析塑鉸產生模型

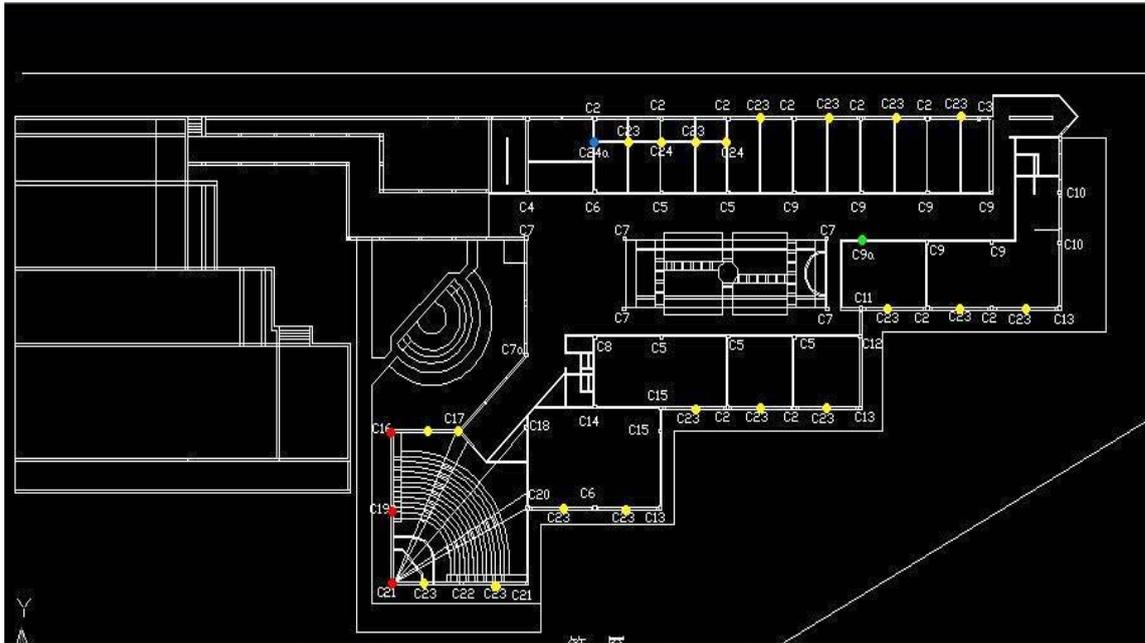


圖 4.13 Y 方向推覆分析塑鉸位置圖

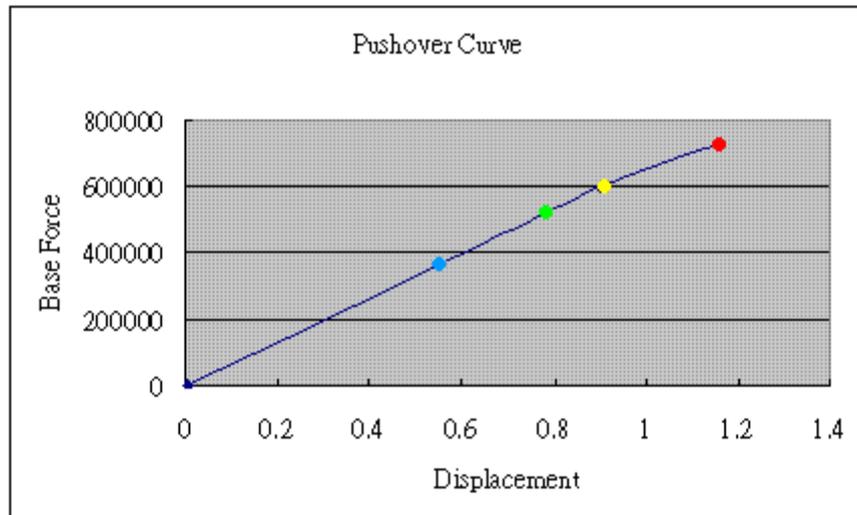


圖 4.14 Pushover 容量曲線圖

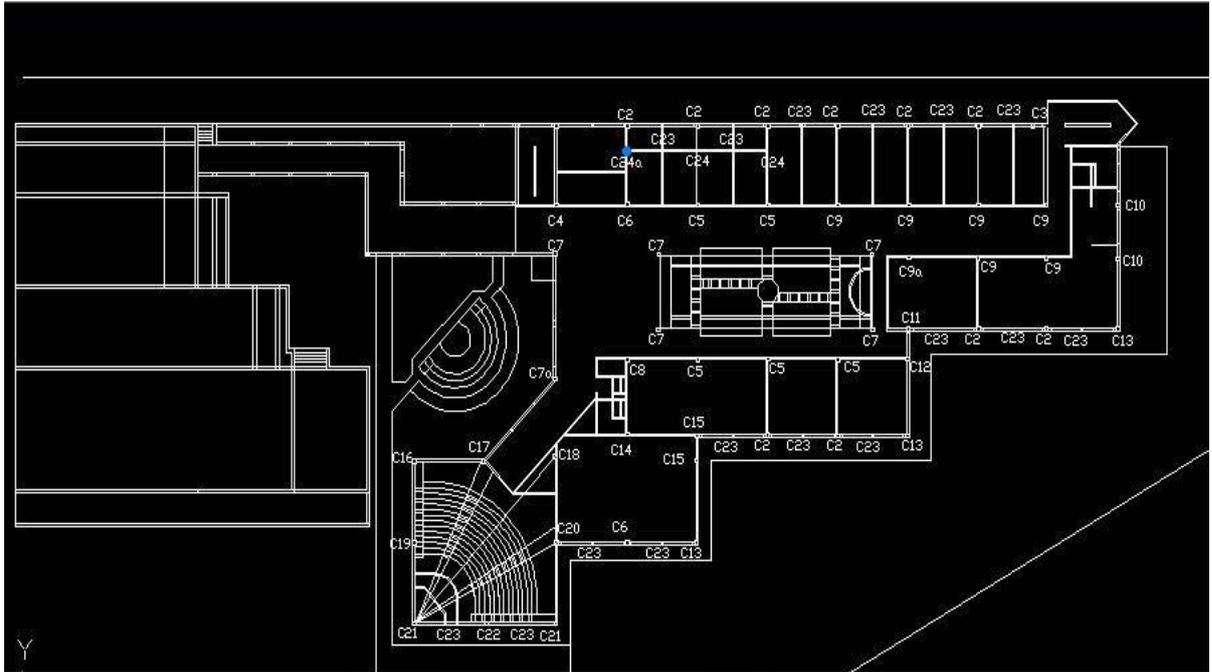


圖 4.15 第一階段塑鉸產生位置—藍點

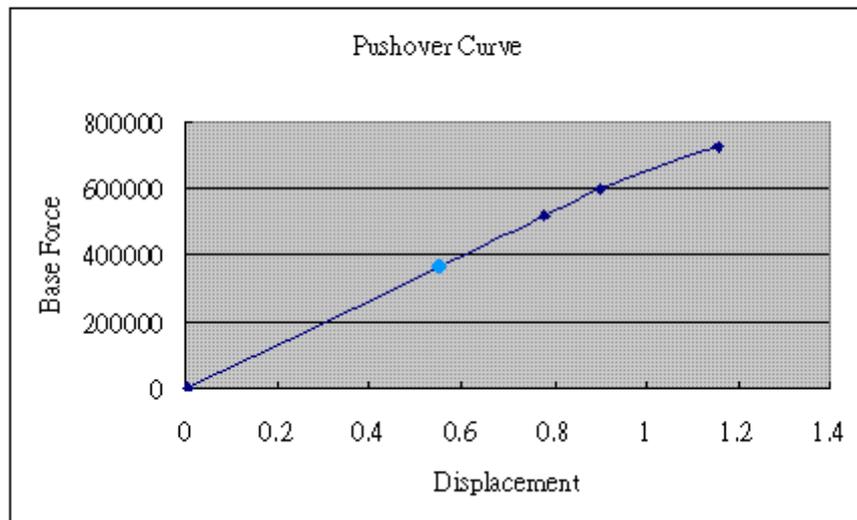


圖 4.16 第一階段容量曲線圖—藍點



圖 4.17 第二階段塑鉸產生位置—綠點

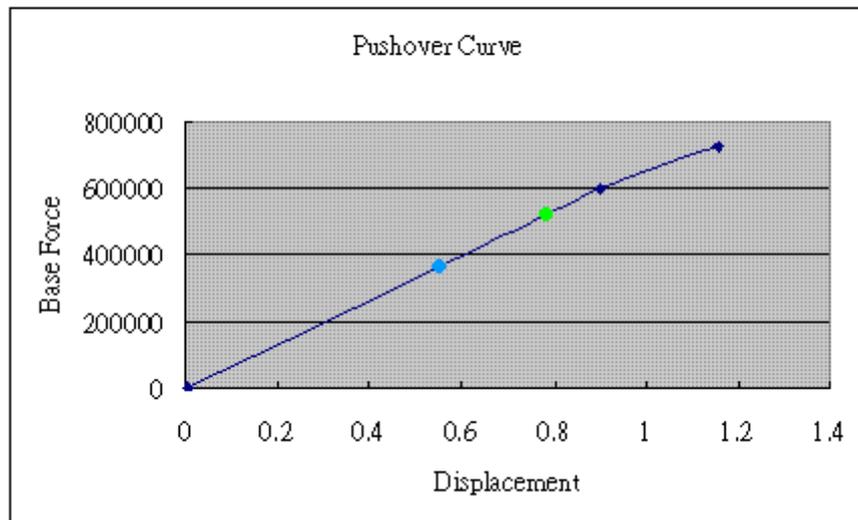


圖 4.18 第二階段容量曲線圖—綠點

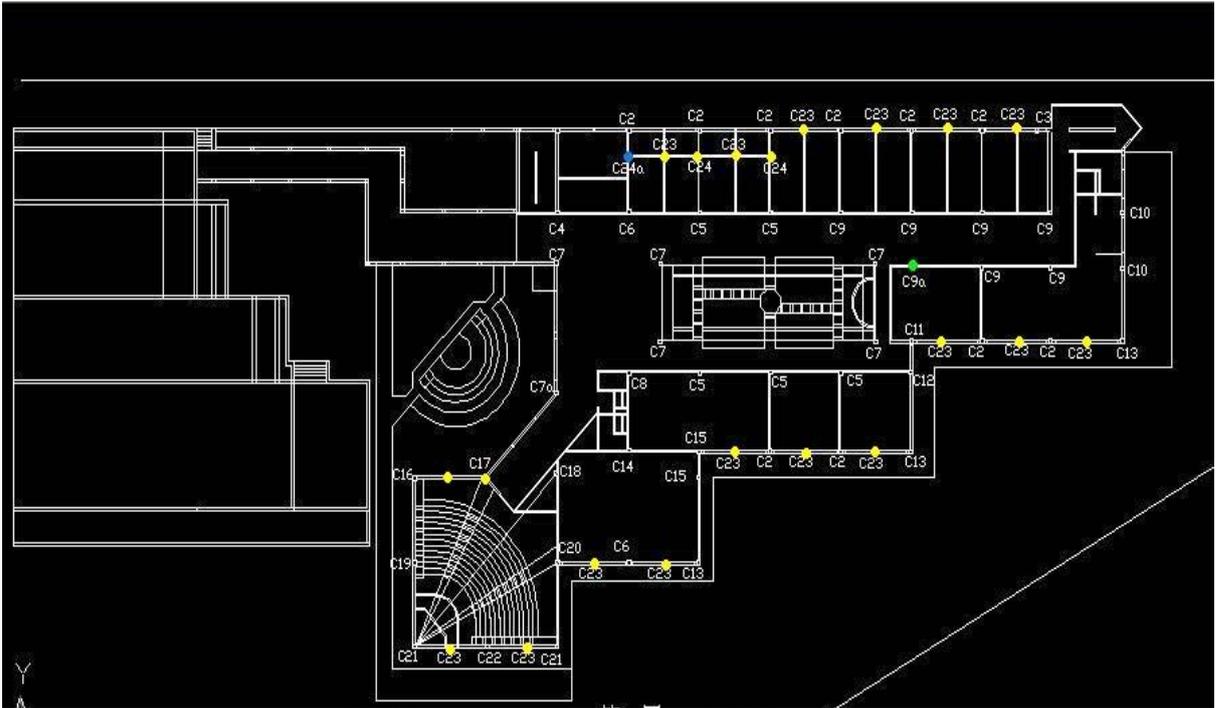


圖 4.19 第三階段塑鉸產生位置—黃點

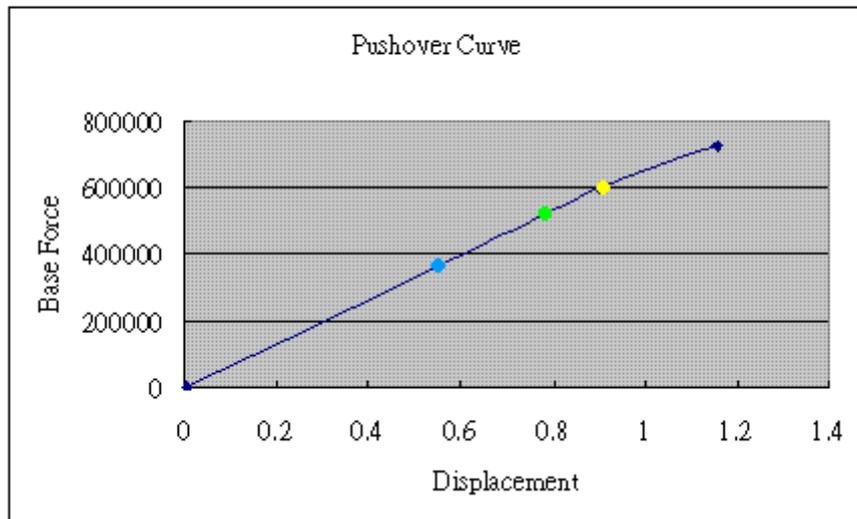


圖 4.20 第三階段容量曲線圖—黃點



圖 4.21 第四階段塑鉸產生位置—紅點

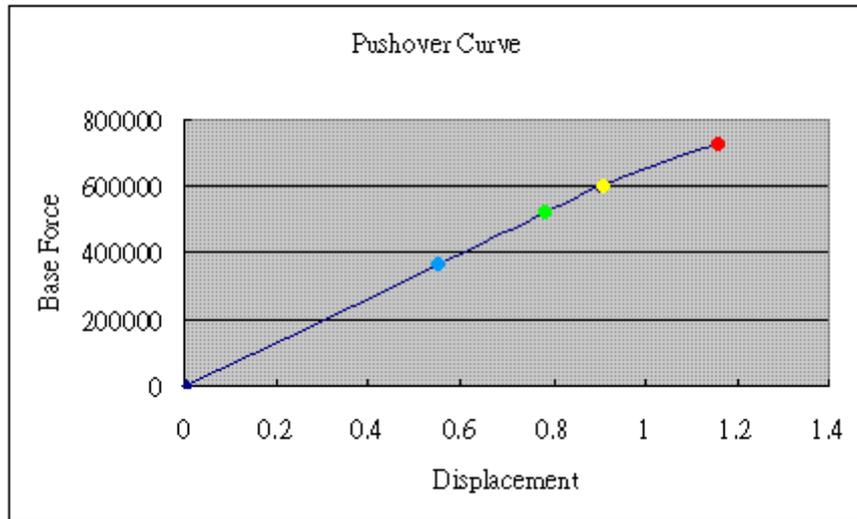


圖 4.22 第四階段容量曲線圖—紅點

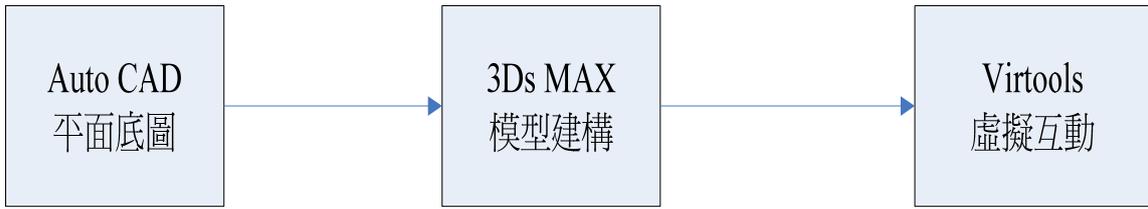


圖 4.23 模擬製作流程圖

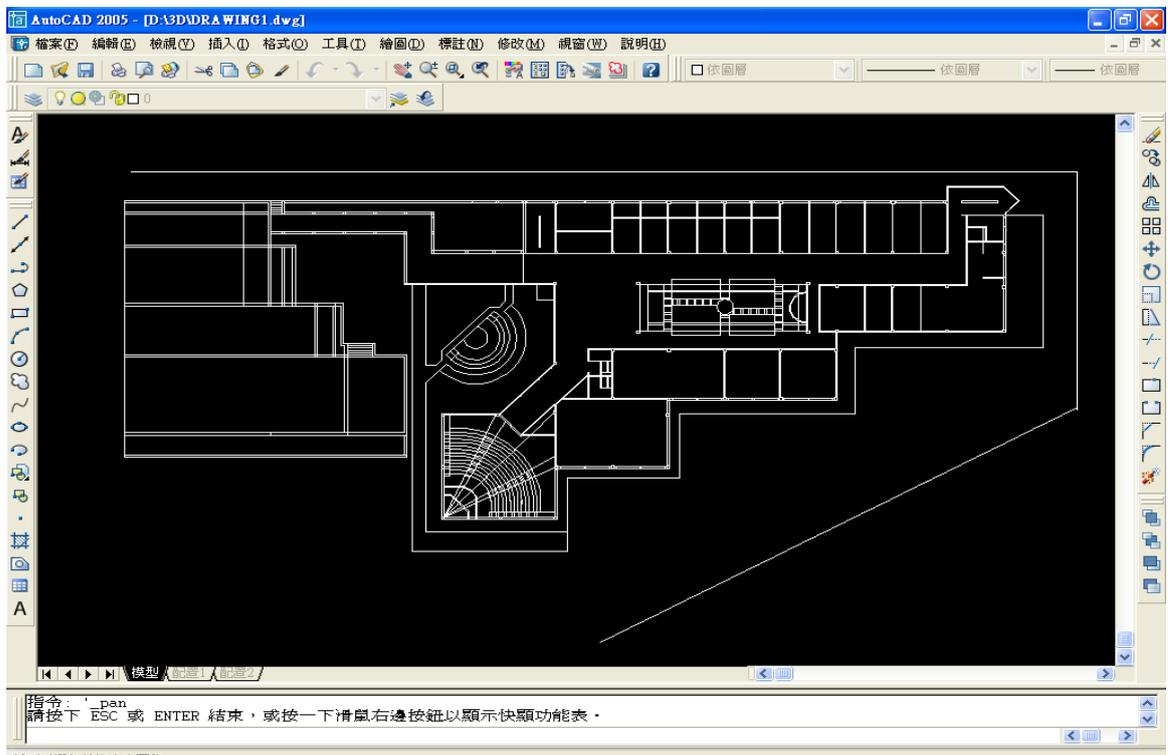


圖 4.24 工程二館平面圖

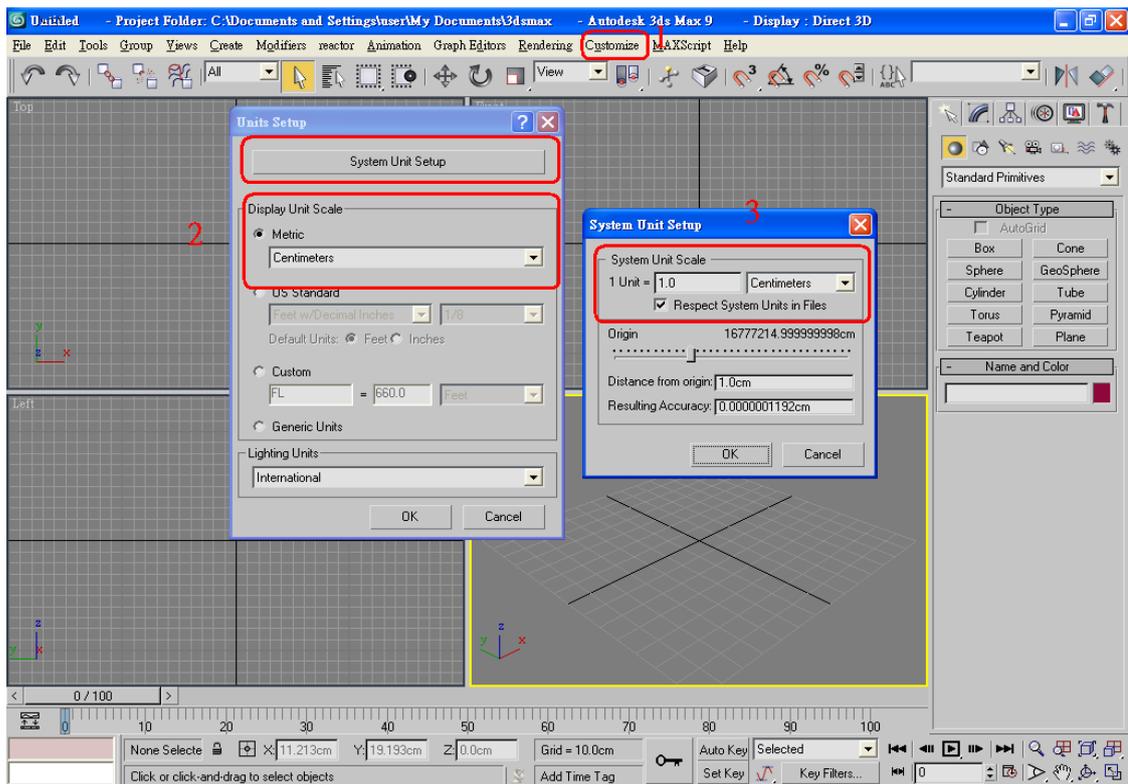


圖 4.25 設定對應單位

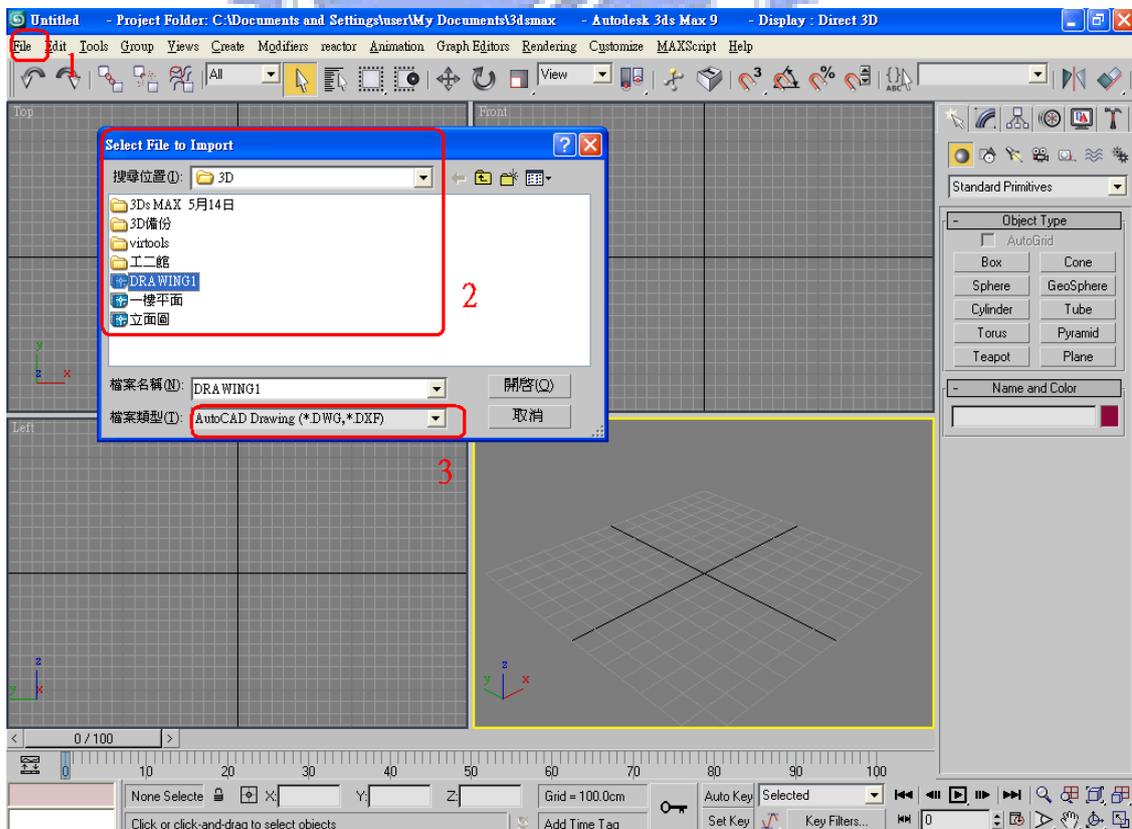


圖 4.26 Auto CAD 匯入 3Ds MAX

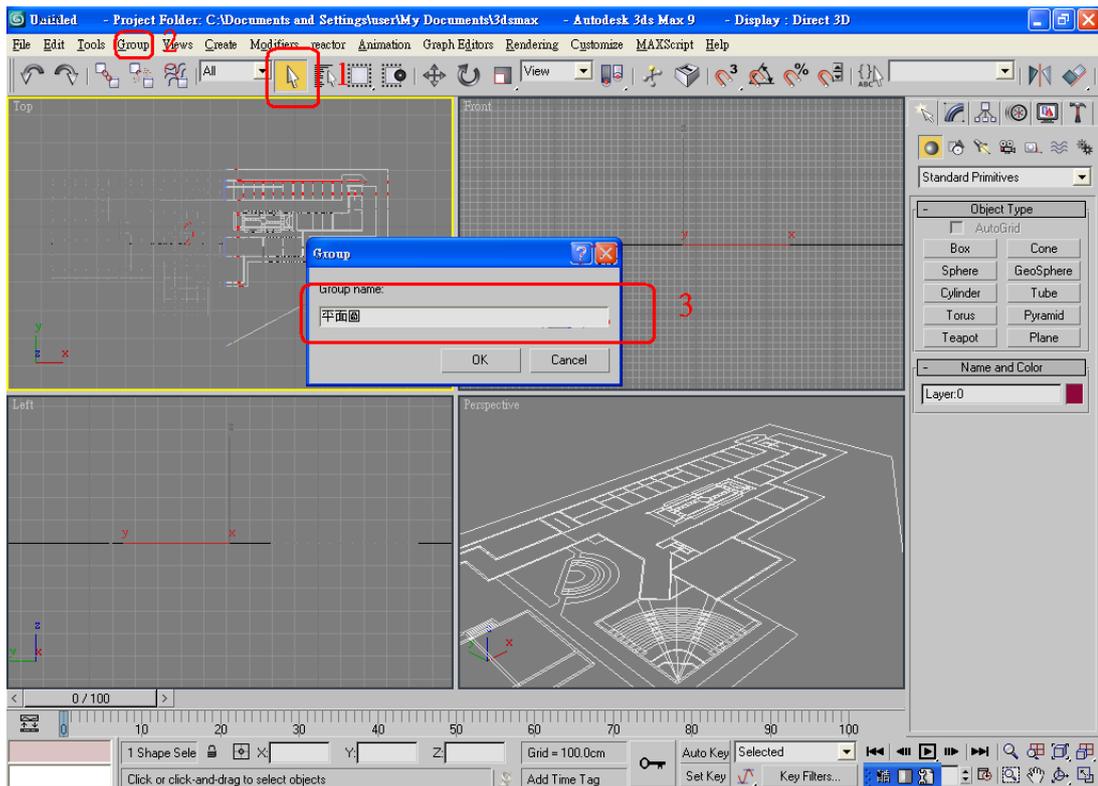


圖 4.27 設定群組

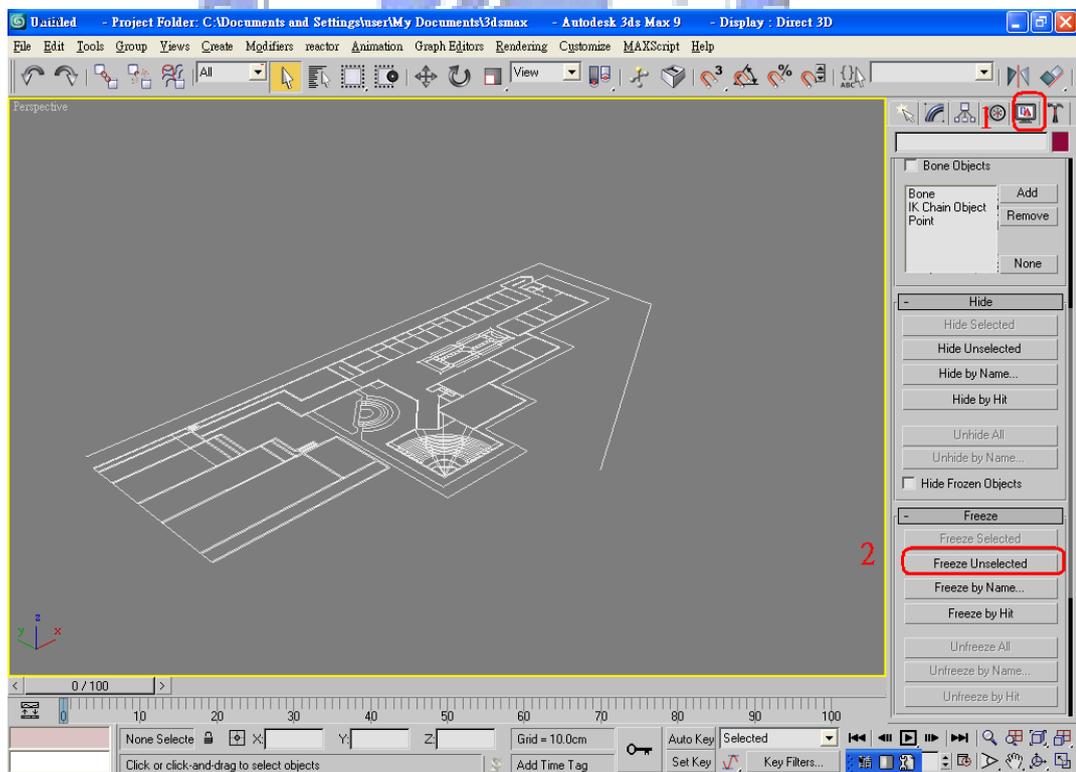


圖 4.28 凍結平面圖

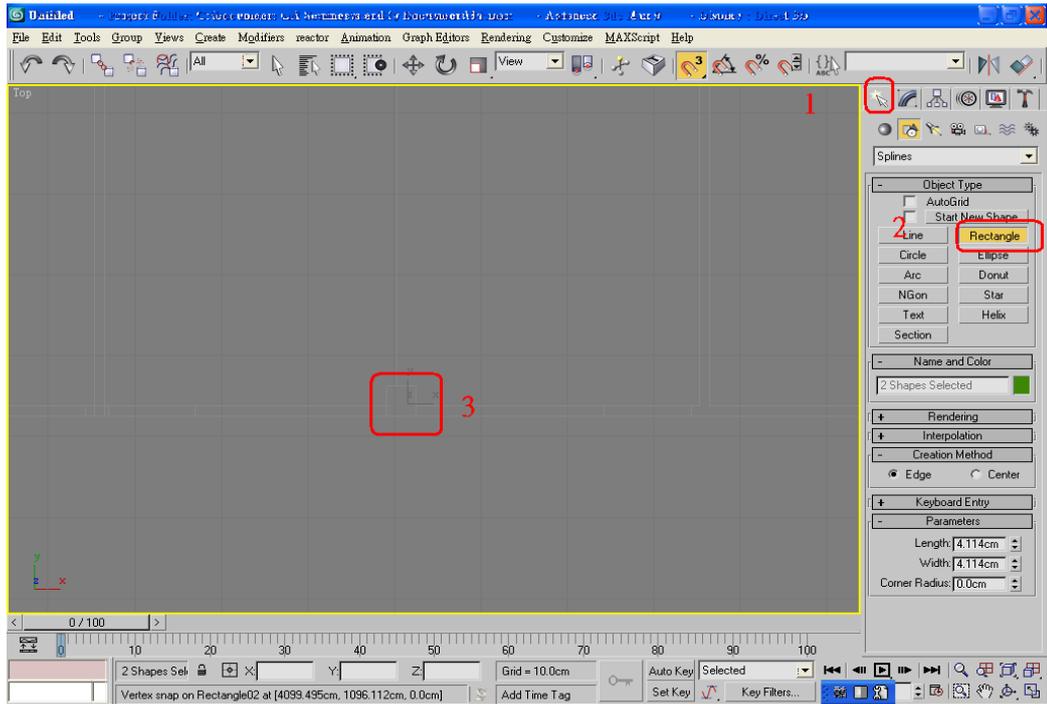


圖 4.29 3D 工程二館繪製一柱 (2D 平面拖曳)

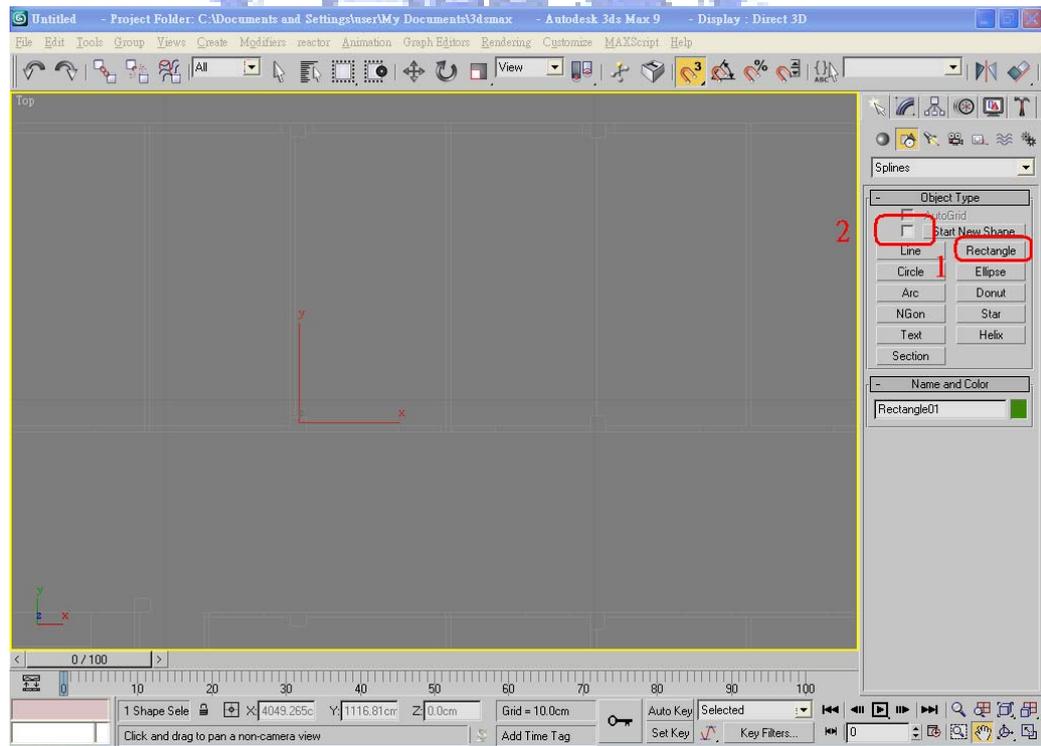


圖 4.30 3D 工程二館繪製一柱 (取消勾選 Start New Shape)

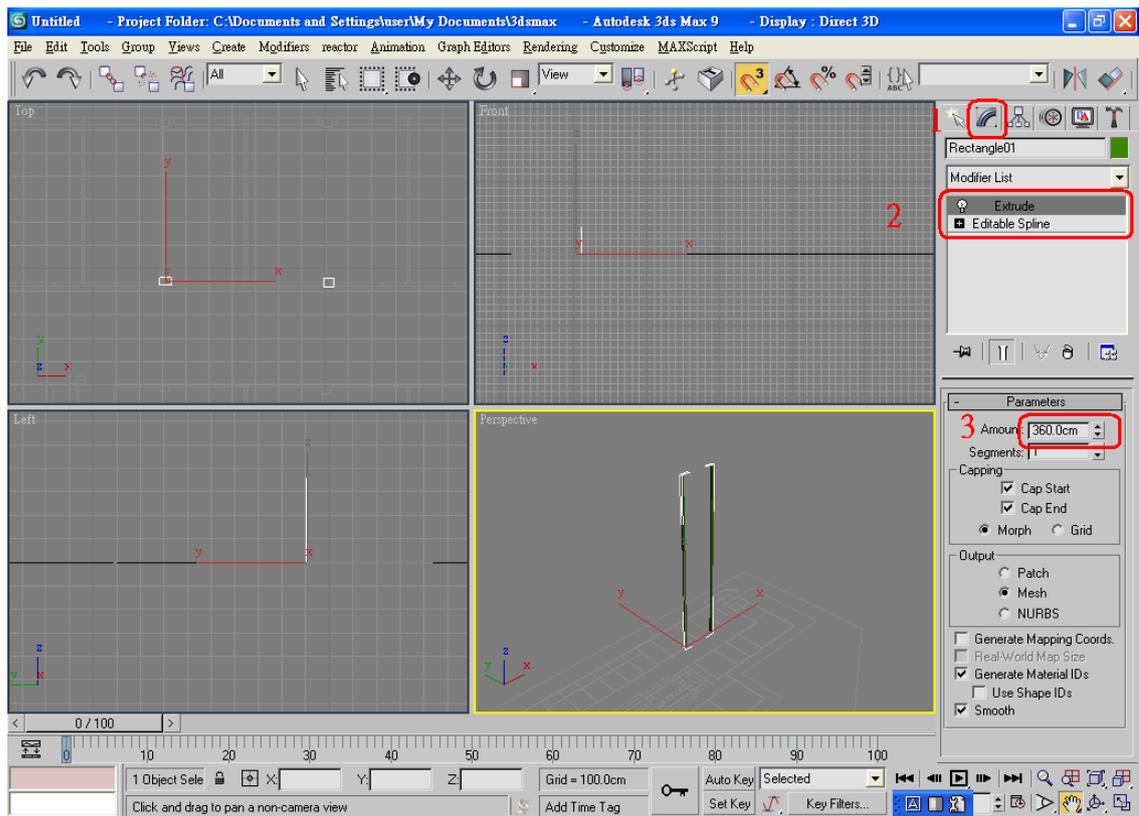


圖 4.31 3D 工程二館繪製一柱（擠出所需高度）

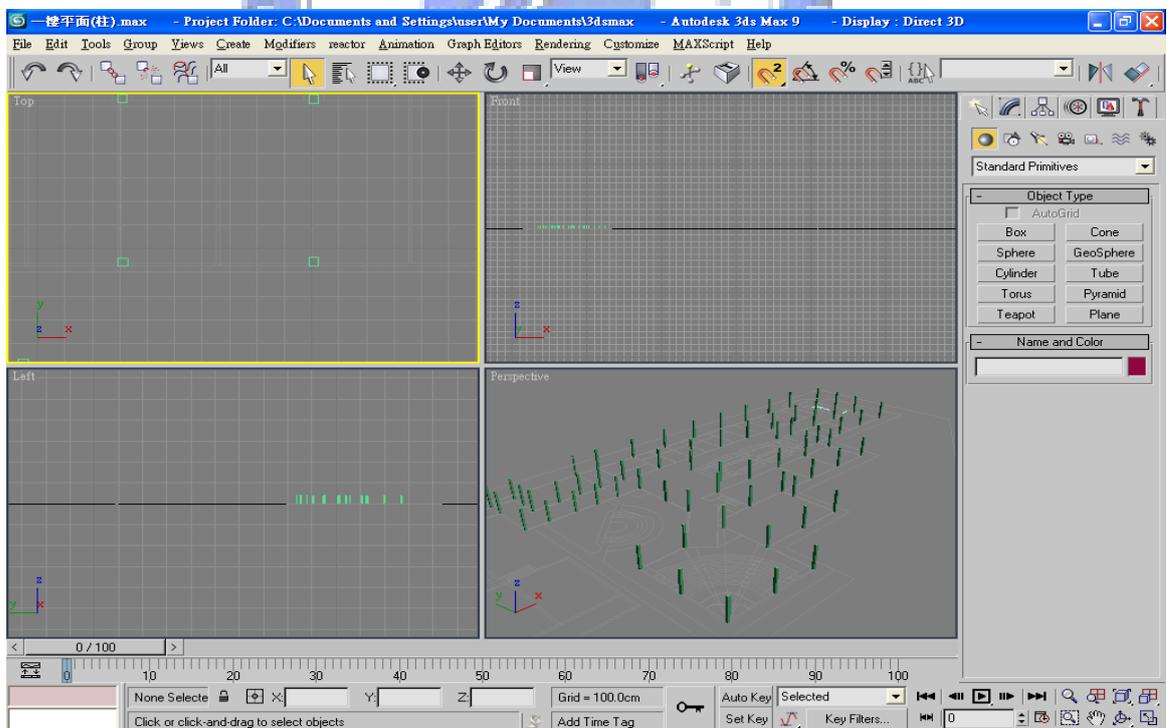


圖 4.32 3D 工程二館繪製一柱（完成）

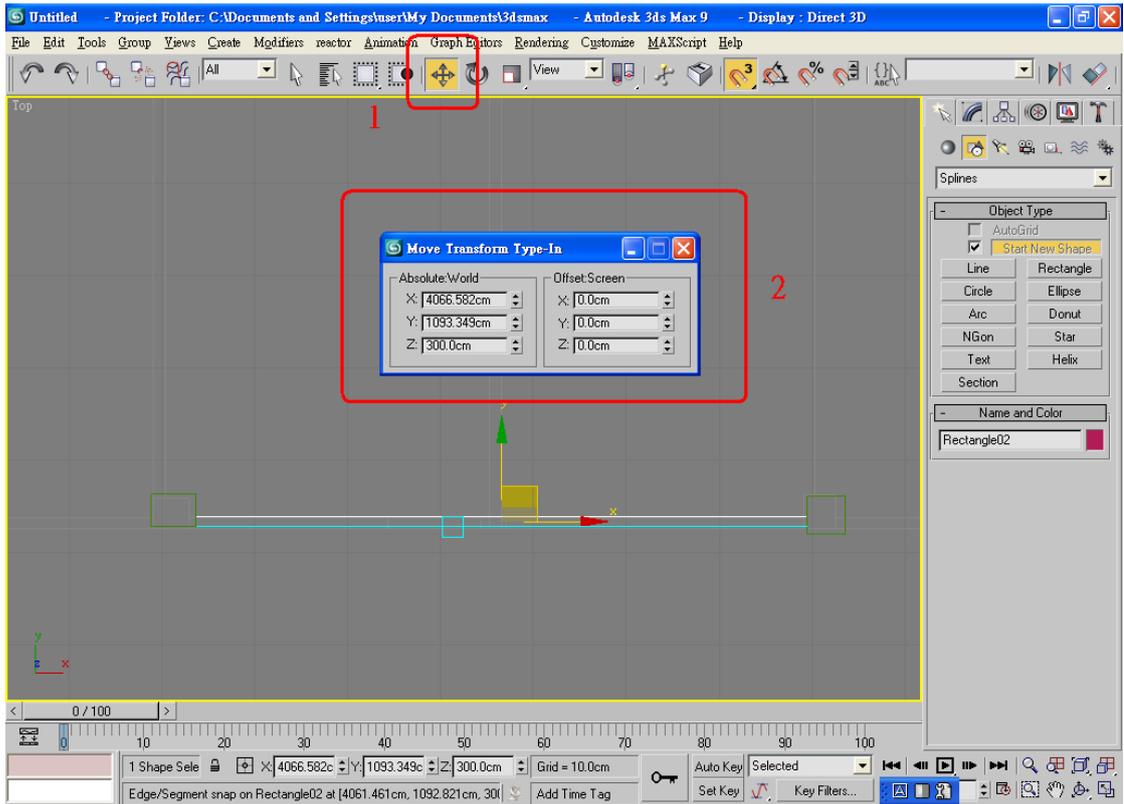


圖 4.33 3D 工程二館繪製一梁（移動）

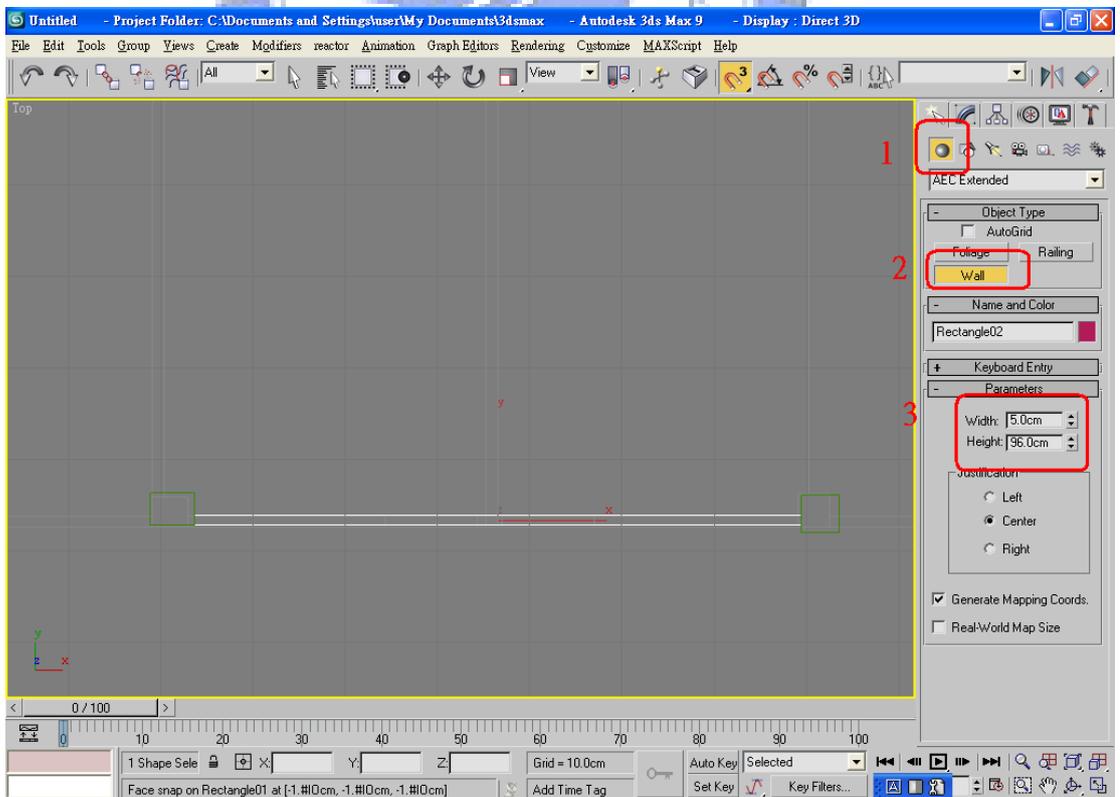


圖 4.34 3D 工程二館繪製一牆（牆物件指令）

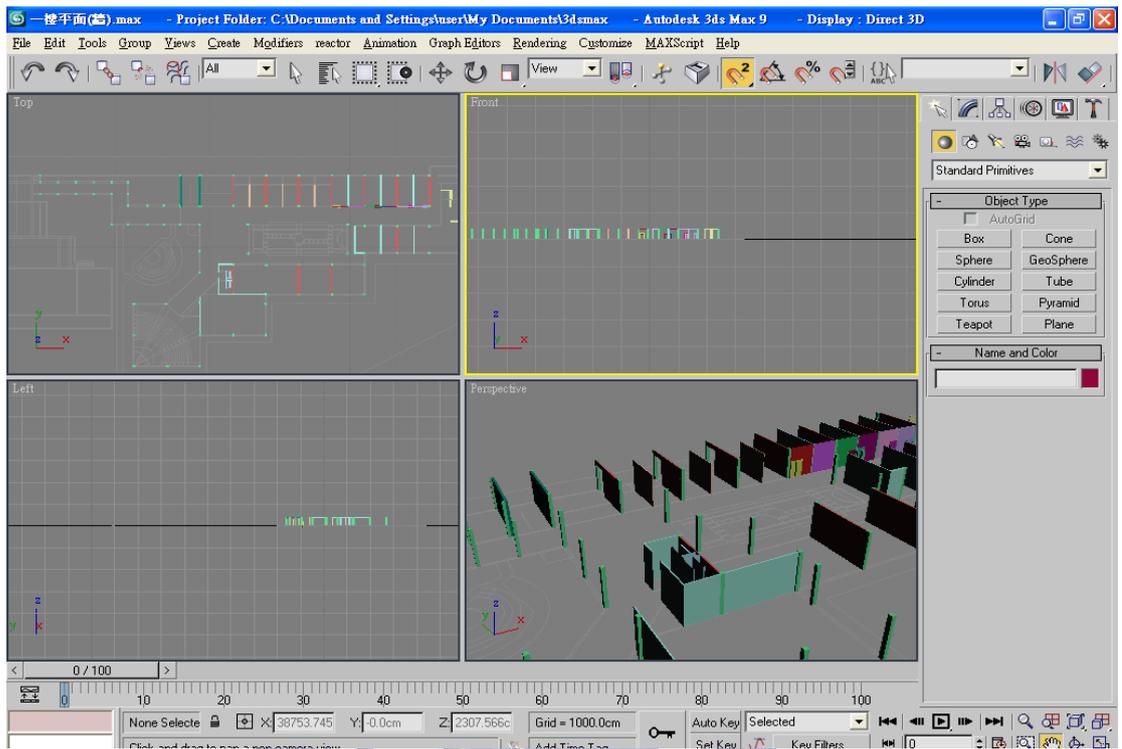


圖 4.35 3D 工程二館繪製一牆（完成）

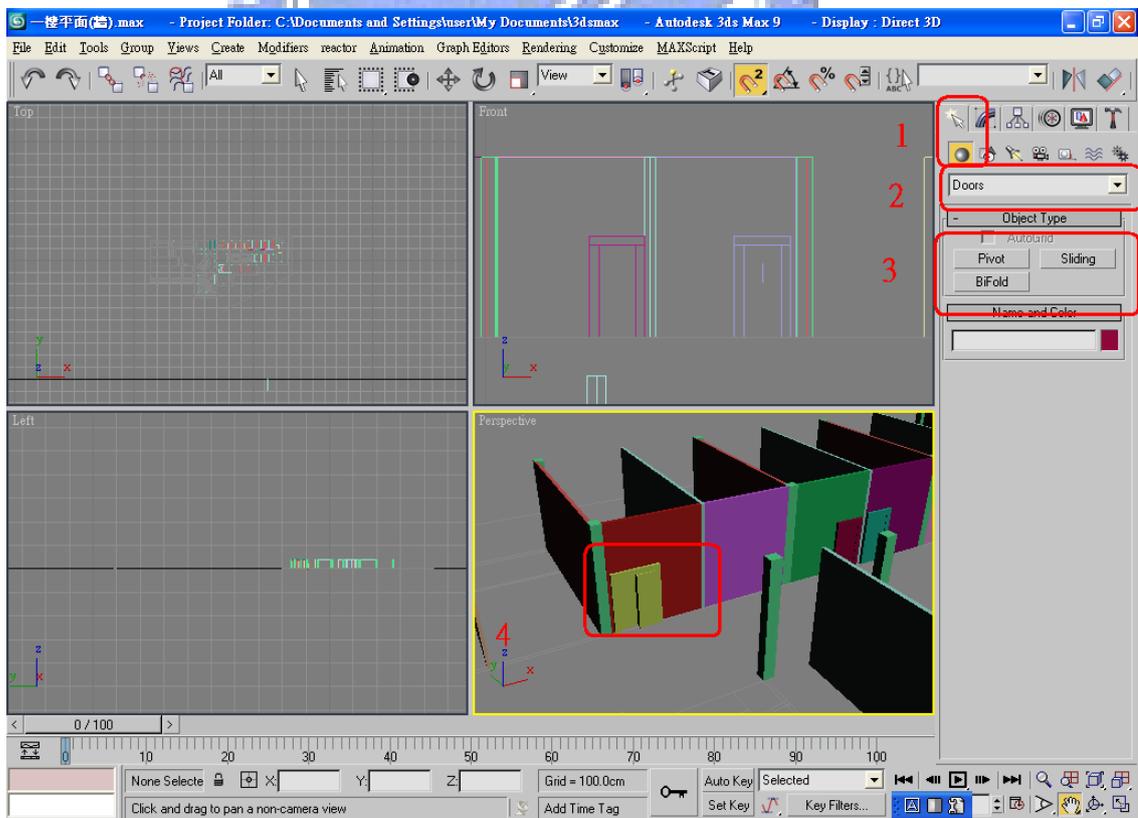


圖 4.36 3D 工程二館繪製一門（門物件指令）

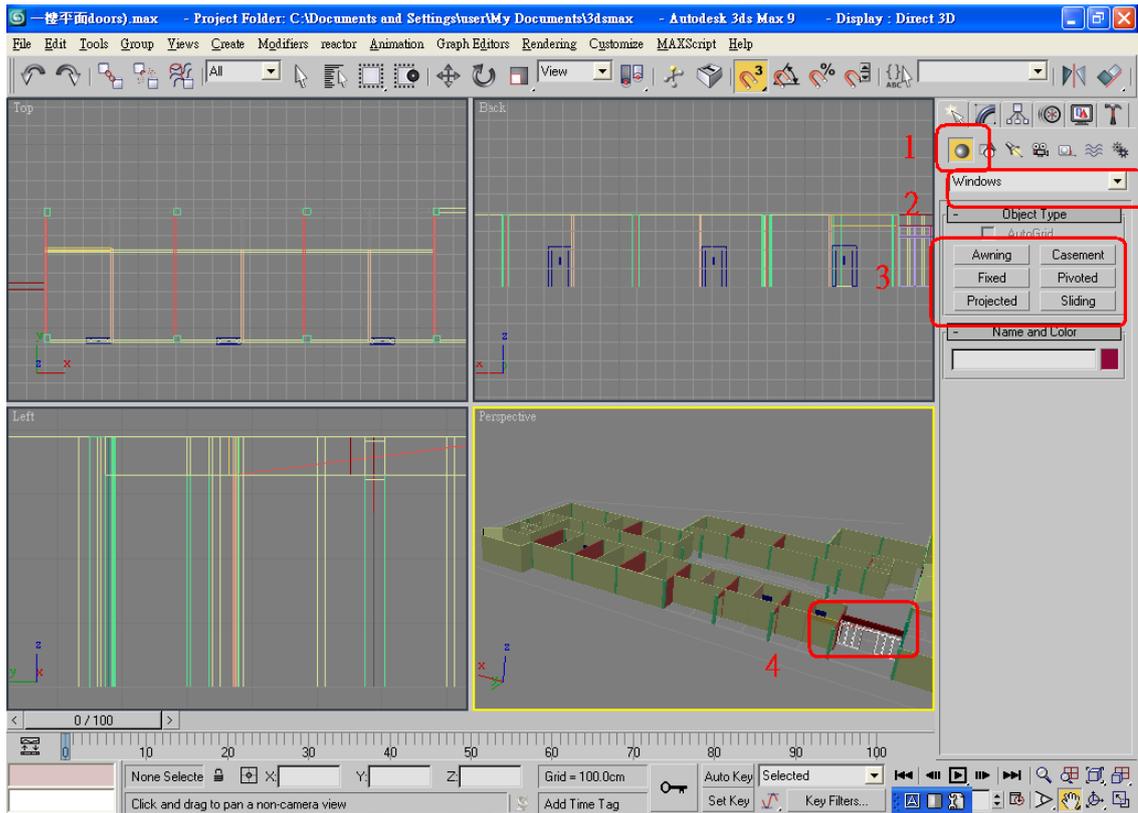


圖 4.37 3D 工程二館繪製一窗（窗物件指令）

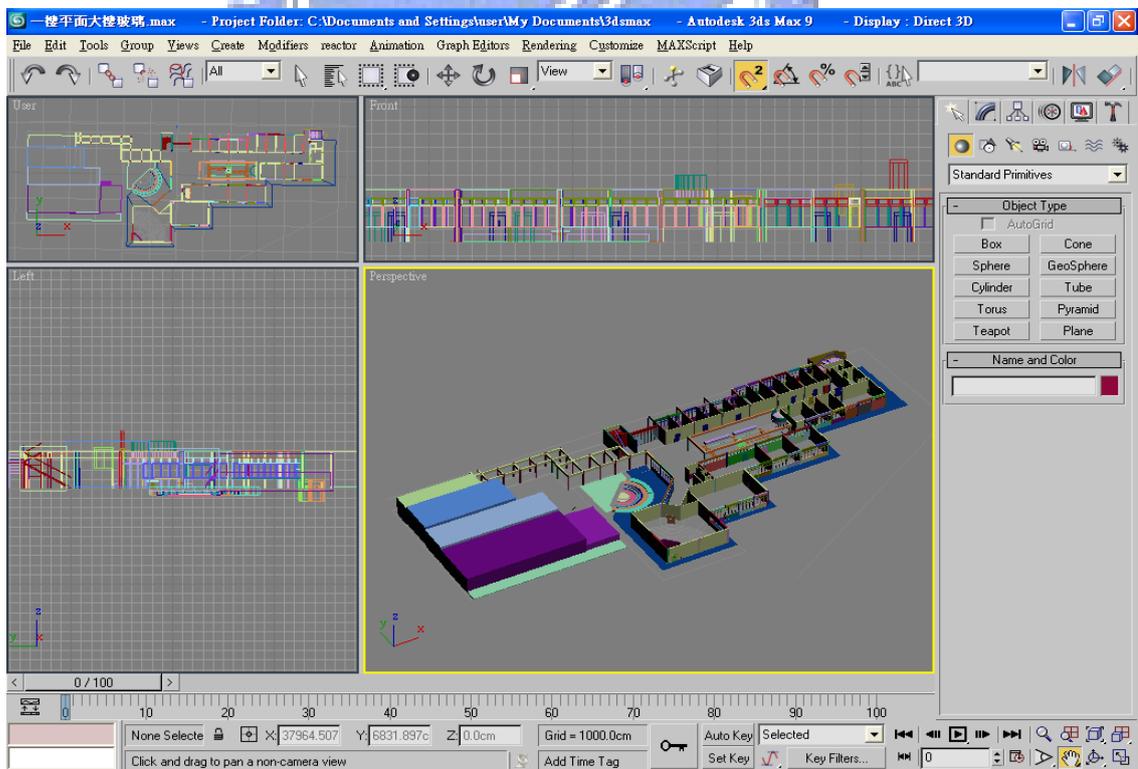


圖 4.38 3D 工程二館繪製一門窗（完成）

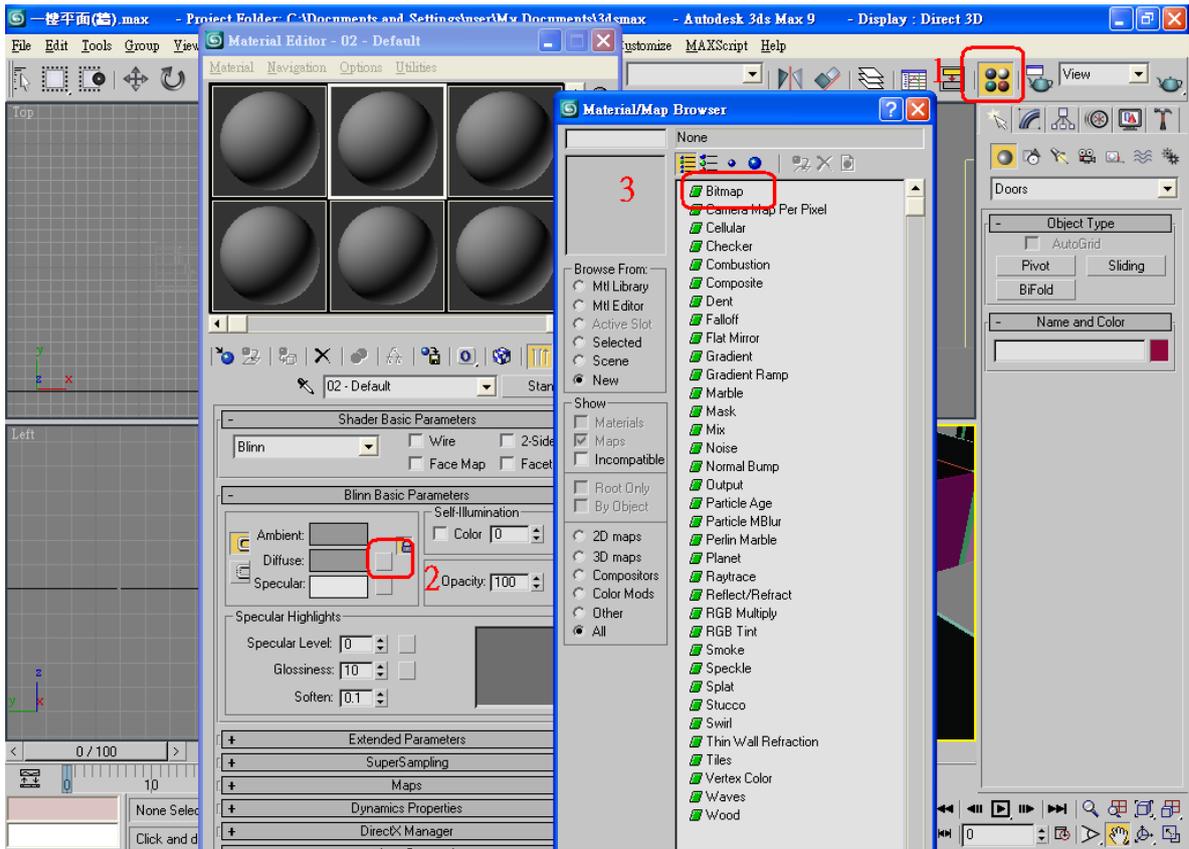


圖 4.39 3D 工程二館繪製—貼覆材質設定

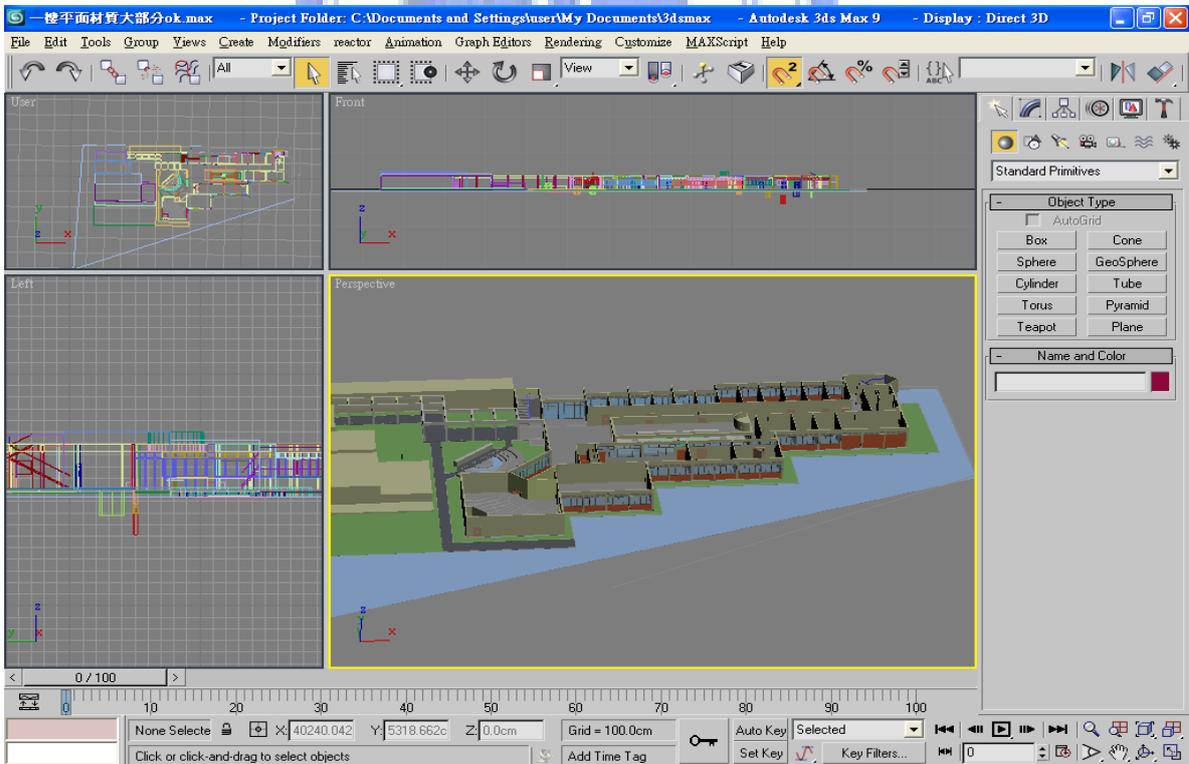


圖 4.40 3D 工程二館繪製—貼覆材質

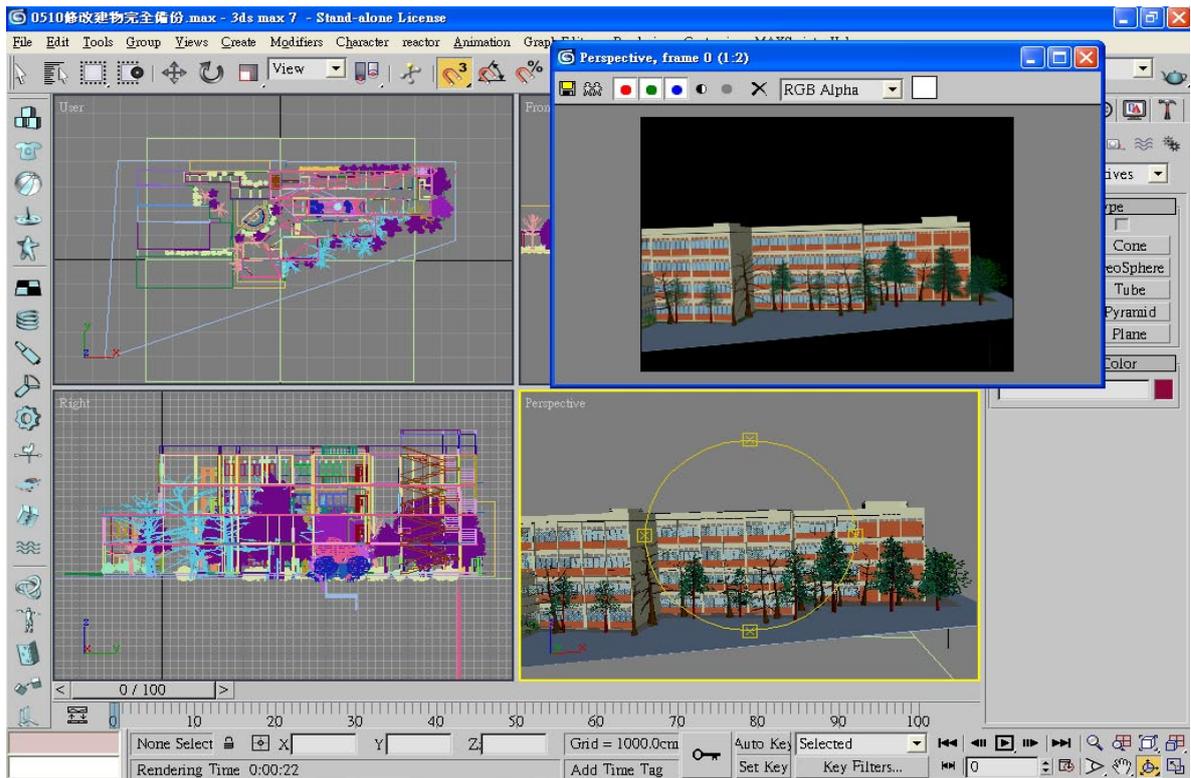


圖 4.41 3D 工程二館繪製—景觀配置

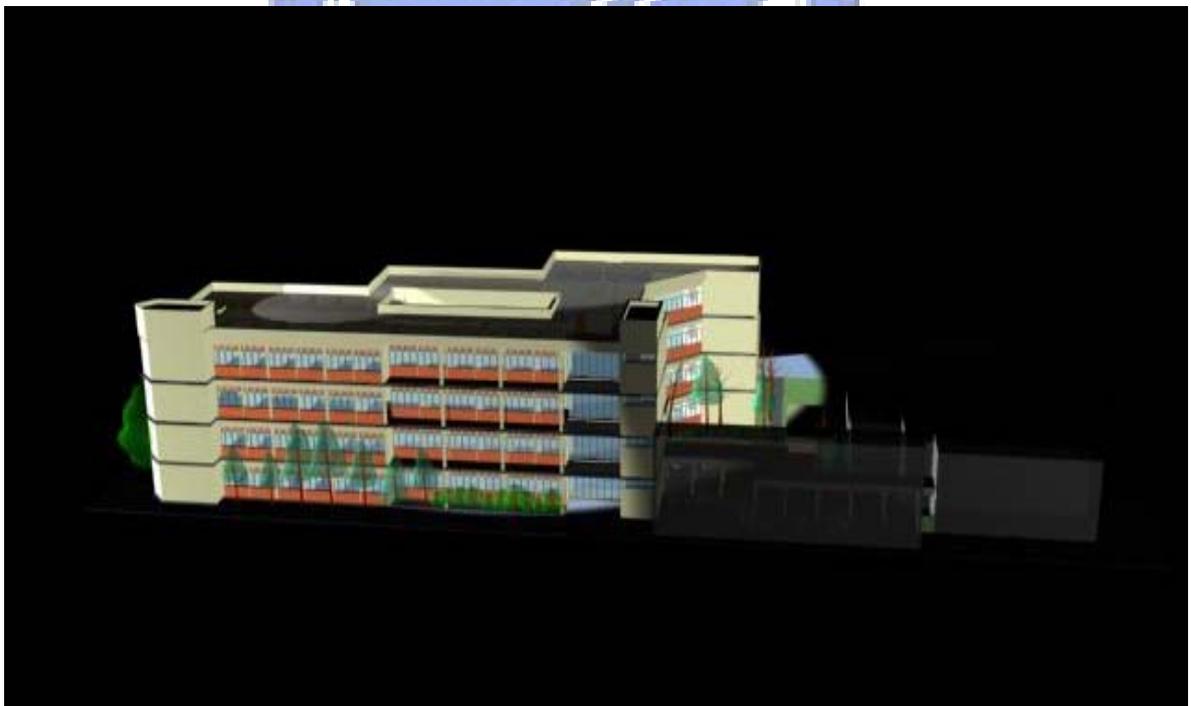


圖 4.42 3D 工程二館全景—正向圖

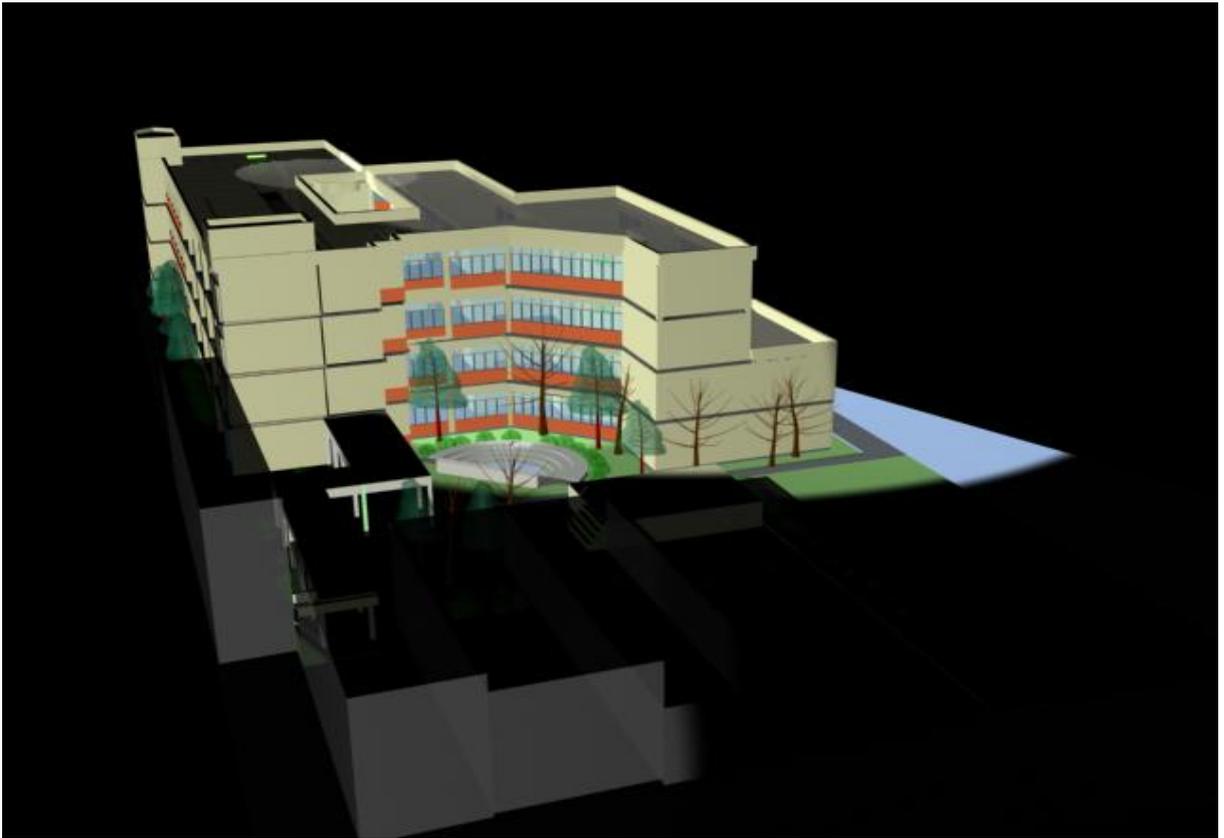


圖 4.43 3D 工程二館全景—右向圖



圖 4.44 3D 工程二館全景—背向圖

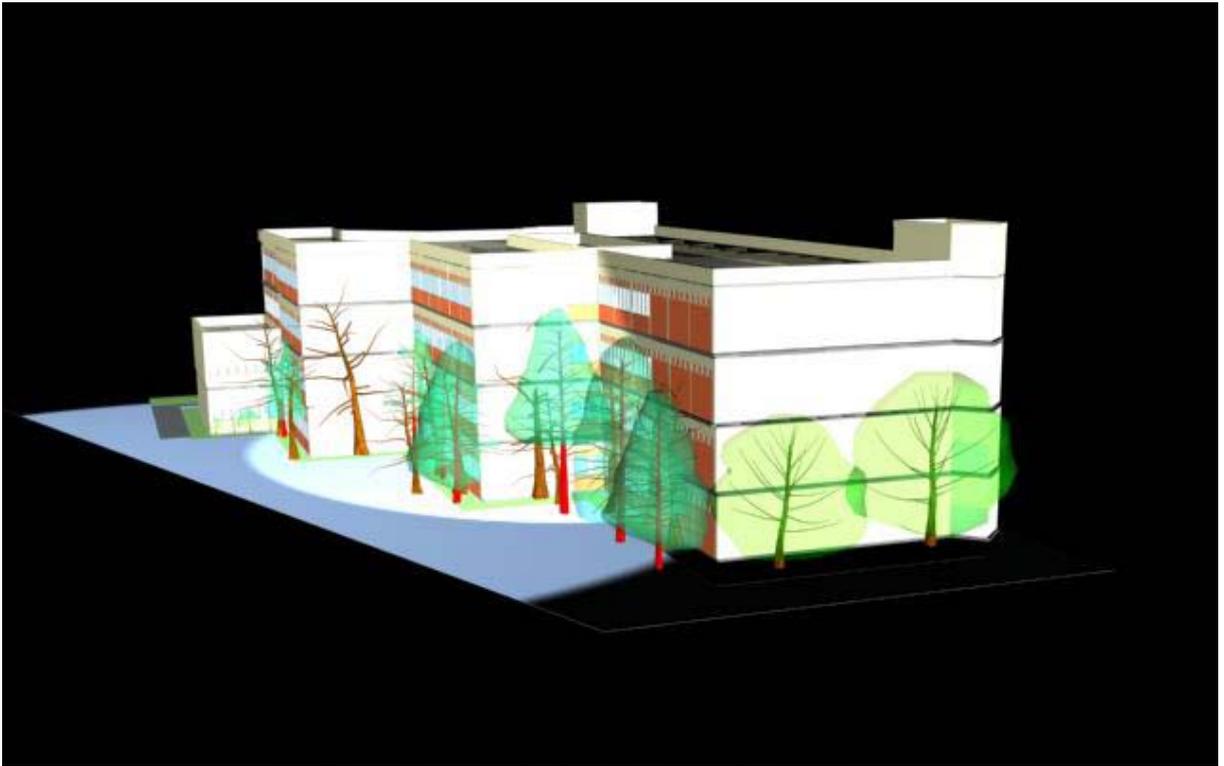


圖 4.45 3D 工程二館全景—左向圖

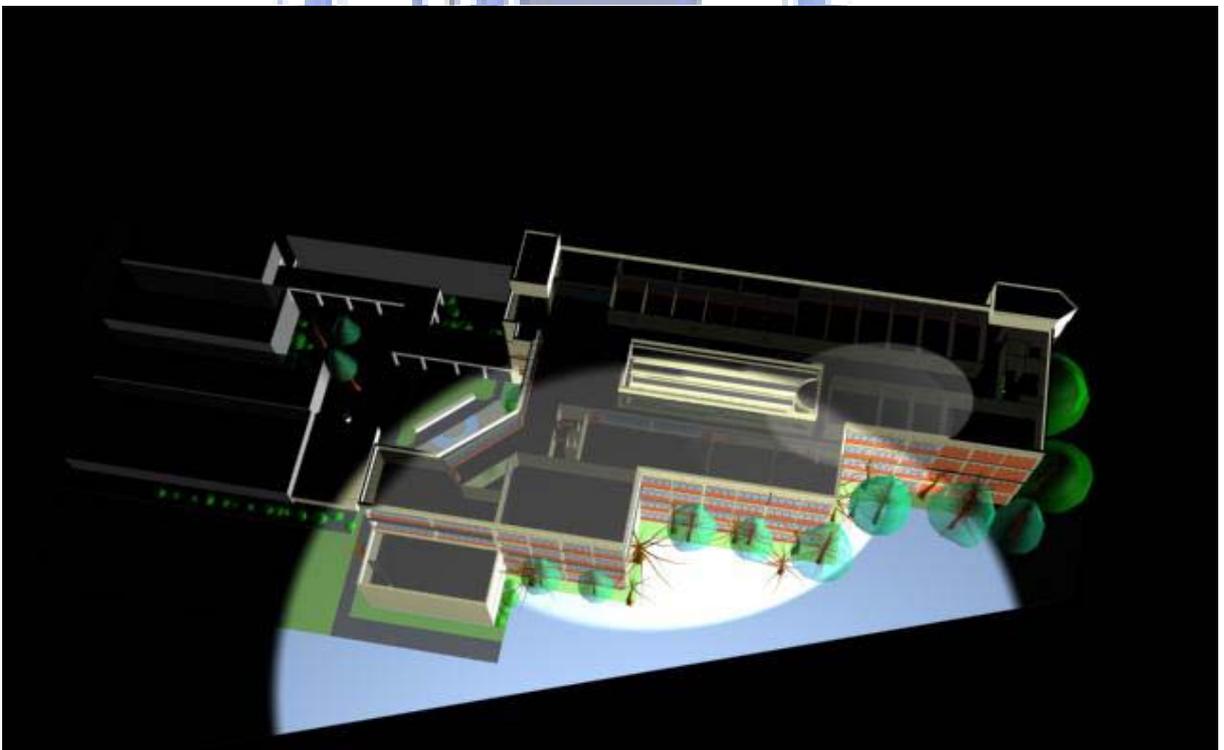


圖 4.46 3D 工程二館全景—俯視圖

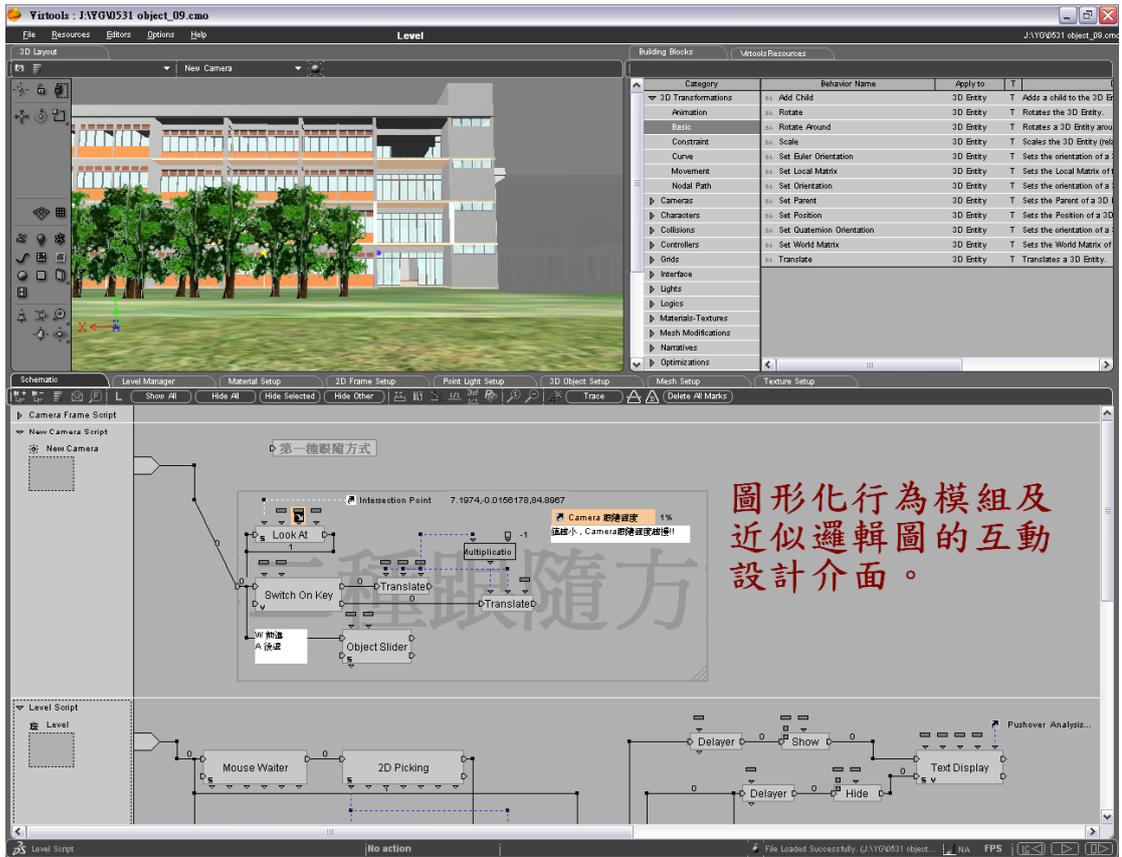


圖 4.47 Virtools Interface ( Version 4.0 )

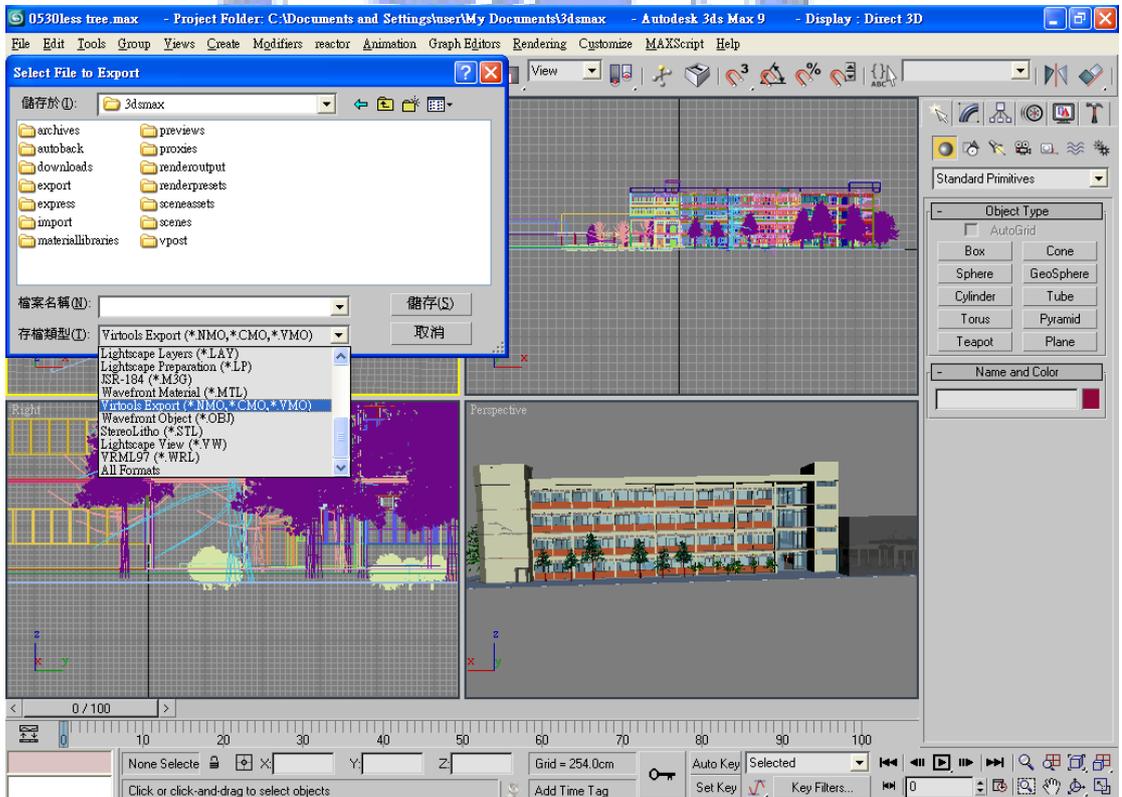


圖 4.48 建築物及場景模型存成.nmo 的檔案

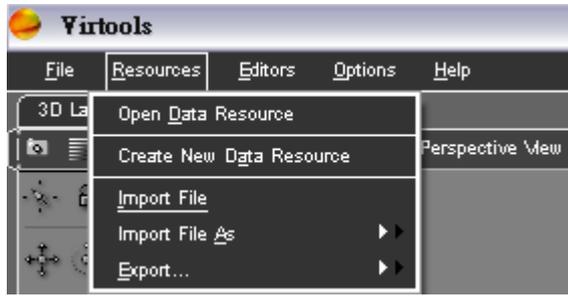


圖 4.49 匯出.nmo 場景檔案

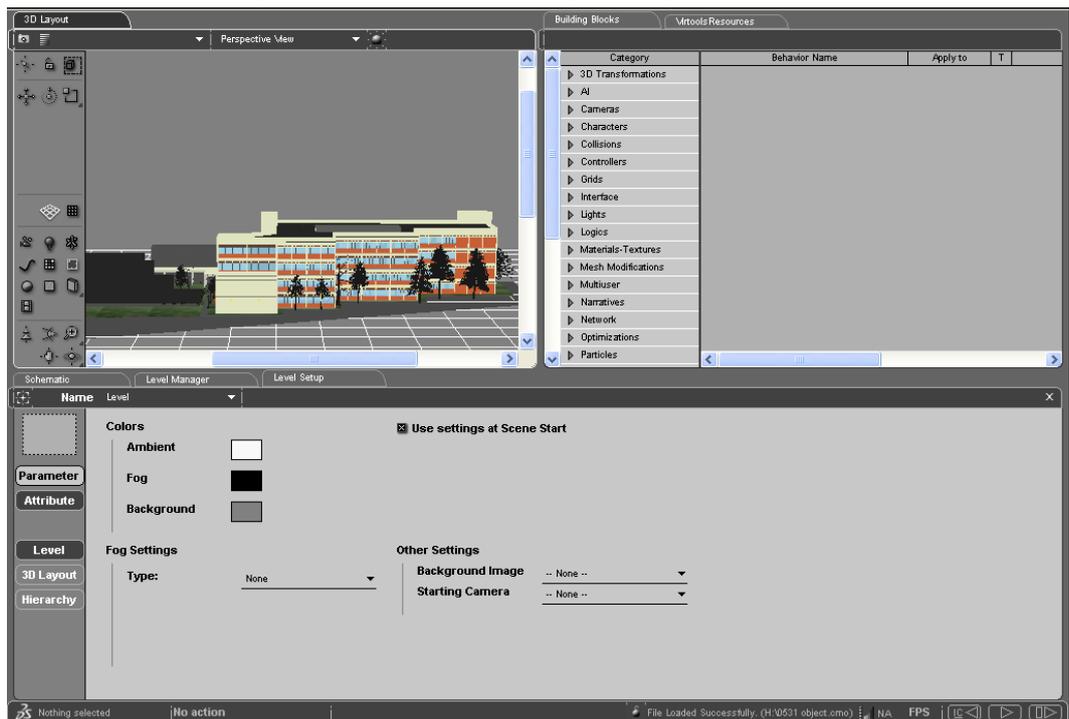


圖 4.50 未調整時的狀態

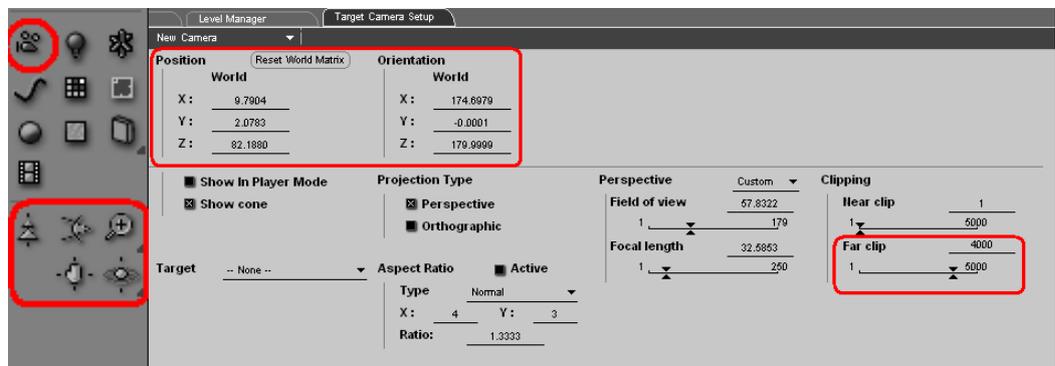


圖 4.51 視野、距離及角度設定

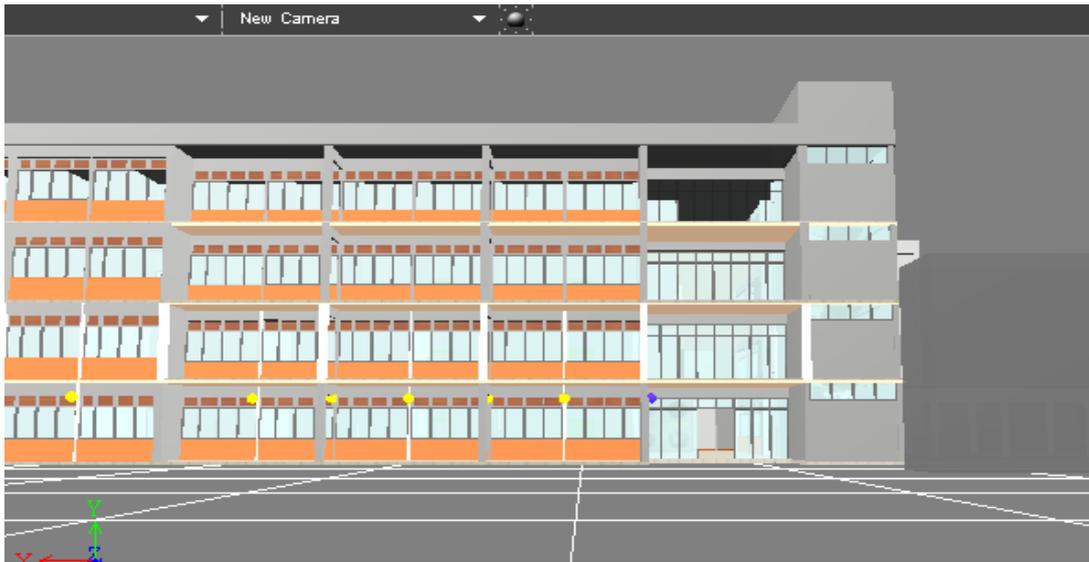


圖 4.52 視野、距離及角度調整後結果

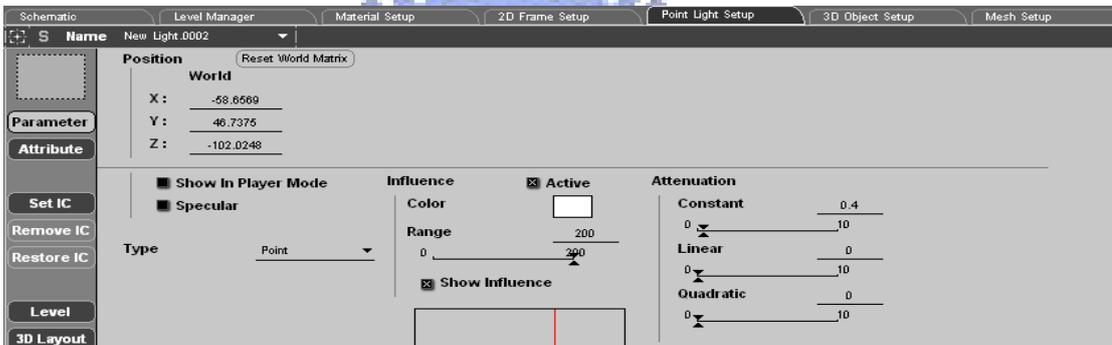


圖 4.53 新增三個點光源 Point Light

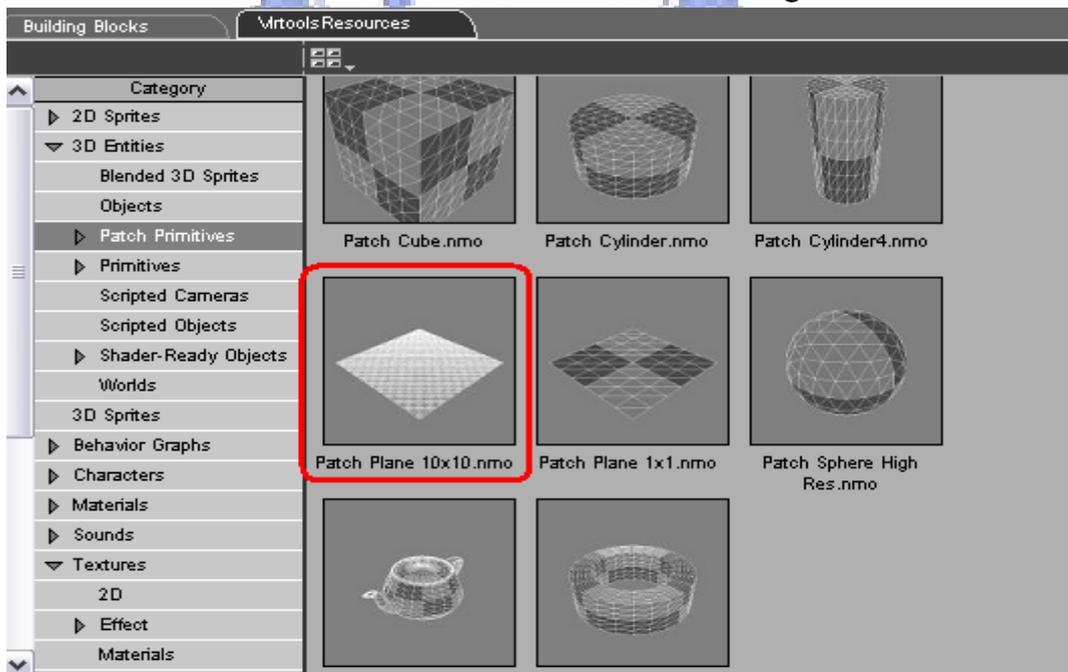


圖 4.54 平面 3D 物件

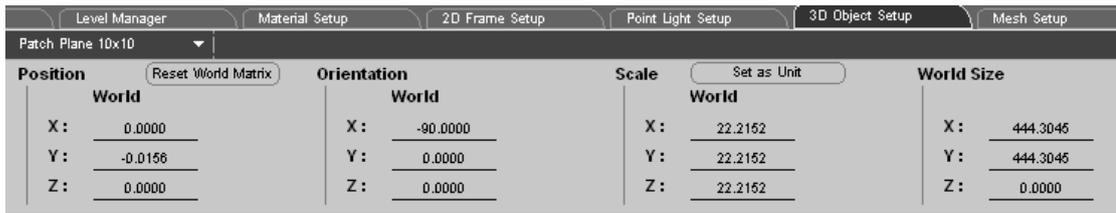


圖 4.55 位置與 Scale 大小的設定

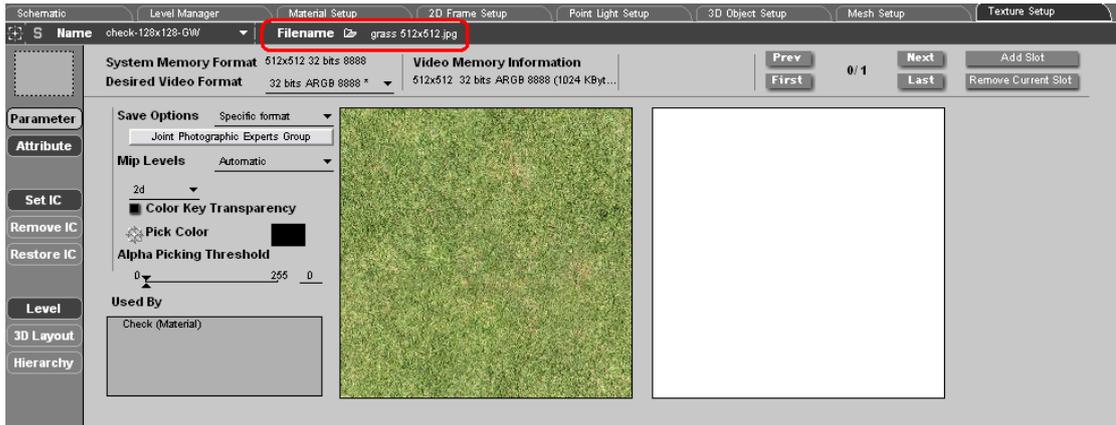


圖 4.56 材質貼圖

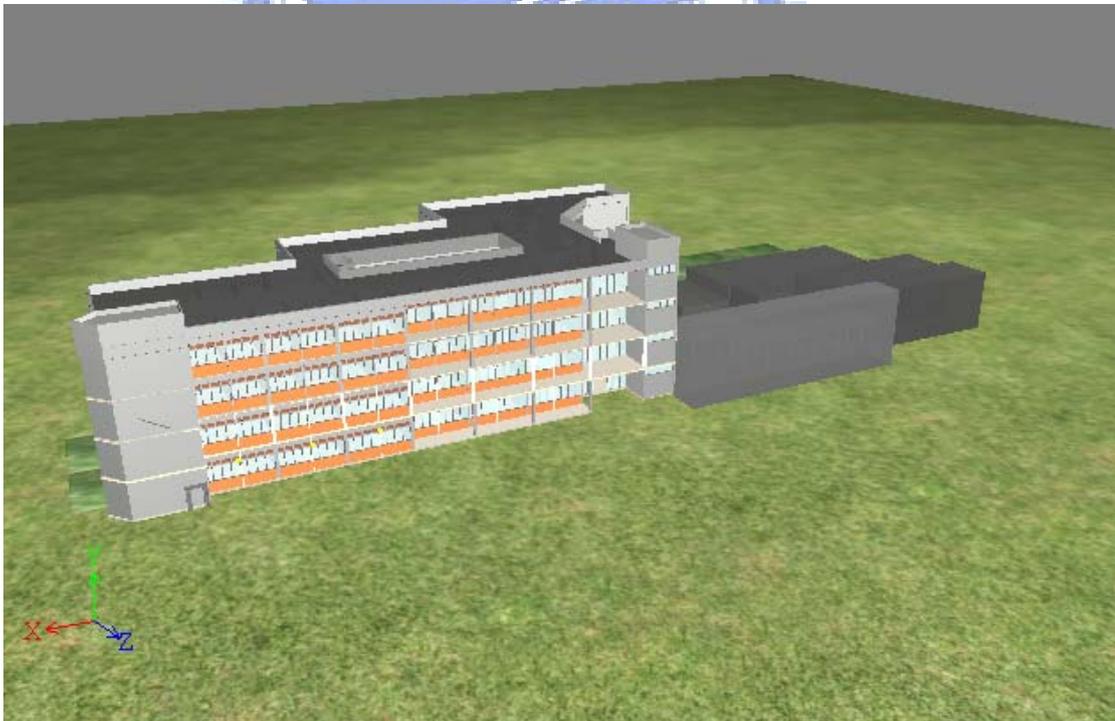


圖 4.57 材質貼圖成果

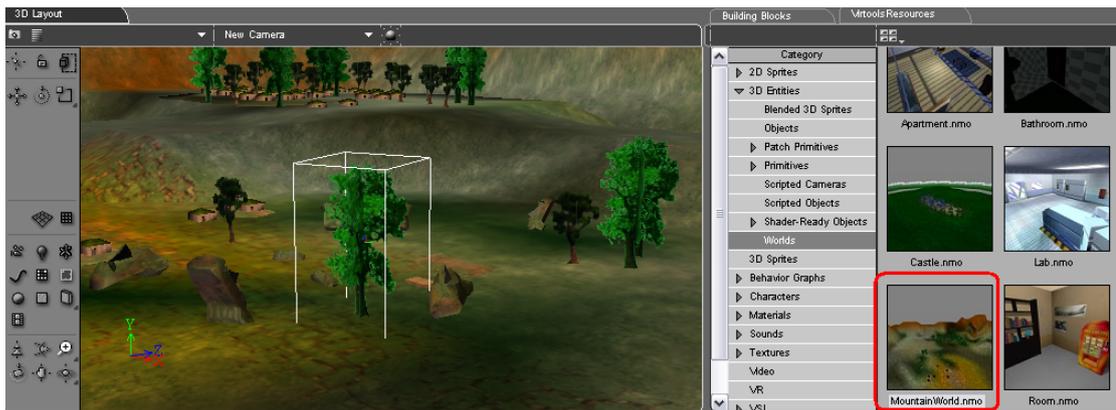


圖 4.58 十字貼圖法將樹木物件單獨儲存成個別的.nmo 檔

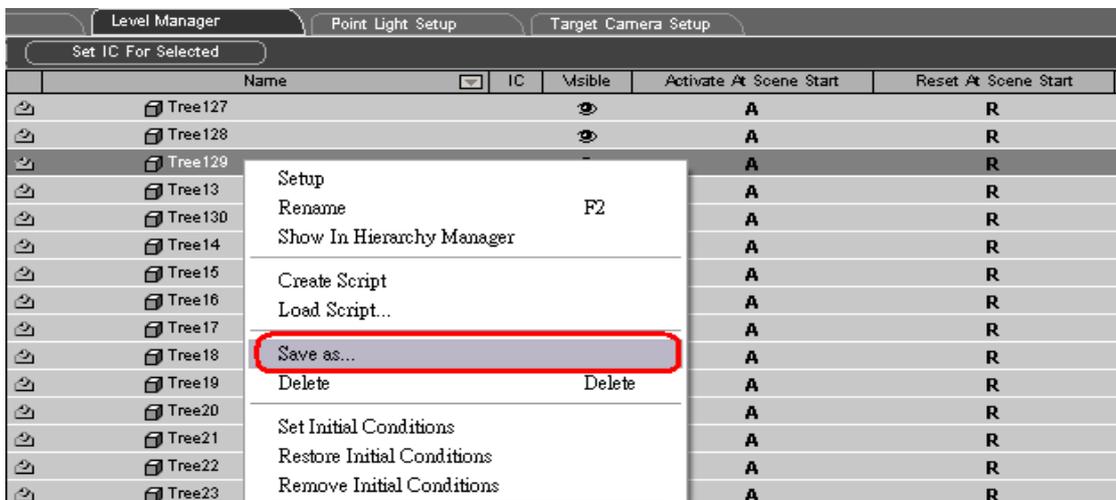


圖 4.59 樹木物件的 nmo 匯入到編輯場景並複製



圖 4.60 草坪、樹木完成模型

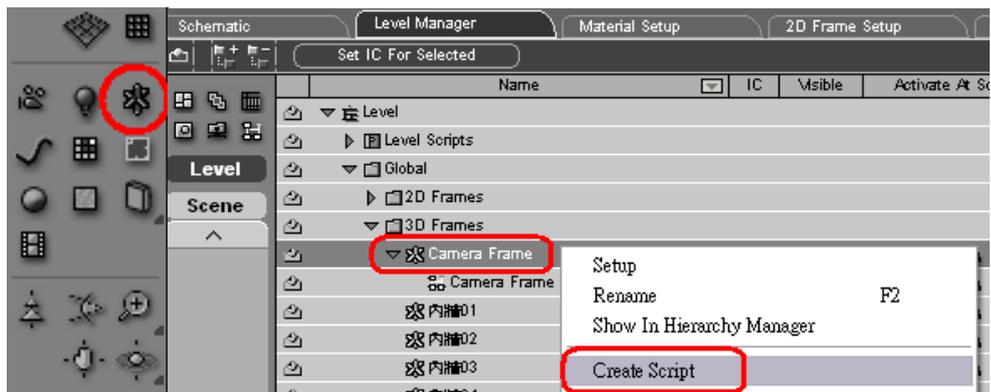


圖 4.61 Camera 3D frame 腳本視窗

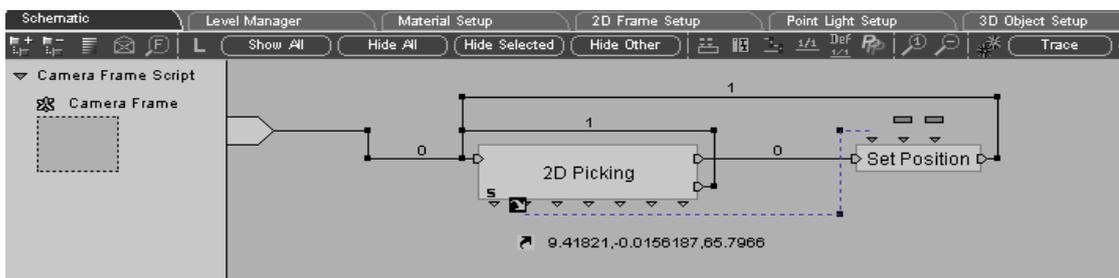


圖 4.62 腳本邏輯—滑鼠控制 Camera 方向

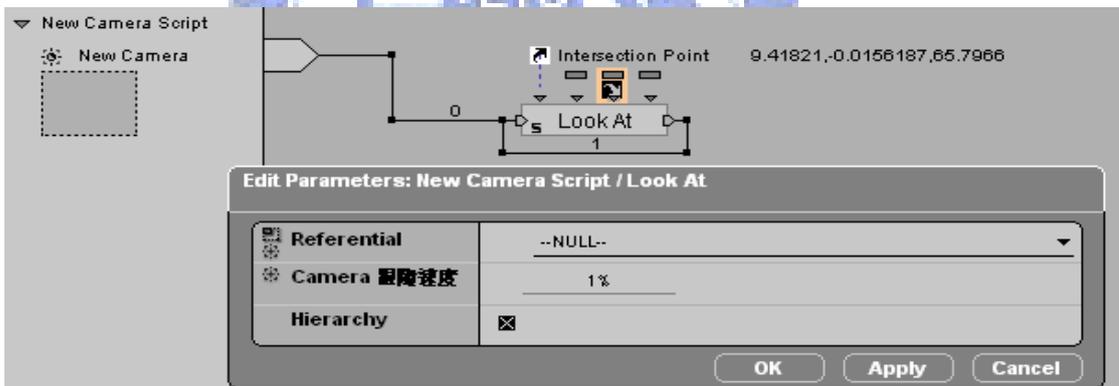


圖 4.63 腳本邏輯—跟隨速度

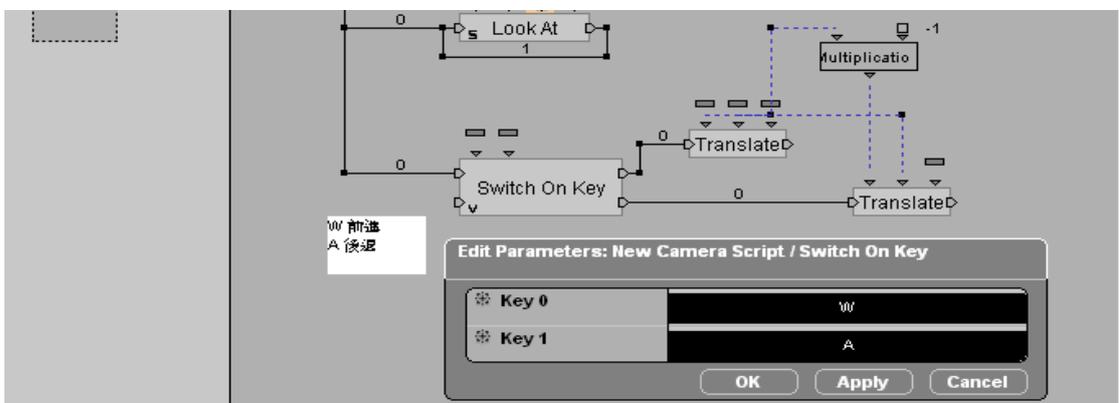


圖 4.64 腳本邏輯—攝影機行進方向

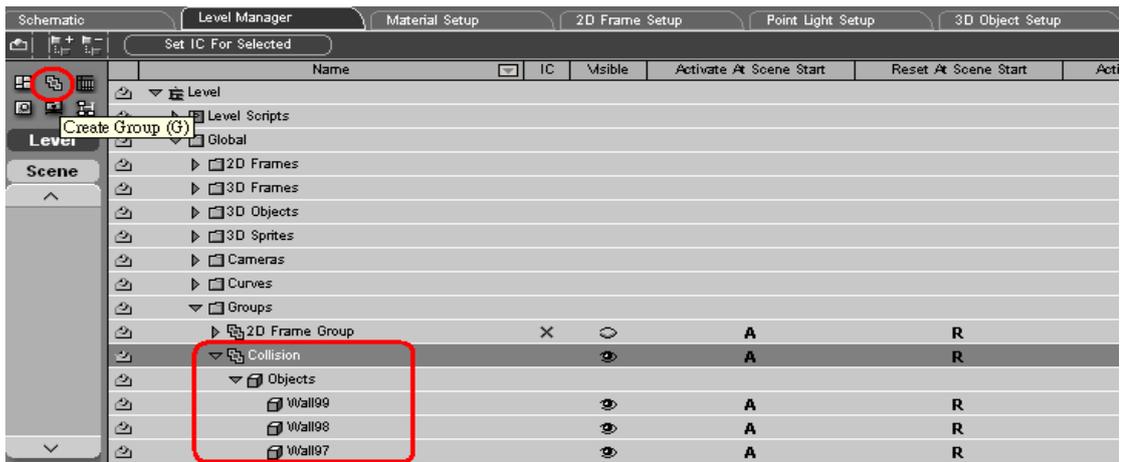


圖 4.65 碰撞的 3D 物件 Group

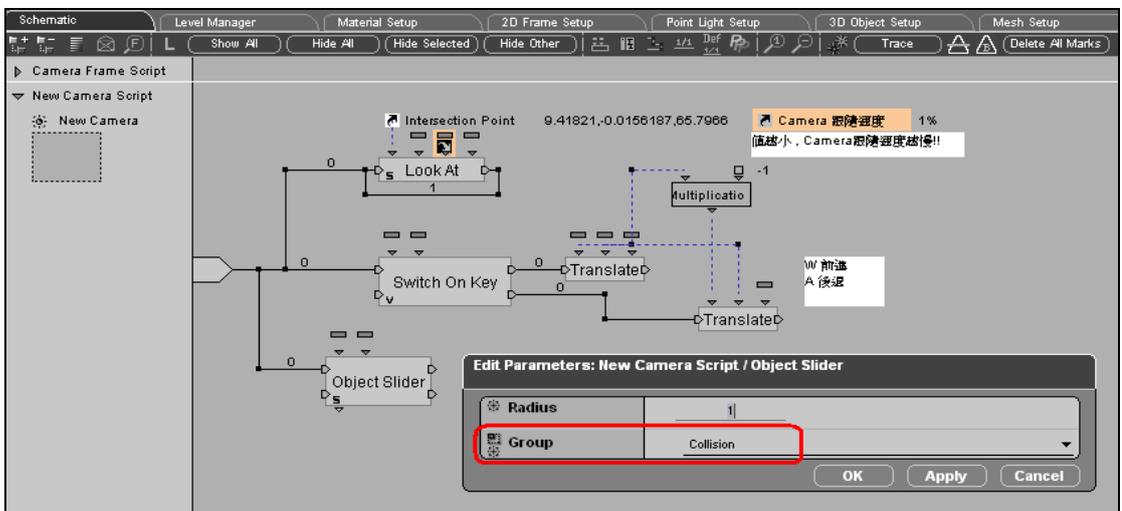


圖 4.66 腳本邏輯—碰撞設定



圖 4.67 2D Frame 圖文資訊

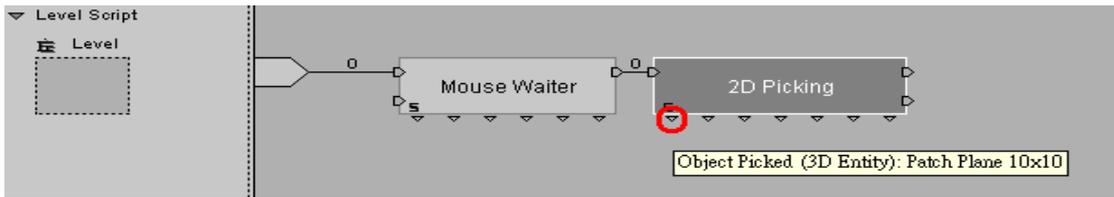


圖 4.68 腳本邏輯—滑鼠點選物件

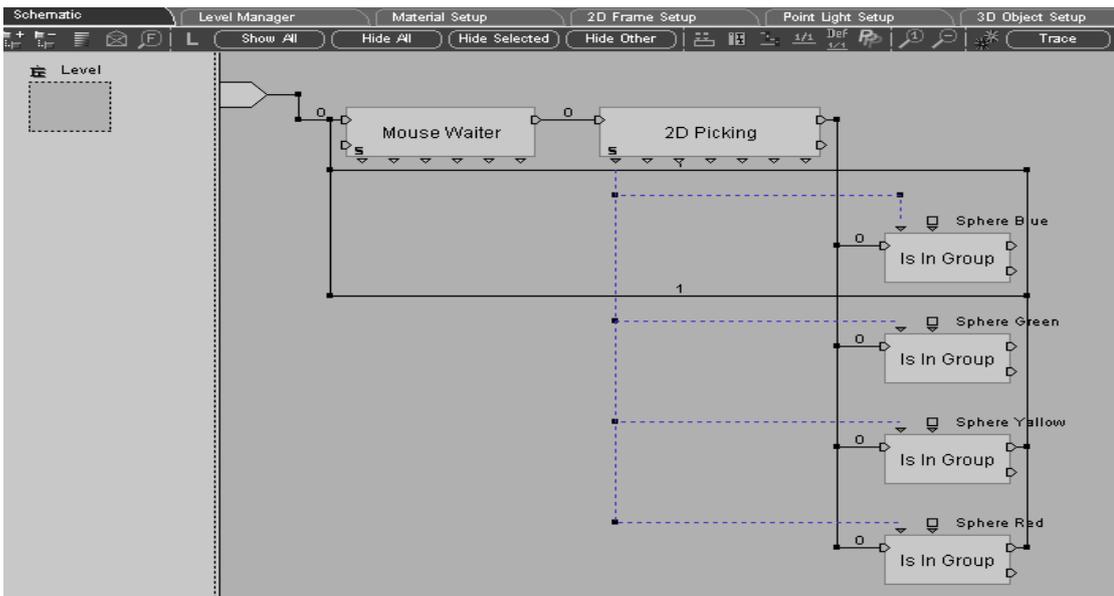


圖 4.69 腳本邏輯—物件加入個別的 Group

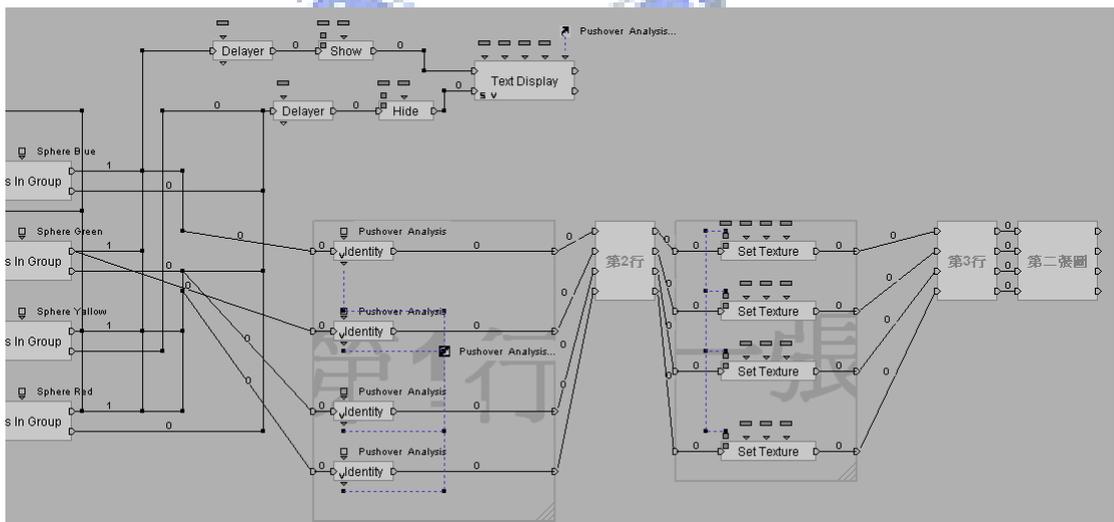


圖 4.70 腳本邏輯—2D 文字與 2D Frame 貼圖

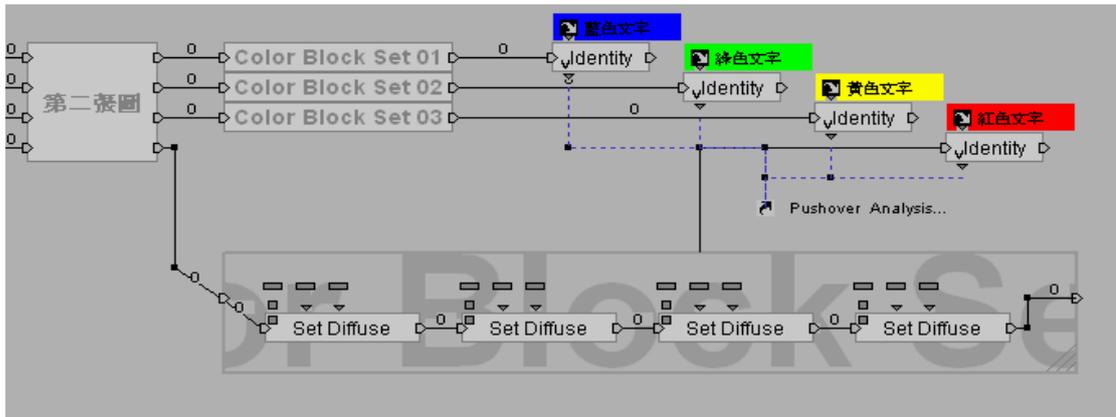


圖 4.71 腳本邏輯—2D Frame 顏色設定

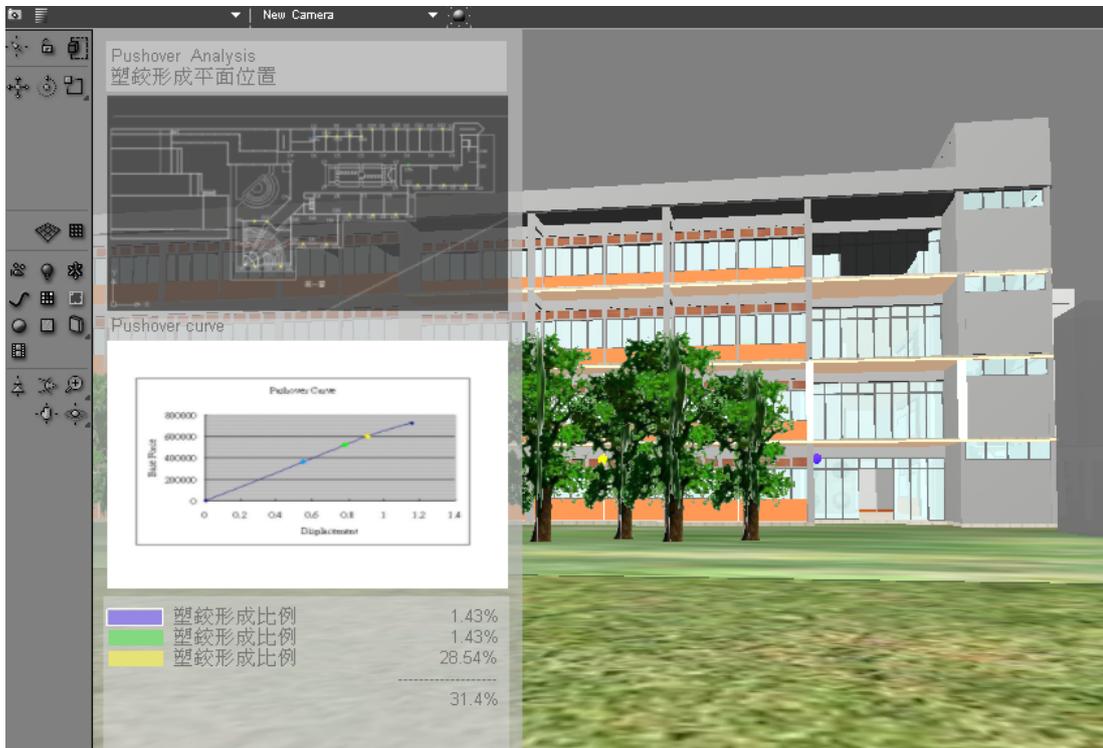


圖 4.72 2D 資訊互動

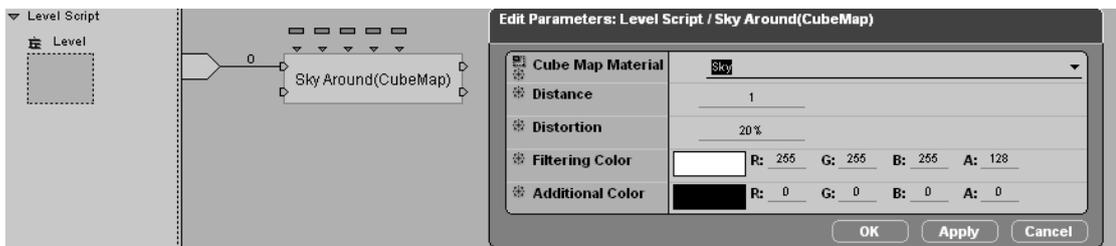


圖 4.73 腳本邏輯—貼圖

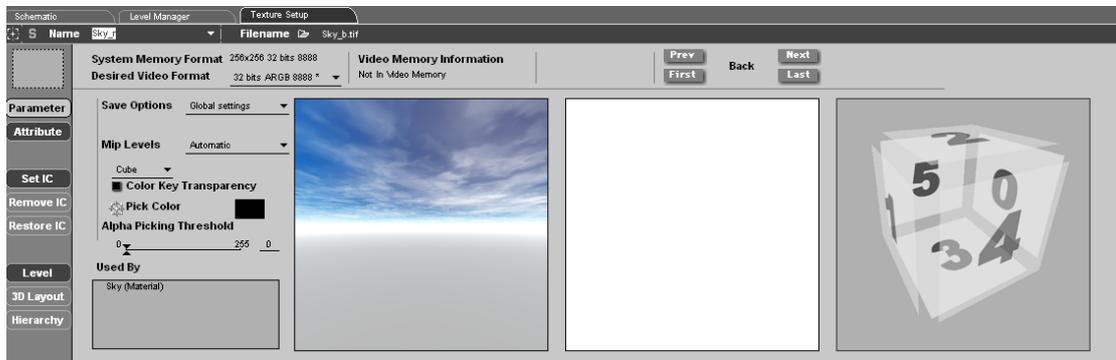


圖 4.74 製作天空效果

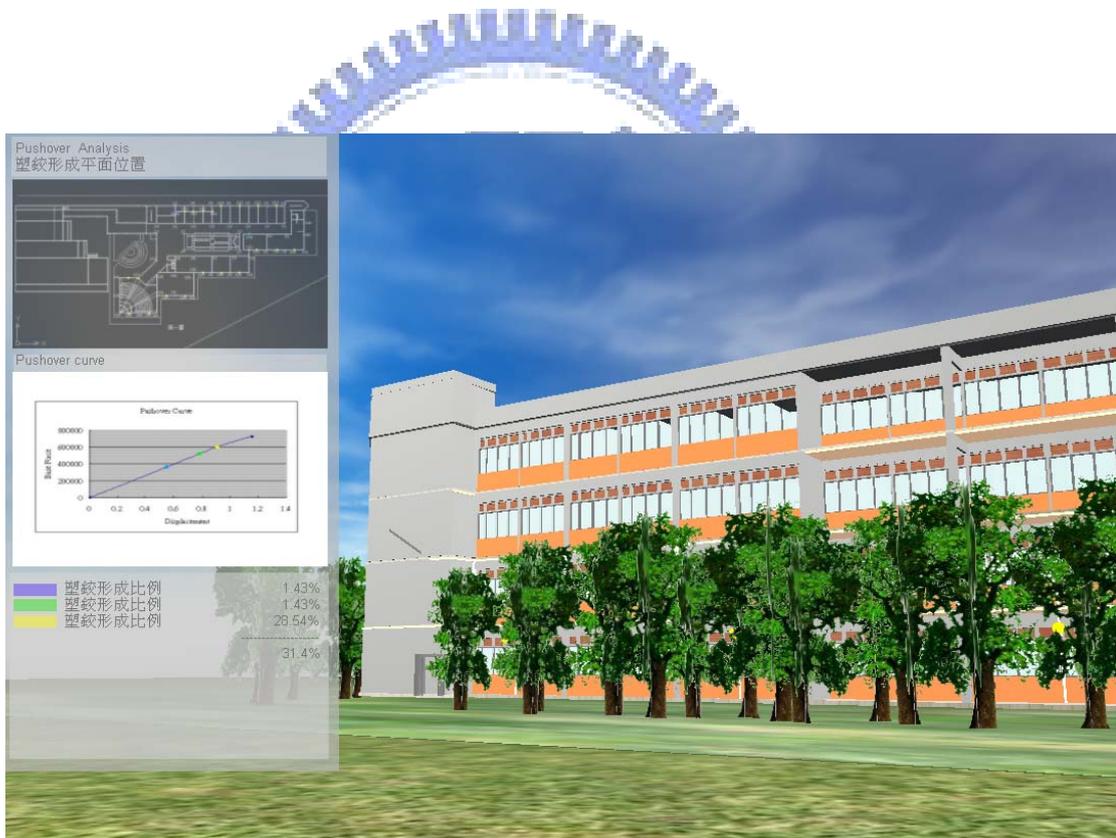


圖 4.75 Virtools 互動作品成果 (1) - 外觀



圖 4.76 Virtools 互動作品成果 (2) — 內部



圖 4.77 Virtools 互動作品成果 (3) — 內部

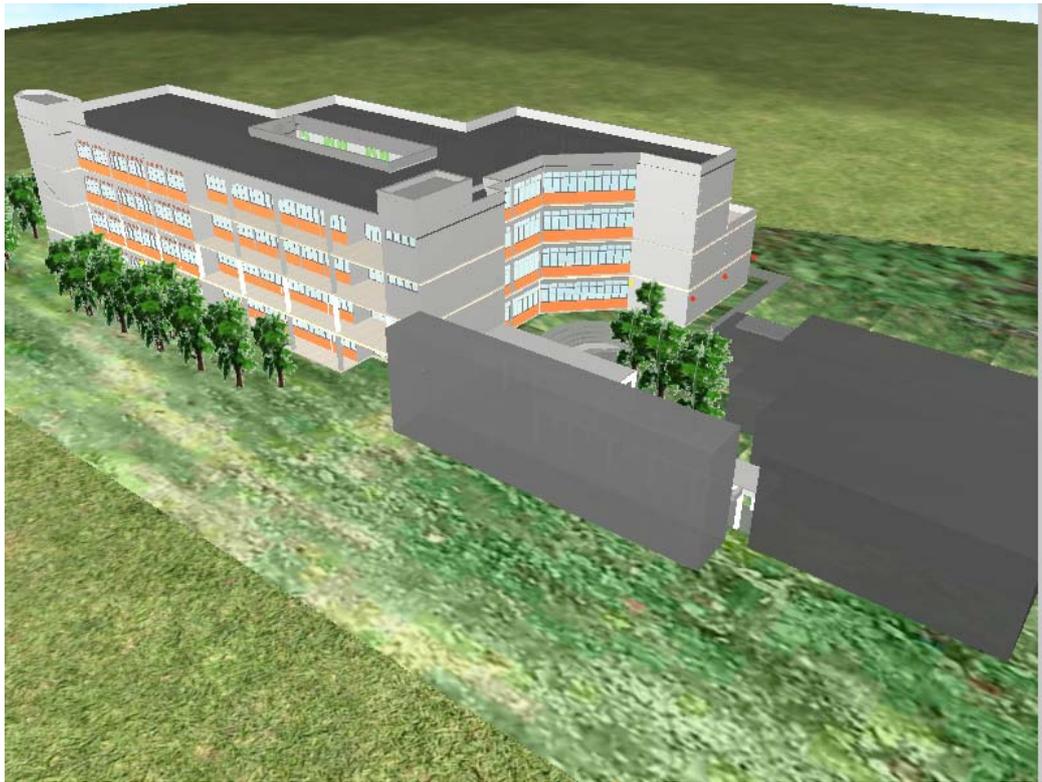


圖 4.78 Virtools 互動作品成果 (4) — 整體外觀



圖 4.79 重疊的影像