

地震衝擊風險三維化動態分析模型研發

Research on three-dimension dynamic analysis model for earthquake impact assessment

主管單位：國家災害防救科技中心

柯孝勳¹ 吳秉儒¹ 吳子修¹ 許智豪¹
Ke, Siao-Syun¹ Wu, Bing-Ru¹ Wu, Tzu-hsiu¹ Hsu, Chih-Hao¹
¹ 國家災害防救科技中心

摘要

為深化相關地震衝擊分析研究工作，本研究發展多維度建物地震衝擊動力分析技術，透過簡化建物三維動力分析模型，結合建物耐震屬性資料庫，對建物多邊形模型與耐震屬性加值分析，建構城市建築群地震衝擊動力評估方法，計算城市中每棟建築物受震反應。

此外，多維度、可視化展示為現今趨勢，本研究亦使用高性能動態模擬技術，開發多維度地震衝擊動力分析展示平台 MDUES，不僅可完整記錄空間屬性資料外，亦可提升地震災害模擬結果視覺化展示的細緻度。

本研究並實際應用相關技術進行長周期地震衝擊分析範例，模擬三維建物動態受震歷時的反應，展示地震災害情境下，分析建物致災空間風險及不同場域之衝擊議題。

關鍵詞：建物地震衝擊動力分析、三維建物多邊形模型、視覺化動態模擬平台、長周期地震衝擊

Abstract

Earthquakes can cause severe damage and substantial economic losses to modern cities. Therefore, accurate and efficient simulations of seismic damage to buildings have become an indispensable part of earthquake hazard mitigation efforts worldwide. Precise simulation results can help highlight potential seismic damages and serve as a basic reference for urban planning and post-earthquake rescue operations. In urban areas, simulation of structural dynamic responses under earthquake is crucial in emergency response planning. Multidimensional visualization of earthquakes is a current trend in simulation. In this study, a dynamic, multidimensional simulation method for analyzing impacts on to buildings was developed. The method employs three-dimensional dynamic analysis and data from a seismic capacity database. High-performance computing is applied to a polygonal model, seismic capacity data are analyzed, and the seismic response of each building in an urban environment is calculated. Thus, in this study, the multidimensional urban earthquake impact simulation (MDUES) platform was established. The MDUES enables long-period earthquake impact

analysis, simulation of the seismic responses of buildings in three dimensions, and visualization of the disaster risks and impact on a specified area. In summary, simulating structural seismic responses in urban settings necessitates careful examination of the characteristics of ground and building motion, and the outcomes of such analysis can provide a crucial reference for city planning, post-earthquake rescue operations, and seismic damage assessment.

Keywords : Structural seismic response simulation, multi-scale models for urban building, visualization display simulation, long-period earthquakes

一、前言

本研究開發多維度建物地震衝擊動力分析技術，將地震情境模擬與多維度空間展示技術相互結合，透過簡化建物三維動力分析模型，結合建物耐震屬性資料庫，建立建物地震衝擊動力評估方法。有鑑於都會區內有大量建物，進行建物非線性地震歷時分析為重要的核心工作，本研究發展一套視覺化地震三維建物多邊形動力模型。三維多邊形模型可顯示出建物的立面，讓使用者瞭解地震衝擊模擬的實際狀況，該方法基於結構動力學理論，採用完整地震動歷時記錄，對於城市中每棟建物個別進行結構動力地震歷時分析，可充分反應地震動下之時域、頻率域特徵與建物耐震特性。

本研究為呈現視覺化展示，整合建物三維耐震資料庫、建物結構地震動態反應、與建物多邊形動態模擬技術，本研究開發多維度城市地震衝擊動力展示圖台 MDUES (Multi-Dimensional Urban Earthquake impact Simulation Platform)，有效整合建物資訊、地震工程的基礎數據資料，以呈現城市建築群地震動態反應和損壞分析結果，同時將城市建築群地震衝擊模擬衝擊場景具像化。本研究本年度以台北市示範區為例，設定地震情境模擬，評估都會區建物動力損壞分析風險與展示數值動態模擬結果。

二、研究方法

2.1 建立城市建物群地震動力衝擊模型

本研究有效將地震資料與建物資料整合與分析，包含整合震源模型、三維速度構造、以及工程地質參數，求得地動-場址效應交互影響之地表震動歷時資料。藉建置建物耐震三維化屬性資料庫，提供大量建物基礎屬性資料，如樓高、面積、耐震係數、構造形式、年建造年代等，發展城市建物群地震動力分析方法與可視化分析技術，提供視覺化的地震模擬成果、如建物受震動態反應、建物地震損壞評估，可充分對城市地震動力分析與防災應用(圖 1)。

三維城市地震衝擊動力模擬架構如圖 2 所示，有效整合三維模型資料庫、動力分析模式、與視覺化擬技術，相關重點如下說明：

2.1.1 三維圖資：

三維圖資庫涵蓋城市建模組成之圖資，如基礎底圖(含開放式電子地圖、正射航拍圖、地形圖、建物圖框等)、縣市輪廓圖、三維建物模型、房屋稅籍資料等，整合建物圖框與房屋稅籍資料，建立建物耐震三維化屬性資料庫，展示如房屋建造年代、建築構造、房屋面積、樓高等屬性，可應於設定建物結構動力分析防災應用模型之結構參數(如質量、阻尼、勁度矩陣等)。

2.1.2 動力分析：

(1)採用 Xiong 等人(2017)建議非線性、多自由度剪力 NMS 模式，開發建物結構動力分析防災應用模型之分析模組，可進行建物三維模型動力分析。

(2)採用多自由度、雙線性（bilinear 模式）剪力屋模式進行建物三維模型的地震動力分析，地震衝擊風險分析分為低風險、中風險、與高風險。

2.1.3 可視化展示:

根據建物受震位移變形反應結果，採用高效能 GPU 對大量建物樓層進行渲染，結合 RGB 色錶與建物外牆紋理材質敷貼，進行建物地震衝擊高真實感模擬成果。

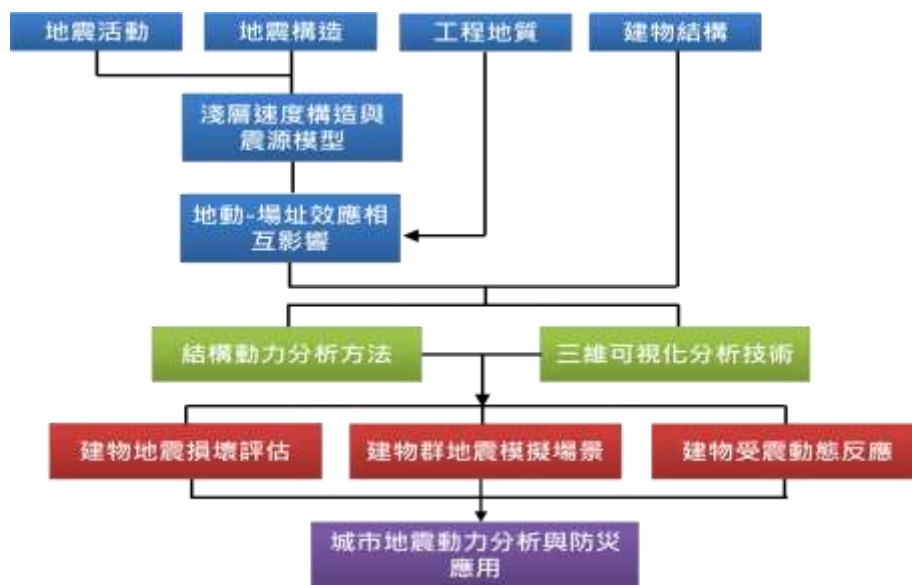


圖 1、城市建物群地震動力衝擊流程圖

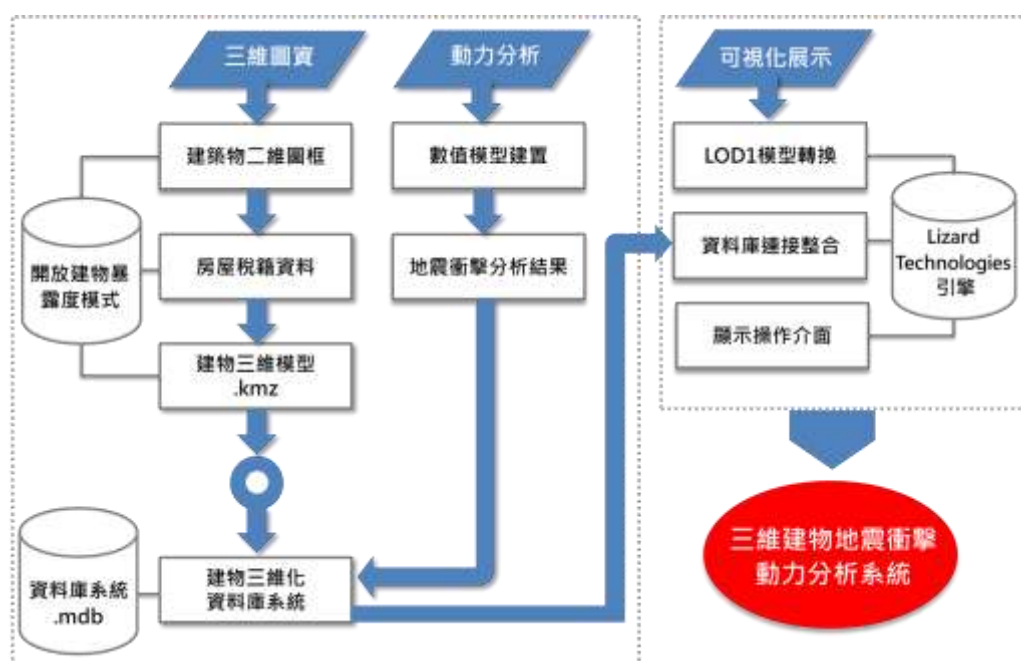


圖 2、三維建物動力分析展示系統架構

2.2 三維建物動態實體化

三維建物多邊形模型進行建置，有助於進行城市地震情境模擬之防災規劃、都市管理和災害應變作業，以都會區為例，三維建物動態實體視覺化，可讓防災管理者、決策者掌握資訊。因此，本研究提出基於多維度城市模型的地震衝擊動力模擬展示方法(圖3)，其中三維建物動態實體化方法，由四個元素組成：

(1) 確認建築外部多邊形範圍，建物識別主要工作為獲取建物外部多邊形，係由三維城市多邊形模型中，獲取單棟建築物的屬性資料，然後將數據資料分配到建築物幾何空間中，進而建置耐震三維化資料庫，

(2) 定義建築物屬性資料(如建築物高度、構造型式和建造年代等)；整合二維建物輪廓圖多邊形建築物外部多邊形，與耐震三維資料使用於地震模擬分析中。每個平面多邊形二維數據建築物使用在標識建築物上，主要功能為識別建築物的外部多邊形位置，

(3) 整合建物耐震三維化資料庫，並進行地震情境模擬，採用 MDOF 模型的分析程序，計算城市建築群非線性動力歷時分析，取得建物各樓層受震反應輸出結果，

(4) 多維度城市三維動態視覺化場景。對於各建築地震反應可由非線性地震歷時分析結果所獲得(如建物各樓層的位移量)將導入於相對應建物多邊形模型使用，進一步顯示出建物模型受震之反應，除建築物為對象外，二維基礎底圖(如正射航拍圖)，可套疊於城市場景中，真實呈現出道路街廓、公園綠地、植被等市區景觀，有效提高視覺化擬真程度。

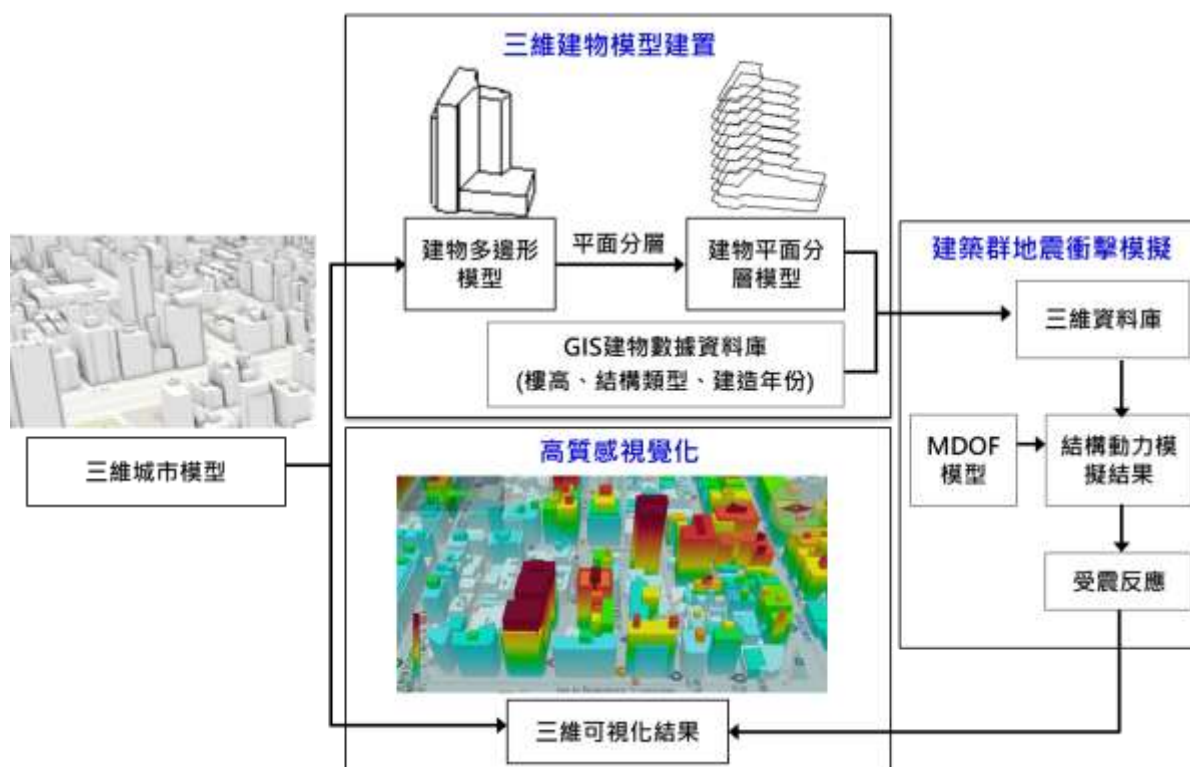


圖 3、三維建物耐震資料模型應用之作業程序

2.3 高性能 GPU 建物地震歷時分析

根據前述規劃項目，本研究將發展城市建築群地震衝擊動力分析展示平台，以單機版操作為主，獨立安裝執行於 Windows 作業系統。本年度開發階段以個別功能開發為主，針對使用者操作介面、功能、運行表現、資料匯入、數據格式轉換等，進行局部性分別測試，待各項單元功能測試可行性、使用性優化後，再進行系統整合。本系統為單機版應用程式，依各主題應用需求撰寫介面工具。本研究核心運算引擎採用 Lizard 的 3D 遊戲引擎渲染 3D 場景，引擎也擁有優異的效能。整體引擎主要以 C/C++ 撰寫，再根據不同的平台需求結合不同的開發環境與程式語言，本研究開發採用微軟 C#.NET Form 為主體，開發介面工具，再將 3D 繪圖引擎渲染結果繪製於 UI 介面元件上，圖 16 為系統開發引擎架構圖。

有鑑於城市建物群動力歷時資料的計算量相當巨大，故進行大量建物群密集型計算將是較重的負載，故本研究根據場景範圍進行空間切割為 256x256 的四邊形節點，計算範圍內建築物於四邊形的範圍內，讀取建物的相關資料，將資料預處理變成程式可快速讀取的檔案，首先將建物模型 KMZ 檔全部傳送後產製為每區的模式檔，預載入後對於畫面鏡頭所讀取到的區域，載入對應相關資訊，倘若畫面移動後再進行釋放資源，同時再載入畫面鏡頭對應區域資料，包含每區所用到的每棟建物的動態資料載入做連結，渲染根據每一個建物多邊形頂點估算樓層高度與樓層數給定動態資料，在圖形處理技術當中，GPU 渲染(Rendering)3D 場景模型將產生圖形的快速處理過程改變頂點的位置執行效能。

三、研究成果:多維度城市模型地震衝擊展示平台建置

3.1 系統架構

本研究開發多維度城市地震衝擊動力展示圖台，MDUES。有鑑於都會區有大量建築物，進行城市尺度建物群非線性動力時程分析時(Time History Analysis)，大量數據處理為重要工作，展示圖台採用高效能的 CPU/GPU 對大量化的建物多邊形進行分析與計算，主要為使用 Lizard 引擎渲染三維場景，分析城市建物各樓層受震位移變形的反應，圖台開發上採用 C#.NET Form 為主體，將三維繪圖引擎渲染結果繪製於使用者介面元件上，表 1 為 MDUES 系統規格與核心引擎特點。

表 1、MDUES 系統規格與核心引擎特點

電腦規格	Asus Ws690T 繪圖工作站
顯示卡	AMD Radeon Pro WX9100
核心引擎	LIZARD 引擎優勢 ➤ 即時 3D 演算效果、外部軟硬體雙向溝通

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 使用 Objective-C 結合引擎的主體 ➤ 圖形最佳化，支援 DirectX 11 與 OpenGL ➤ 可匯入高階析度模型自定義開發功能強大 ➤ 開發介面為非圖形介面，需具備 C/C++ 撰寫能力
--	---

MDUES 圖台功能架構如圖 4 所示，包括三維空間資訊、地震衝擊資料、三維動態模擬、建築資訊模型等四項功能。其中基礎資料庫包含房屋二維圖框、三維建物模型、耐震資料等；動力分析模組為地震事件模擬結果預處理程序；空間資料整合技術包含使用者操作介面、預處理資料連接、建物模型轉換等。本研究為進行城市地震衝擊可視化多元資訊，以三維空間資訊(建物模型)作基礎資料，然後整合動力分析模擬結果、地震動波傳歷時與建物耐震資料，並整合建築資訊模型(Building Information Modeling, BIM)資料，讓使用者透過動態模擬展示與查詢功能，有效評估都會區地震衝擊風險，圖 5 為使用者操作介面。

圖台功能架構



圖 4、MDUES 功能架構



圖 5、使用者操作介面(資料來源 MDUES 圖台)

3.2 圖台功能特性

(1) 三維視覺化：

基於視覺化之需求，由過去二維平面展示，三維空間融入體積概念來描述實際場景，表現地理位置與空間相位關係，除此之外，立體多邊形展示技術，不僅可表達物件的平面關係，同時表達對應垂直立面關係。三維空間資訊也彌補二維空間資料支持其他資料之類型，如：高程資訊、地形（正射影像）等。三維空間屬性資料包含建物外觀資訊，如顏色、透明度、外牆紋理。因此，結合著三維建模技術使用，三維建物資訊可以更明確的描述出三維空間物件外部輪廓，常見的視覺化展式應用，常為多邊形幾何建模之應用，以三維向量模型為例，可進行三維幾何與參數訊息，利用數值與物理型態的描述與體現方式，傳遞幾何資訊與位相資訊，圖 24 為 MDUES 平台提供之城市三維建物視覺化場景，包含全市完整三維化建物模型、正射航照圖(道路、植被、公園綠地與行道樹等)，3D 建物擬真模型如圖 6 所示。



圖 6、城市三維建物視覺化場景(資料來源 MDUES 圖台)

(2) 基礎資訊與管理：

三維建物模型除基礎屬性資料作為分析應用之功能外，亦應提供三維空間索引查詢的功能，可提高系統獲取資料運算效率。經由三維資料格式經優化處理後，可讓使用者進行資料查詢與分析處理。含全市建物耐震三維化資料的空間位置與屬性資料，如建號、樓層數、房屋用途、空間座標(WGS84 或 TWD97 座標系統)、建造年代、構造別、耐震設計等級與備註等，將建築物耐震資訊三維化，滿足使用者視覺上的需求。

(3) 功能主題圖查詢：

為進行地震衝擊真實可視化成果，MDUES 圖台有效整合三維建物模型(白模、擬真建物外牆紋理)、基礎底圖(開放式電子地圖、正射航拍圖)，有效創造出高真實感三維場景。本研究整合建物耐震資料庫，提供多維度建物耐震基礎資料、耐震特性分類查詢(構造形式、建照年代、使用類別)功能。然而，耐震三維化資料庫亦可利用其在空間上的位相關係與主題圖分析功能，找出不同建物特性類別，協助使用者查詢建物的耐震屬性資料，如建照年代、構造類別、建築物使用類別等三大類。一般二維圖資與三維建物同時展示時，建物往往將遮蔽住底下的二維圖框圖資。本研究利用模型著色功能，模型將依據二維圖資所呈現之顏色進行上色，解決相互遮蔽的問題。在大範圍的城市主題圖展示時，可直觀的呈現各建物所在的狀況。

(4) 建築資訊模型(Building Information Modeling, BIM)整合應用

目前三維建築模型技術已廣泛應用在許多不同領域，常見的應用方式是將土木工程設計或建築資訊模型 (Building Information Modeling, BIM)，利用詳細描述之建物形狀、尺寸、位置與細部元件構造等資訊，本研究將三維建築 BIM 模型轉換處理成獨立的三維物件，整合至三維模型視覺化展示平台上，可作為後續查詢與分析應用，本年度

以關鍵基礎設施為示範例，優先選定捷運松江南京站，將 BIM 模型進行整合，可提供場站基地位置、建築資訊模型拆解詳細資訊，如地面層、穿堂與月台的細部資訊。整合過程將 BIM 資訊模型透過轉換程序，將 BIM 模型加以簡化後，以適合之檔案格式呈現，並且開發定位查詢功能，可於三維展示圖台上，查看模型基本資訊及橫、縱剖面圖(如圖 7)，本三維圖台可匯入、套疊及展示簡化之 BIM 模型。未來將針對細緻 BIM 模型進行視角調整、屬性查詢、剖面呈現、透明檢視、簡易材料數量統計等功能，達到三維模型展示與 BIM 整合互動應用之可能性。



圖 7、建築資訊 BIM 模型整合展示(資料來源 MDUES 圖台)

四、結論

本研究相關研究成果可應用於都會區建物衝擊高風險辨識與評估，助於地震防災規劃和地震災害風險資訊提供參考，但研究標的僅限於城市的建物，未來可整合橋梁、道路、或維生管線設施，完整對多維度地震災害風險評估進行研究。

建物三維模型具有空間優越性，目前國內都市防救災計畫較無導入建物三維模型進行相關研究與探討，未來防救災相關單位可以研擬建物三維模型應於都會區災害情境分析，以提升模擬的視覺化與細緻程度。

參考文獻

1. Xiong Chen, Xinzheng Hu, Xuchuan Lin, Zhen Xu, and Liping Ye (2017), "Parameter Determination and Damage Assessment for THA-Based Regional Seismic Damage Prediction of Multi-Story Buildings," Journal of Earthquake Engineering, Vol. 21, No.3,

pp. 461-485.

2. Paula Redwelk., Paula Teves-Costa., Ine's Vilas-Boas., and Teresa Santos (2017) "3D City Models as a Visual Support Tool for the Analysis of Buildings Seismic Vulnerability: The Case of Lisbon," *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 8, pp. 308-325.
3. Muneo Hori., Tsuyoshi Ichimura., Lalith Wijerathne., Hideyuki Ohtani., Jiang Chen., Kohei Fujita and Hiroyuki Motoyama (2018) "Application of High Performance Computing to Earthquake Hazard and Disaster Estimation in Urban Area," *Frontiers in Built Environment*, Vol. 4, pp. 1-13.
4. Yongmei Zhai., Shenglong Chen., and Qianwen Ouyang (2019) "GIS-Based Seismic Hazard Prediction System for Urban Earthquake Disaster Prevention Planning," *Sustainability*, Vol. 11, No. 9, 2620.
5. Yongmel Zhal and Shenglong Chen (2020) "A Seismic Hazard Prediction System for Urban Buildings Based on Time-History Analysis," *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2020, pp. 1-18.
6. Xinzheng Lu and Hong Guan (2021) "Visualization and High-Performance Computing for City-Scale Nonlinear Time-History Analyses," *Earthquake Disaster Simulation of Civil Infrastructures*, pp.641-711.