

國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

結構物阻隔對波傳影響之探究

Study of Wave Propagation Problem with
Existing Structure



研究生：余欣穎

指導教授：鄭復平 博士

中華民國 九十七年 九月

結構物阻隔對波傳影響之探究

Study of Wave Propagation Problem with Existing Structure

研究生：余欣穎

Student : Hsin-Ying Yu

指導教授：鄭復平 博士

Advisor : Dr. Fu-Ping Cheng

國立交通大學



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering
September 2008
HsinChu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年 九 月

結構物阻隔對波傳影響之探究

學生：余欣穎

指導教授：鄭復平 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

本研究在探討振波受建築物阻隔後之傳遞行為，採用有限元素法為數值分析工具，在半無限空間上進行分析，並使用無反射邊界以消除應力波反射問題。研究變數有建築物基礎深度的變化、建築物高度、建築物與振源的距離及振源的位置等四種變數。

經研究分析後可得以下幾點：(1) 建築物基礎深度影響最大；(2) 建築物高度影響最小；(3) 振源偏離建築物較直接受到阻隔影響為大；(4) 相同距離之測點量出振源與建築物愈遠效果愈好。

關鍵字：振動、衰減、數值分析、有限元素法、波傳

Study of Wave Propagation Problem with Existing Structure

Student : Hsin-Ying Yu

Advisor : Dr. Fu-Ping Cheng

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The insulation of wave propagation due to the existing of building was investigated in this thesis. The research was executed in an semi-infinite soil domain by finite element method with non-reflection boundary. The parameters in this research include (1) The high of the building (2) The depth of the foundation (3) The position of impact force (4) The distance between impact force and building.

The results of this research show that (1) The depth of the building have the most significant effect (2) The high of the building have minor effect only (3) The existing of building reduce the response of impact force (4) At same position, the response decrease with increase of the distance between building and impact force.

Keyword: vibration, attenuation, numerical analysis, finite element method, wave propagation

誌謝

承蒙恩師 鄭復平教授於這兩年來悉心指導，使學生無論在專業知識亦或是邏輯思考能力方面皆多所啟迪，並在論文寫作期間逐字斧正，方使本文得以順利完成。對於吾師的教誨，在此謹致上最誠摯的敬意與謝意。此外，非常感謝 劉俊秀教授於論文撰寫期間的指導和幫助，並為學生解惑，使學生受益良多。

論文口試期間，感謝口試委員 洪士林教授、黃炯憲教授、林昌佑教授及 劉俊秀教授，對本文不吝指教並提出寶貴建議，使得本論文得以更臻完善，在此獻上無限的感激。

於交大研究所生活中，感謝胡正甯學長在課業上的細心指導；梁小胖學長在生活上的協助；研究所同窗好友小昱兒和耿豪在研究時期提供寶貴的意見；以及小白、家杰、哲維、羅開、銘浩、政偉、銘亨和怡廷的加油打氣，也感謝廖仁壽及周勝男兩位學長的勉勵和分享，在此一並至上最真誠的謝意。還需感謝明軒、紹宇及億峰的鼓勵與生活上的育樂，使得求學期間壓力得以抒解。

最後將本論文獻給我最敬愛的父母親及哥哥，感謝家人這二十多年來不辭辛勞的養育栽培與支持，讓我無後顧之憂完成研究所的求學生涯。最重要的一點，是特別感謝我生命中的貴人巫小穎於研究的關鍵時期不斷地給予鼓勵和支持，成就我最大的動力。因為一路上有你們的包容和體諒，讓我得以順利完成學業，所以謝謝所有愛我及我愛的人。

目 錄

摘 要	iii
ABSTRACT	iv
誌 謝	v
目 錄	vi
表 目 錄	ix
圖 目 錄	x
第一章 緒論	1
1-1 研究動機與目的	1
1-2 研究方法與範圍	2
1-3 論文架構與概述	2
第二章 文獻回顧	4
2-1 應力波傳簡介	4
2-1-1 波傳特性	5
2-1-2 土壤振波衰減模式	5
2-2 振波波傳探究	9
2-2-1 振動衰減相關研究	9
2-2-2 彈性波傳控制方程	12
2-3 波傳遇阻隔之研究	17

第三章 數值模擬方法.....	20
3-1 動態有限元素理論.....	21
3-2 三維立體元素基本顯示算法.....	24
3-3 數值模型收斂性之探討.....	26
3-4 數值模擬基本架構.....	27
3-4-1 模型尺寸	27
3-4-2 定義材料性質、阻尼控制	28
3-4-3 網格分割	29
3-4-4 施加邊界條件	30
3-4-5 施加荷重	31
3-4-6 求解基本參數控制	31
第四章 數值分析與結果.....	33
4-1 驗證數值模型精確度.....	33
4-2 模擬問題描述.....	36
4-3 振源作用在 A 測線對兩條測線之影響.....	38
4-4 振源位置不同之影響.....	39
4-5 建築物不同樓層數下振波衰減之分析	40
4-6 建築物開挖深度對振波之影響行為	41
4-7 振源與建築物不同距離之影響	43



第五章 結論與建議.....	45
5.1 結論.....	45
5.2 建議.....	46
參考文獻.....	47



表 目 錄

表 2.1 幾何阻尼係數[15]	50
表 2.2 材料阻尼係數[15]	51
表 2.3 不同波源之幾何阻尼係數[6]	52
表 2.4 南科土層波速與動態彈性模數[25]	52
表 3.1 模型 Y 方向寬度對波傳影響	53
表 3.2 模型 Z 方向寬度對波傳影響	53
表 4.1 波傳衰減分析結果[5]	54
表 4.2 不同樓層等值質量密度	55



圖 目 錄

圖 1.1 研究流程圖	56
圖 2.1 振波於彈性半無限空間之運動模式(Bolt, 1976)	57
圖 2.2 各種彈性波之傳遞速度比與柏松比之關係[9]	57
圖 2.3 半無限彈性體波傳形式(莊家瑄, 2003)	58
圖 2.4 土粒最大速度與振源距離之關係[18]	58
圖 2.5 中鼎公司在南科園區所測得之材料阻尼係數 α 值[22]	59
圖 2.6 中鼎公司於曾文溪河床旁量測列車振動之情形[22]	60
圖 2.7 元素表面應力分佈圖	61
圖 3.1 物體位移示意圖	62
圖 3.2 八節點的六面立體元素	62
圖 3.3 Y 方向單元數收斂示意圖	63
圖 3.4 Z 方向對稱單元數收斂示意圖	63
圖 3.5 軟體分析處理作業流程	64
圖 3.6 時間-位移之荷重曲線	65
圖 3.7 顯式時間積分的最小元素長度	65
圖 4.1 動態載重施加於半無限域空間[5]	66
圖 4.2 波傳衰減曲線圖[5]	66
圖 4.3 數值正確性驗證	67

圖 4.4 振源於 A 測線前數值模擬分析示意圖.....	68
圖 4.5 振源於 B 測線前數值模擬分析示意圖.....	69
圖 4.6 振波於不同測點 Y 方向衰減行為.....	70
圖 4.7 距振源 12m 處 X 方向位移歷時.....	70
圖 4.8 距振源 12m 處 Y 方向位移歷時.....	71
圖 4.9 距振源 12m 處 Z 方向位移歷時.....	71
圖 4.10 振源在 A 測線前之波傳衰減行為.....	72
圖 4.11 振源在 A 測線前之四層樓高無地下室模型.....	72
圖 4.12 振源在 A 測線前其 A 測線與 B 測線之分析.....	73
圖 4.13 振動源不同之模型.....	74
圖 4.14 不同振動源對於 A 測線之測點分析.....	75
圖 4.15 不同振動源對於 B 測線之測點分析.....	75
圖 4.16 振源於 A 測線前，不同樓層數之模型.....	76
圖 4.17 振源於 A 測線前，不同樓層數對 A 測線之分析.....	77
圖 4.18 振源於 A 測線前，不同樓層數對 B 測線之分析.....	77
圖 4.19 振源於 A 測線前，改變開挖深度之模型.....	78
圖 4.20 振源於 A 測線前，不同開挖深度對 A 測線之分析.....	79
圖 4.21 振源於 A 測線前，不同開挖深度對 B 測線之分析.....	79
圖 4.22 振源於 B 測線前，改變開挖深度之模型.....	80

圖 4.23 振源於 B 測線前，不同開挖深度對 A 測線之分析.....	81
圖 4.24 振源於 B 測線前，不同開挖深度對 B 測線之分析.....	81
圖 4.25 振源於 A 測線前，建物位置不同之模型.....	82
圖 4.26 振源於 A 測線前，建物位置不同之 A 測線分析.....	83



第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

日常生活中常會遭遇振動現象，如地震引發之強烈振動；鐵路行經路線導致地盤振動；機械運轉時產生之規則頻率。電子精密機械、半導體等產業對於地盤振動甚為敏感，引起對振動影響及建築物在阻隔、減振方面之重視。

綜觀基礎振動、建設工程施工、機械運轉或交通運輸均會導致地表振動，當這些振動經土壤傳至鄰近結構物，則會因振源產生能量的大小、距離而對人體或結構物有不同的影響和破壞。除了一般所謂的有感振動外，亦有人體無法察覺到之微小振動源，雖然人體無從感覺，但這些微振可能使靈敏度高的儀器設備運作受到影響，像是對現代高科技晶圓廠產業之生產產品控往往造成相當程度的影響。

本研究即針對振動問題，藉由數值分析優勢，瞭解振波在土層中傳遞之衰減行為，及研究土層中人造結構物相對距離、位置、高度等，對振動波傳影響之特性，提供建築業者、高科技產業儀器等振動分析參考資料，使得便捷的交通運輸與高科技產業間發展更能相輔相成，同時能觀察建築物對振波之阻隔行為。

1-2 研究方法與範圍

本研究中主要探討建築物對於所施予時間與位移衝擊載重之振源，採用有限元素法 (finite element method) 分析半無限域之彈性波傳行為，建立整體模型架構，並分別在不同開挖深度與不同建築物樓層高度及變化建築物區域位置下，探討其對振波之波傳影響，其次考慮振動源位置對於振波之影響。

在模型分析方面，與解析解比對後，建立最合適之整體分析範圍與邊界尺寸，並參考實際地質與建築物之材料參數作為依據，進而分析動態之振動波在土層中連續傳遞行為。

1-3 論文架構與概述

本文分別就所蒐集之有限元素法與波傳相關文獻，整理其理論作為研究基礎，再以有限元素分析軟體設定模型及各項參數，接著輸入相關控制變數與資料，進而對波傳行為作分項探討。圖 1.1 為本研究之流程圖。而論文各章節內容簡述如下：

第一章：緒論，於此說明研究動機、目的、方法與範圍。

第二章：文獻回顧，簡述應力波傳之概念；相關振波波傳探究；波傳遇阻隔之研究。

第三章：數值模擬方法，說明動態有限元素法理論；三維立體元素基本顯示算法；藉由數值模型探討其收斂、準確性；並介紹數值模擬的基

本架構，探討模型建立、參數設定、網格劃分、邊界條件及荷重施加之建構。

第四章：數值分析與結果，在此分別就建築物不同樓層數、建築物不同開挖深度、振源與建築物不同距離說明其數值分析結果，並探討在振源位置改變下，不同測點之影響關係。

第五章：結論與建議，依據第四章之數值分析與結果，討論不同變數條件下波傳特性，並根據分析過程與結果，提出相關之建議，期能提供後續結構之設計與參考。



第二章 文獻回顧

本章節在於回顧過去國內外學者對於波傳、振動及波傳遇阻隔之研究。由於各國土木工程與交通運輸逐漸開發，加上人們對於生活品質要求的提升，因此增加振動方面研究的重要性。在此希望藉由參考前人的研究成果，以作為本研究探討振波衰減的基礎。

振源所引發的地表振動大部分是不規則的，在過往研究中包含了現地測量，用已知現地數據的經驗方式，嘗試預測在特定距離中作評估振波傳遞的現象；或以數值分析進而模擬已知振動源及振動傳播路徑，用以評估依振源不同距離之振動值大小，此外也有設定不同參數所產生影響之研究。

在講究可用土地日漸減少的环境中，經濟發展、交通便捷及如何來維護高科技廠房和生活品質與人民安全之相互平衡條件下，使地表振動維持在容許的規範值內，已被當作重要的關注要項。因此本文著眼於土層地表中設置合適的阻波障礙物來研究波傳衰減之影響，並探討振動源與結構物相對之互制關係。

2-1 應力波傳簡介

任何物體中介質受到擾動，均可能會產生振波。當土層受到局部擾動，即會使土壤顆粒產生變形、相互摩擦，此變形、摩擦便會造成土壤顆粒間的運動，會以波的形式朝向各方向傳遞。

所謂之波傳 (wave propagation) 可視為能量的傳遞，多數能量傳遞需仰賴介質，而當傳遞介質為彈性體時，即可稱為彈性波傳遞。

2-1-1 波傳特性

於數值方法分析中，土壤被視為彈性體 (elastic body)，並假設分佈於半無限空間 (infinite half-space)。

土壤中傳遞之應力波主要能分為實體波 (body waves) 與表面波 (surface waves)，而實體波又可分為壓力波 (compression wave, P-wave) 與剪力波 (shear wave, S-wave)；表面波則可分成雷利波 (rayleigh wave, R-wave) 與拉夫波 (love wave, L-wave)，波形傳遞及質點運動情形如圖2.1 (Bolt, 1976)。一般而言，表面波速遠低於壓力波速，而與剪力波速相近，此三種波速與土壤中柏松比 (poisson's ratio) 有相對之比例關係，如圖2.2所示。各波形於土壤半無限空間狀態中與質點運動量之波傳形式，如圖2.3 (莊家瑄, 2003)。

2-1-2 土壤振波衰減模式

一般而言，人為因素所產生之振波，大部分為振動基礎周邊及底部與土壤間之互制作用所產生，接著再以壓力波與剪力波向外傳遞，當傳播到地表面時，部分能量會轉換由表面波傳遞，部分則被反射回來進入土層之中，因此於振源一定距離外，將有壓力波、剪力波與雷 波同時存在情形。

在真實材料中，振波於土壤中傳遞時，會隨著與振源距離的增加而使得振幅逐漸減小。Theissen、Wood[15]假設土壤為一非完全彈性體，振幅將因傳播距離的增加而逐漸減小終至消失，研究中並統計不同阻尼係數，如表2.1、表2.2所示。造成此現象的主要原因有二：

1. 幾何阻尼 (geometrical damping)

波向外傳遞時，因往四周擴散而使能量密度降低，此現象所造成波動振幅的損失稱為幾何阻尼效應。Ewing[4]從能量密度 (energy density) 的觀點說明，當地震引起的實體波在土壤中傳遞時，球狀波前之表面積會隨傳播距離增加而增加，能量密度便隨著球狀波前的表面積增加而減小，加上能量密度與振幅的平方成正比，因此實體波的振幅在土壤內傳播時隨距離增加而衰減，即振幅之大小與距離成反比，故完全彈性介質中亦存在幾何阻尼效應。

幾何阻尼效應乃受波傳、振源類型及位置影響，Gutowski、Dym[6]對於不同振源類型與不同振源位置的波傳問題做過解析，整理出幾何阻尼效應之影響，如表2.3所示。當接收器位於地表時，研究結果顯示如下：(1) 點振源作用於地表時，能量呈半球狀擴散，雷利波因位於地面，故振幅的大小與振源距離的平方根成反比，而在地表傳遞的實體波振幅則與距離的平方成反比。(2) 線振源作用於地表時，能量則是以半圓柱狀擴散，因此振幅的衰減較慢。位於地表面的雷利波以類似一維的波向外傳遞，地表面

上並不衰減，而實體波的振幅則與振源距離成反比。(3) 振源位在地表下某深度處，點振源之能量以球狀擴散，實體波的振幅與距離成反比；線振源之能量以圓柱狀擴散，實體波的振幅與距離平方根成反比。

以一作用於彈性半無限空間之衝擊振源來說，實體波係沿著半球形之波前向外傳遞，倘若不考慮材料阻尼的影響，其振幅之衰減率與距離成指數之反比關係。傳遞之波在土體中傳遞，振幅之大小與距離 (r) 成反比；傳遞之波在土體表面傳遞，振幅將以 ($\frac{1}{r}$) 的比例衰減。若在地表傳遞時，振幅以 ($\frac{1}{r^2}$) 的比例衰減，就雷利波而言，沿著接近地表處之圓柱形波前向外傳遞，其振幅將以 (\sqrt{r}) 的比例衰減。由上可知，在地表面以雷利波最不易衰減，因此在經過相當距離後，雷利波之振幅將遠大於實體波之振幅。



2. 材料阻尼 (material damping)

能量在土壤傳遞過程中，因土壤顆粒之間互相摩擦及凝聚 (hysteresis) 使得波傳能量因材料阻尼之效應，進而轉換成熱能導致能量逐漸消散，並造成振幅之衰減。Kramer[11]將介質視為一黏彈性體，以Kelvin-Voigt模式加以模擬，推導結果顯示因材料阻尼之作用，使得振幅與其距振源距離的指數函數值成反比，亦即振波之振幅會因傳播距離越遠而衰減。

振波衰減的原因主要為幾何阻尼效應與材料阻尼效應，此現象以方程式表示為[11]：

$$A_n = A_0 \left(\frac{D_0}{D} \right)^\beta \times \exp[-\alpha(D - D_0)] \quad (2-1)$$

式中，

A_n ：距振源 D 處之振幅（此指加速度、速度及位移之振幅）

A_0 ：距振源 D_0 處之參考振幅

β ：幾何阻尼係數

α ：材料阻尼係數（1/m）

材料阻尼與幾何阻尼比較其效應影響甚小，因此常將材料阻尼效應項忽略不計，則（2-1）式可表示為：

$$A_n = A_0 \left(\frac{D_0}{D} \right)^\beta \quad (2-2)$$

Wiss[18]藉著對打樁振動衰減現象的研究結果，提出忽略振波之波傳型式，只單純考慮振波隨著距離越遠而有衰減的趨勢。地盤振動速度以 V 表示，振幅 K 則取代距振源單位距離（即 $D_0=1$ ）的參考土粒運動速度 A_0 ，因此可將（2-1）式改寫成：

$$V = KD^{-n} \quad (2-3)$$

其中，

V ：地表振動速度

K ：距振源一單位距離之振幅

D ：距振源之單位距離

n ：衰減係數

作為地表土粒速度衰減公式，並將(2-3)式中 V 與 D 的關係繪於全對數座標軸上，如圖2.4所示，可表示為一固定斜率之直線。

2-2 振波波傳探究

2-2-1 振動衰減相關研究

Bornitz[2]將打樁施工引致之振動透過土層傳遞之行為視為點振源處理，且假設所產生之地表振動主要以雷利波型式向四周傳遞，提出一振波衰減之經驗公式。

Edwards和Northwood[3]曾對開炸所引致之振動衰減現象進行研究，假設材料阻尼之效應與幾何阻尼之效應相比甚小，因此材料阻尼效應可以忽略不計。

Wiss[16]分別就各種不同性質土壤，包含黏土、乾砂、沖積土、濕砂構成之不同地盤，以現場測試的方式研究振波在地盤中傳播及衰減之情形，並分別提出各種土層構成地盤振波衰減的經驗公式。

李建中[20]藉著所蒐集之現場量測數據顯示，振幅衰減率會隨樁機錘擊能量之增加而增加，顯示土壤摩擦阻尼隨著應變增加作非線性之增加，而使衰減率增加。

倪勝火[23]針對南科園區進行微振動量測，分別量測台鐵各級列車行經南科園區附近路堤段與橋墩段的振動量，及南科園區內打樁引致之振動

量，進行衰減特性分析，以瞭解不同振源或同一振源不同支撐結構的衰減特性。就衰減程度而言，列車行駛於路堤上所引致之振動衰減較橋墩上快，但於200m之後兩者振動衰減相差不大。另外，打樁引致之振動在鉛垂方向，在25m~300m內可衰減25~30dB，但與車行方向垂直之振動量衰減就顯緩慢。

中鼎[22]曾使用三種不同振源，分別為18噸重錘、Dynasource和振動機（shaker），於民國87年8月間在南科園區進行土層振動衰減試驗，其使用1/3八分音階頻譜分析，再對各中心頻率迴歸計算 α 值。典型對應頻率6.3Hz之 α 值為0.014（1/m），如圖2.5（a）所示。各振源所得 α 值頻譜結果如圖2.5（b）所示，由圖中可知，其量測到南科園區之 α 值在頻率4Hz~100Hz時，約介在0.008~0.08（1/m）之間。除此之外，中鼎亦曾於民國87年8月下旬在曾文溪河床對台鐵列車行經橋墩引致振動之衰減量測，距橋墩10m及200m處量測到振動振幅與頻率關係如圖2.6（a）及（b）所示。圖中顯示5種列車通過橋墩引致之振動，振幅在低頻部份（4Hz~16Hz）衰減有限。其他地區不同土層量測鐵路列車引致之振動特性則如圖2.6（c）所示，圖中顯示地層特性及軌道基礎對不同振動頻率的振幅大小有顯著影響。

陳正興[25]在南科園區內進行現地振動衰減量測試驗，試驗地點的土層波速與動態彈性模數如表2.4所示，使用振動器與12噸之重錘為振源，對一淺基礎作強迫振動。根據水平試驗結果，地層衰減係數 α 在低頻率（2~8Hz）時較小，平均約為0.002，且變異性較大；在高頻率時則隨頻率增加而增加，

當頻率由10Hz增加至22Hz， α 值約由0.0085漸增至0.015，至於垂直試驗之地表振動衰減情形， α 值約由0.009漸增至0.035。重錘落擊試驗量測分析結果，有效頻寬為5~25Hz，分析所得的地層衰減係數 α 值隨頻率增加有增加趨勢，水平徑向 α 值介於0.0034~0.0080之間，此外鉛垂方向 α 值介於0.0048~0.0114之間。

黃俊鴻[24]藉榮民工程股份有限公司委託中央大學作打樁振動對鄰近結構物影響之研究中，整理了國內幾處工程打樁資料，並以Wiss（1967）所建議之經驗公式加以迴歸，其中包括最大加速度、最大速度、最大位移等資料。結果顯示衰減情形均能以經驗公式加以表示，並可作為打樁振動對鄰房影響之初步檢定。

Kim和Lee[9]對於不同振源型式產生之地表振動進行量測，包括火車行駛荷重、地表下的爆破、摩擦樁之打擊以及液壓式重錘夯實。研究顯示火車行駛荷重可視為點振源或線振源，其能量主要是以壓力波傳遞，而振動量的大小及衰減率主要受到列車數目與列車速度所影響，特別是列車長度短且速度快的列車，乃因振源模式較近似點振源，其幾何阻尼係數約為1.5，造成振動衰減明顯較快。至於地表下的爆破則為點振源並產生實體波，摩擦樁之打擊為點振源主要以SV波傳遞能量，液壓式重錘夯實也是點振源但主要以表面波傳遞能量。

林建儀[26]配合國家地震中心研究南部科學園區土層對振波衰減行為

進行試驗，量測不同基礎型式及不同振源型式所產生振波隨距離衰減的情形，試驗結果顯示同一土層狀況下穩態振動與脈衝振動所得之阻尼係數相差不多，且得知南科土層之材料阻尼係數約為0.02 (1/m)，幾何阻尼係數約為1.4。發現土壤阻尼係數會隨振動頻率之增加而增加，另外不同型式振源及振動能量之大小對土壤阻尼係數無顯著之影響。

曾祥岳[27]在台北捷運木柵線與淡水線進行5個測線地層衰減量測，主要量測列車通過時，所引致之地表振動在現地衰減的情形。分析結果顯示，木柵線之衰減係數 n 在X、Y、Z方向分別為0.404、0.701和0.356， α 在X、Y、Z方向分別為0.0001、0.0147與0.0001；淡水線之衰減係數 n 在X、Y、Z方向分別為1.076、0.801和0.856， α 在X、Y、Z方向分別為0.214、0.124與0.139。並於南部科學園區路竹基地進行地層衰減量測，振源為121kg之落錘，落距為1.5m，以最大質點速度值分析顯示，該區材料阻尼係數 α 在X方向約為0.036 (1/m)，Y方向約為0.030 (1/m)，Z方向約為0.031 (1/m)；衰減係數 n 在X方向約為1.406，Y方向約為1.226，Z方向約為1.248。

2-2-2 彈性波傳遞控制方程

彈性波傳遞控制方程式的推導已有上百年歷史，Richard[13]等曾於著作中，利用材料之組成律、應變與位移的幾何關係，加上力平衡原理，來推得彈性波傳遞控制方程式，下面就其推導過程加以說明：

1. 材料的組成律

首先由廣義虎克定律 (general hooke's law) 得知，介質元素受力產生變形，應力與應變的關係可由 $[\sigma]=[D][\varepsilon]$ 來決定。當介質為均質、等向、線彈性材料時，材料的勁度矩陣 $[D]$ 可用兩個拉姆常數 (Lame's constants) λ 和 μ 表示。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

當物質為均質、等向性時

$$[D] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G$$

式中，

λ 、 μ ：拉姆常數

E ：楊氏係數 (Young's modulus)

G ：剪力模數 (shear modulus)

ν ：蒲松比


σ ：作用於介質元素上的應力

ε ：介質元素的軸向應變

γ ：介質元素的剪應變

2. 應變與位移的幾何方程關係式

在彈性及均質等向的材料中，位移與應變的幾何方程關係式定義為

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$


其中 u 、 v 、 w 為介質元素 x 、 y 、 z 三方向的變位，將式(2-5)、式(2-6)代入式(2-4)，得

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda+2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda+2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda+2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

式(2-7)展開後可得波傳介質元素應力與應變的關係式

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + (\lambda) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + (\lambda) \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2-8)$$

$$\sigma_{yy} = (\lambda) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + (\lambda) \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2-9)$$

$$\sigma_{zz} = (\lambda) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + (\lambda) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2-10)$$

$$\sigma_{xy} = (\mu) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2-11)$$

$$\sigma_{yz} = (\mu) \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2-12)$$

$$\sigma_{zx} = (\mu) \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2-13)$$

3. 力平衡方程式

根據牛頓第二運動定律，一個邊長為 dx 、 dy 、 dz ，密度為 ρ 之微小元素，如圖2.7，若忽略體力（body force）之作用，可求得直角座標系三個方向的力平衡控制方程式

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 \\ \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx - \sigma_{xx} \right) dydz + \left(\sigma_{yx} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} dy - \sigma_{yx} \right) dx dz + \\ \left(\sigma_{zx} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} dz - \sigma_{zx} \right) dx dy = \rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2-14)$$

同除 $dx dy dz$ 整理可得

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \quad (2-15)$$

同理， $\sum F_y = 0$ 可得

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \quad (2-16)$$

$\Sigma F_z = 0$ 可得

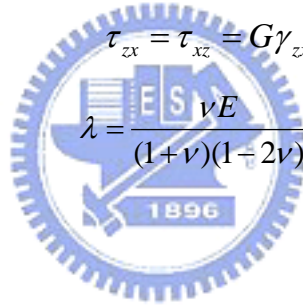
$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2-17)$$

u 、 v 和 w 分別為 x 、 y 與 z 方向的位移。

用位移表示方程式(2-15~2-17)的右式，可使用下列彈性介質的關係：

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda \bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_{xx} & \tau_{xy} &= \tau_{yx} = G\gamma_{xy} \\ \sigma_{yy} &= \lambda \bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_{yy} & \tau_{yz} &= \tau_{zy} = G\gamma_{yz} \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= \lambda \bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_{zz} & \tau_{zx} &= \tau_{xz} = G\gamma_{zx} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} & \lambda &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \end{aligned}$$



式中，

ν ：蒲松比

λ 和 G ：拉姆常數

$\bar{\varepsilon}$ ：體積膨脹，一般定義 $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$

此外亦需使用下列以位移表示應變與旋轉的關係式：

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2\bar{\omega}_{xx} &= \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2\bar{\omega}_{yy} &= \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & 2\bar{\omega}_{zz} &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \quad (2-19)$$

$\bar{\omega}$ 為對每一軸的旋轉。將方程式(2-15)、(2-18)與(2-19)作適當的結

合，得

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + G \nabla^2 u \quad (2-20)$$

同理，式 (2-16) 和 (2-17) 可改寫為

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} + G \nabla^2 v \quad (2-21)$$

與

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + G \nabla^2 w \quad (2-22)$$

其中 ∇^2 被定義成

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

方程式 (2-20)、(2-21) 和 (2-22) 即為常見之三維彈性波傳運動控制方程式。



2-3 波傳遇阻隔之研究

Wass[17]於頻率域中應用有限元素法解析槽形開口槽溝對水平剪力波的過濾阻隔效果，使用傳導邊界 (consistent transmitting boundary) 的觀念將幾何阻尼納入計算，再藉由改變槽溝深度及頻率來作比較。分析結果指出，開口槽溝對振波的阻隔效果在某些頻率下很有效，但在其他較高頻率時，效果可能不佳。

Aboudi[1]針對與時間有關的表面荷重，在彈性半空間設置屏障，利用有限差分法去計算地表反應，他認為地表存在屏障將影響雷利波的波

傳行為。

Haupt[7]應用有限元素法研究填充槽溝之阻隔效果，文中指出在被動阻隔控制中，相對於土壤的硬質填充材料槽溝作為振波阻隔機制時，槽溝斷面積之增加，阻隔效果也隨之提升，然而槽溝斷面的形狀對阻隔效果影響較小，但軟質填充槽溝之阻隔效果與槽溝斷面的形狀有關。在主動阻隔控制中，硬質填充槽溝的位置越接近振動基礎，阻隔效果越好，但軟質填充槽溝則呈相反之趨勢，甚至有振幅高於未設置槽溝時之地表振幅者。

May及Bolt[12]以有限元素法探討雙層土層中槽形開口槽溝對水平傳播的壓力波、垂直剪力波及水平剪力波之阻隔效果。研究結果顯示，振動頻率在4Hz~6Hz，槽溝深度大於0.6倍雷利波波長時，水平剪力波的波頻能量比可減少至無槽溝時的0.06倍，但在頻率小於4Hz時，卻放大為無槽溝時的1~2倍，甚至更大。

Yang[19]等人用三種不同隔震機制（開口槽溝、填充槽溝、彈性基礎）以有限、無限元素之混和模式法，研究上述三種隔震機制對高速列車所引發之地表振動的隔震效果。他將列車模擬成一垂直簡諧外力，考慮在平面應變條件下，把土壤分兩部分來切割，近域用有限元素分析模擬，而遠域則以無限元素模擬。藉此發現針對主動控制的頻率取決於基礎下方土壤實體波波長大小而定，其開口槽溝的深度是主要控制因素。他建議深度大於1倍雷利波波長，寬度大於0.3倍雷利波波長可得到較滿意的振波阻隔。彈性

基礎方面，最好上方底墊厚度能大於0.3倍雷利波波長。

Klein[10]等人，以三維頻率域邊界元素法，研究開口槽溝對振波阻隔效率，配合現場量測的結果作為對照來檢驗典型的隔震問題。其分析結果顯示槽溝深度仍然是主要的控制參數。

Kattis[8]等人，利用三維頻率域邊界元素法分析排樁與槽溝之振波阻隔效率，排樁斷面以管狀、方形為主並再分成空心，實心四種斷面進行分析。其研究結果顯示，除了長度，寬度及深度是主要的控制因素外，排樁間距也是主要的參數之一。

由以上文獻回顧可知，以往振波阻隔之數值研究大多集中在二維方面，然而在結構物本身對振波阻隔之影響的研究較少深入討論。因此，本研究將以三維尺度分析建築物對振波減振效率的影響。

第三章 數值模擬方法

近年來運用電腦數值分析方法以較低的成本達到與實際情況最為接近的分析方式，加上資訊電子業的快速發展使得電腦軟硬體科技不斷提升。目前採用數值方法分析工程問題已十分受到重視，在分析過程中若發現某些假設條件錯誤，也只要修正部分參數即可重新進行模擬，而不需額外花費去更改設備、材料及方法，因此數值模擬是工程師除了實驗分析以外所必須借助的有效工具。

在各種數值分析方法中，有限元素法最為一般設計工程師使用，其基本概念是將一個複雜的實際物理問題經由簡化後成為一個數學問題，由計算分析後加以解答。如同將一連續體分成有限個元素，各元素特性利用數學模式加以描述，並藉由節點（node）相連而成。原模型之物理特性即可由各元素所組成的數學模式加以假設來表示，再利用此數學模式求取模型之各處的位移、應力及應變等。

雖然最初有限元素法只用於分析結構行為，但因其理論具有一般性，所以廣泛應用於許多邊界問題上，像是（1）平衡或穩態（steady state）（2）特徵值（eigen value）（3）傳遞與暫態（propagation and transient）等問題，而各種物理領域都能在高效率的有限元素程式中得到令分析者滿意的近似解。自有限元素法理論成熟後，有限元素分析軟體已被廣泛應用於土木工

程、結構力學、機械設計、航太工業、熱傳分析、流體力學、破壞力學以及核子工程等方面的研究，不論在模型靜態或動態分析上，都大幅提高了求解的精確度與效率。靜態分析主要目的為求取材料應力和應變；動態分析之目的則為求得模型之自然頻率及其動態放大效應，以預測模型受動態負荷作用下對其強度的影響，本文則是探究土壤中受建物阻隔的波傳衰減分析。

3-1 動態有限元素理論

本研究分析振波動態傳遞行為，模擬計算方式可簡化為圖3.1中的物體，在固定的直角座標系統中，由 B_0 變形至 b ，其動力方程式（momentum equation）可如下表示：

$$\sigma_{ij} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (3-1)$$

滿足牽引力邊界條件（traction boundary condition）

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t) \quad (3-2)$$

在邊界 ∂b_1 ，其位移邊界條件為

$$x_i(X_\alpha, t) = D_i(t) \quad (3-3)$$

在邊界 ∂b_2 ，沿著內部邊界 ∂b_3 的接觸不連續，當位置座標 $x_i^+ = x_i^-$ 時，

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j = 0 \quad (3-4)$$

式中，

σ_{ij} ：Cauchy應力（ $i=1,2,3$ ； $j=1,2,3$ ）

ρ : 密度

f_i : 單位體積的徹體力 ($i=1,2,3$)

\ddot{x}_i : 加速度

t_i : 曳引力

n_j : 垂直於邊界元素 ∂b 之單位向量

平衡方程式可表示如下：

$$\int_v (\rho x_i - \sigma_{ij,j} - \rho f_i) \delta x_i dv + \int_{\partial b_1} (\sigma_{ij} n_j - t_i) \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds = 0 \quad (3-5)$$

式中，

δx_i : 虛位移

若在靜態的狀況下，考慮沿著內容有不連續情形發生，則應用 divergence

theorem :

$$\int_v (\sigma_{ij} \delta x_i)_j dv = \int_{\partial b_1} \sigma_{ij} n_j \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds \quad (3-6)$$

式中，

$$(\sigma_{ij} \delta x_i)_j - \sigma_{ij,j} \delta x_i = \sigma_{ij} \delta x_{i,j} \quad (3-7)$$

將 (3-5) 式展開，把 (3-6) 及 (3-7) 代入 (3-5) 式，可得

$$\delta \pi = \int_v \rho x_i \delta x_i dv + \int_v \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_v \rho f_i \delta x_i dv = 0 \quad (3-8)$$

上式為虛功原理的一個表示式。

考慮一個含有 n 個元素的網格物體，使其在參考座標中隨時間移動，則每一

節點的位置可由下式表示：

$$x_i(X_\alpha, t) = x_i(X_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^l \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (3-9)$$

式中，

X_α ：位移前的座標值 ($\alpha=1,2,3$)

ψ_j ：參考座標 (ξ, η, ζ) 的形狀函數

l ：節點數

x_i^j ：第 j 個節點在 i 方向的座標值

將 n 個元素總和

$$\delta\pi = \sum_{m=1}^n \delta\pi_m = 0 \quad (3-10)$$

將 (3-9) 式及 (3-10) 式應用於 (3-8) 式，可寫成

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho x_i \Phi_i^m dv + \int_{v_m} \sigma_{ij}^m \Phi_{i,j}^m dv - \int_{v_m} \rho f_i \Phi_i^m dv - \int_{\partial b_1} t_i \Phi_i^m ds \right\} = 0 \quad (3-11)$$

式中，

$\Phi_i^m = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_l)_i^m$ 為第 m 個元素的形狀矩陣 (shape matrix)

將 (3-11) 式以矩陣形式表示，可得到

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho N^t N adv + \int_{v_m} B^t \sigma dv - \int_{v_m} \rho N^t b dv - \int_{\partial b_1} N^t t ds \right\}^m = 0 \quad (3-12)$$

式中，

v_m ：第 m 個元素的體積

N ：形狀矩陣

σ ：應力向量，其轉置矩陣 σ^t 如下表示

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}) \quad (3-13)$$

B : 應變位移矩陣 (strain-displacement matrix)

a : 節點之加速度向量

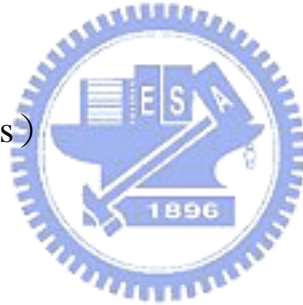
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y1} \\ \vdots \\ a_{yk} \\ a_{zk} \end{bmatrix} = Na \quad (3-14)$$

b : 微體力向量 (body force vector)

$$b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

t : 曳引力 (traction loads)

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3-16)$$



3-2 三維立體元素基本顯示算法

在此介紹本研究三維立體元素的運算相關法則，以元素為一個八節點的六面立體元素為例，其體元素 (solid element) 的解可依就統御方程式求得，每一節點位置依 (3-9) 式可如下表示：

$$x_i(X_\alpha, t) = x_i(X_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (3-17)$$

其中， ξ, η, ζ 為單元的自然座標，如圖3.2所示。

形狀函數的定義如下：

$$\phi_j(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_j)(1 + \eta\eta_j)(1 + \zeta\zeta_j) \quad (3-18)$$

式中， ξ_j, η_j, ζ_j 是第j個節點在i方向的座標值

一個體元素可將上式以矩陣表示，N是3×24形狀矩陣：

$$N(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & 0 & & \phi_8 & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \dots & 0 & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & & 0 & 0 & \phi_8 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

B是6×24的應變位移矩陣：

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3-20)$$


為了要得到對角的質量矩陣（mass matrix），第K的對角項為：

$$m_{kk} = \int_v \rho \phi_k \sum_{i=1}^8 \phi_i dv = \int_v \rho \phi_k^2 dv \quad (3-21)$$

應變位移矩陣中的各項可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (3-22)$$

上式亦可以下列形式表示

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

倒置J矩陣，可得到體元素統御方程式的解

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

3-3 數值模型收斂性之探討

在驗證有限元素模型正確性下，首要工作就是對有限元素模型進行收斂性分析。本文數值模型主要為觀測由振源向建築物之波傳行為，因而將模型X方向尺寸擴大建構至預測範圍，即限定模型X方向從原點算起往右的單元數為四十個單元。

就本軟體來說，一開始只單純改變Y方向單元數。當Y方向的深度為四個單元時，模型相對誤差值僅在1.02% ($\left| \frac{No.4 - No.3}{No.3} \right| \times 100\%$)，可由表3.1、圖3.3得知，因此決定模型之深度為四個單元。接下來固定Y方向單元數為四個單元時，更改X方向左側單元數，觀察加載點位置右側節點的值是否趨於收斂，檢視收斂成果後設定X左側單元數為六個單元。最後固定前述之X和

Y方向的單元數，藉此決定Z方向之對稱單元數。表3.2、圖3.4中顯示，當Z方向對稱單元數為四個單元時，相對誤差值即降至1.15%，但由於在模型分析中尚需考慮建築物面積尺寸，所以最後訂定Z方向往前、往後各六個單元之距離。在檢測完X、Y和Z方向模型立體空間後，模型收斂性均符合相對誤差於5%內之限制，因此在執行數值分析時較具可靠性。

綜合上述模型大小收斂性分析結果，即以原點為基準，X方向往右四十個單元、往左六個單元；Y方向往下四個單元；而Z方向則是往前、往後對稱各六個單元，又因分析單元數均符合相對誤差值，所以數值模擬模型就針對此建構幾何尺寸執行。

3-4 數值模擬基本架構

本文的數值分析處理作業流程涵蓋了三個主要項目：前處理設定、求解過程及後處理階段，至於詳細的細部處理順序可由圖 3.5 表示。

3-4-1 模型尺寸

首先進入軟體介面選用顯性求解法（explicit method），接著於建模分析中採用三維結構實體單元，考慮到建物尺寸和測量點位的關係，所以逐一建構每邊長各為6公尺的立方體塊稱為一單元。在數值模擬中，當模型距離過長，求解時間將相對提高許多，且佔記憶體空間，因此經由不斷測試，模型尺寸訂定在X方向是從-36m到240m；Y方向深度為0m到-24m；至於Z方向則是-36m到42m，也就是說X、Y和Z方向總長各為276m、24m和78m。

另外在建物設置方面，將建築物於模型中設定不同樓層數與開挖深度，空間平面位置分別座落在 X 方向 18~36m、48~66m、78~96m 上，18m×18m 的正方形建物。

3-4-2 定義材料性質、阻尼控制

本文假設土壤和結構物皆使用等向線彈性材料。土壤的質量密度 ρ 為 193.68 (N/m^3)、楊氏係數 E 為 51568462.08 (N/m^2)、蒲松比 ν 為 0.4792；因為模擬結構物十分困難，所以在結構物方面是把整個建物重量模擬成建築物開挖基礎的質量，並依不同建築物樓層數給定不同密度。四層樓、八層樓和十二層樓的建築物，質量密度 ρ 各分別為 47088 (N/m^3)、94176 (N/m^3) 和 141264 (N/m^3)。另外，在楊氏係數和蒲松比方面，於此假設建築物各樓層的值均相同，即楊氏係數 E 為 2.5×10^{11} (N/m^2)、蒲松比 ν 為 0.2。

阻尼一般分成兩種：(1) 幾何阻尼 (2) 材料阻尼，本文在阻尼方面是採用雷利阻尼 (Rayleigh damping)，它是假設阻尼模式皆相同。(3-25) 式為運動方程式：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3-25)$$

阻尼矩陣 $[C]$ 是由質量矩陣與勁度矩陣線性疊加組合而成，關係式如下：

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3-26)$$

其中，

$[C]$ ：雷利阻尼

$\alpha[M]$ ：質量加權阻尼

$\beta[K]$ ：剛度加權阻尼

本研究使用剛度加權阻尼 $\beta=0$ ，質量加權阻尼 $\alpha=0.05$ ，頻率 $\omega=2.7778$ ，

因此可將 (3-26) 式寫成以下型式：

$$[C] = \alpha[M] \quad (3-27)$$

$$\alpha = 2\omega_i\zeta_i \quad (3-28)$$

式中，

ω_i ：第 i 個模態之自然頻率

ζ_i ：第 i 個模態之阻尼比

經由計算可得阻尼比 $\zeta = 8.9999 \times 10^{-3}$ ，其中阻尼比 ζ 會隨著頻率而改變。



3-4-3 網格分割

網格建立的優劣，深深影響著模擬的計算結果和精確度，也可能影響著數值分析的收斂行為，因此在網格設計劃分上須作通盤考量。理論上網格分得越細所得到的值就越趨正確，但相對的，於數值模擬計算時間上就自然地增加，所以在不影響合理結果考量下，必須考慮其精確性及計算效率，以建立最佳的網格。

論文採用自由網格法的方式去建構有限元素模型，藉著劃分網格來控制網格大小，且建物所在的位置不予以網格。另外，指定立方體塊每邊長度6公尺需切割成2個元素來達到元素切割大小的控制。接著選定網格劃分

的對象為體積，以自由分割的方式來劃分網格類型而單元格的形狀則皆為三角形。

3-4-4 施加邊界條件

模擬土壤動力學時，由於土壤被視為半無限空間的彈性體，其探討主題又是波傳衰減之影響，因此為了避免邊界處波的反射，須對有限域表面施加無反射邊界條件來模擬半無限空間，藉此求得更完整之波傳衰減，才不會因邊界反射影響其傳遞行為。

無反射邊界是透過邊界表面上的節點組來施加。它只適用在固體元素模型之半無限域問題。Lysmer、Kuhlemeyer (1969) 首先提出無反射邊界的概念，接著 Cohen、Jennings (1983) 作更進一步研究，以下之應力適用於邊界部分：

$$\sigma_{normal} = -\rho c_d V_{normal} \quad (3-29)$$

$$\sigma_{shear} = -\rho c_s V_{tan}$$

其中，

σ_{normal} ：垂直應力

σ_{shear} ：剪應力

ρ ：材料密度

c_d ：膨脹波速

c_s ：剪力波速

V_{normal} : 垂直運動速度

V_{tan} : 正切運動速度

3-4-5 施加荷重

因動態模擬分析裡，荷重是隨時間作變化。所以在軟體分析中對結構物進行加載，需遵循幾點：

1. 將模型受載的部分定義成組件。
2. 定義衝擊荷重的時間歷程曲線。
3. 施加荷重到模型特定受載的部分上。

根據前面步驟，首先定義Y方向為0公尺，而X和Z方向的區域介定在0到6公尺之間，把此區塊視作一組件。接著輸入數組參數，數組參數是將時間間隔及其對應的荷重值集合在一起，通常可分成兩部分：一部分是時間間隔，另一部分是與時間間隔對應的荷重值。把分析模型模擬成一個半Sin的波形，頻率 ω 為 2.7778π ，週期 T_p 設為0.36秒（時間間距 $\Delta t=0.01$ 秒），最大振幅值設為0.001公尺，如圖3.6。最後針對模型進行加載作業，於軟體介面中，荷重類型選定以Y方向的位移作施加方式，並且把原先已設定完成的組件，及橫座標和縱座標的數組參數值匯入，然後使用暫態分析完成加載動作。

3-4-6 求解基本參數控制

求解前需設置計算時間控制參數，其中包含設定軟體計算終止時間秒數及時間步長的控制。在軟體程序中，如果計算的時間步長太小，反而會增加CPU運算時間，因此可用質量縮放來控制最小時間步長，進而縮短CPU計算時間。如圖3.7所示，顯式時間積分的最小時間步長由最小元素長度 L_{\min} 和波速 c 所決定，其關係式如下：

$$\Delta t_{\min} = \frac{L_{\min}}{c} = \frac{L_{\min}}{\sqrt{E/((1-\nu^2)\rho)}} \quad (3-30)$$

式中，

L_{\min} ：最小元素長度，在圖 3.7 為 L_2

ν ：蒲松比

ρ ：質量密度

E ：楊氏係數



本文軟體計算的終止時間為 25 秒，主要因素除了設定時間過長分析需更加耗時並佔記憶體空間，且求得之結果均為振波衰減終止後的行為；但是當終止時間過短則會導致波形尚未達到收斂，因此經由不斷測試過後，訂定此軟體的分析終止時間。

於輸出圖形方面，從開始分析至終止時間共 25 秒，採用計算筆數為軟體上限值之 1000 筆，其主因是當筆數過少會造成波形曲線較不圓滑，如呈現鋸齒狀的型式，然而本文欲觀察真實波傳衰減情形，因此選用上限筆數來繪製更加完整的波形。

第四章 數值分析與結果

本研究中主要探討振動問題，最終目的就是要透過對問題的研析了解後，由數值軟體分析之成果，思考如何有效降低振動量的解決方案；減少振波衰減的方法中，一種是透過參數分析對整個機制進行了解，找出對整個模型架構影響最大的因子，並尋求最佳化的參數值，以使得振動問題能簡化模擬，研究中將其應用於分析不同振波位置之特性，以觀察其對振動量值的影響程度；其次，則是將改善的構想加入原系統中，以改變整體振動傳遞機制，觀察振波衰減行為，並驗證其可行性。

上一章節中對數值模擬架構的建立作一基本介紹，在本章第一小節部分，將承續著對數值模擬之初步結果，作有效的比對，以驗證此分析方法之正確性與準確性；接著採取不同參數分析方式，亦即改變如建物樓層數、建物地下開挖深度、建物位置等不同的設定值，以便探討各項參數對振波衰減的影響程度；除此之外，同時針對兩種不同測線的影響進行探討。

4-1 驗證數值模型精確度

針對數值模擬之分析，有其必要確認模型的精確度。本論文主要是依據 Liou[5]之解析解來進行比對驗證。Liou[5]為在半無限空間以一個圓形無質量剛性板材施加單位力量之簡諧振動，如圖 4.1。假設土壤為線彈性材料，

阻尼比是 0.05，其中土壤的質量密度 ρ 、剪力模數 G 經無因次化為 1、蒲松比 ν 為 0.33。經由前面三個材料參數，可透過下列公式計算出波速 C_s 的值：

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4-1)$$

式中，

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

ρ ：質量密度

E ：楊氏係數

ν ：蒲松比

G ：剪力模數

C_s ：剪力波速



文獻資料中橫軸代表無因次化後的距離，如果要計算測點的位置，可使用以下公式：

$$R = \frac{\omega r}{2\pi C_s} \quad (4-2)$$

其中，

R ：無因次化後的距離

ω ：頻率

r ：振動源到測點間之距離

C_s ：剪力波速

至於文獻資料中縱軸的表示法是：

$$u = \frac{\bar{F}}{\bar{I}} \quad (4-3)$$

式中，

$$\bar{F} = \frac{F}{Ga\lambda}$$

$$\bar{I} = \frac{I}{Ga}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\omega C_s}{2\pi}$$

其中，

u ：無因次化後的位移

\bar{F} ：無因次化後的力

\bar{I} ：無因次化後的阻抗

I ：動力中的彈性係數

G ：剪力模數

a ：作用力面積之半徑

F ：作用力



如圖4.2所示，橫座標為無因次化距離 ($\frac{\omega r}{2\pi C_s}$)，縱座標則顯示Y方向的無因次化位移 ($\frac{\bar{F}}{\bar{I}}$)。從數值結果可知，振動不單只是振源隨距離變化作衰減，還需歸咎於雷利表面波之現象。單位都已經過無因次化的處理，本研究主要比對之數值見表4.1。

在製作比對模型時，首先把模型模擬成一半無限空間的長方體，假設

條件設置相同，即土壤屬於線彈性材料，阻尼比是0.05。參照美國UBC97規範， $C_s < 180$ (m/sec) 是軟弱土層； $C_s > 360$ (m/sec) 則為堅硬土層，所以本文使用普通土層，假定土壤的波速 C_s 之值是300 (m/sec)，模型尺寸以長、寬、高各6公尺立方塊體為一單元，並控制網格每邊長切割成兩等分進行網格化。邊界設定方面施以粘滯性無反射邊界條件，於Y方向上施加一均佈半個Sin的衝擊載重位移在組件上。週期設為1秒，最大振幅值則為0.001公尺。待軟體求解完成後方可和文獻資料進行核對，如圖4.3。

4-2 模擬問題描述

本研究主要探討為振波受建築物阻隔後的衰減分析，數值模擬問題描述可參考圖4.4，模型尺寸X方向為276m、Y方向為24m和Z方向為78m，於原點表面上6m×6m之方形面積（X=0~6m、Y=0m、Z=0~6m）施加一半個Sin的均佈衝擊力，建築物在不同案例中分別設置於與振源相距18m、48m、78m處，分析成果以建物位置1、位置2、位置3稱之，建築物基地面積大小為18m×18m；另外將振源在Z方向偏移18m（圖4.5）距離振源不同位置的影響。針對建物高度的變數採用四層樓、八層樓、十二層樓，而於建築物下方尚有變更土層中開挖深度，可分成無地下室基礎開挖（開挖深度3m）、地下室一層（開挖深度6m）、地下室兩層（開挖深度9m），同時分析開挖深度對波傳之影響研究。

模型架構中分析測點主要分別在兩條線上，一為在座標Z為0之軸線從

12m~216m的測線上，在此定義為A測線；其次為A測線Z方向偏移18m，X方向從12m~216m的測線稱作B測線。在模型中每6m為一測點，遇到建築物時，無網格無測點分析資料。

在驗證此數值模型準確性後，模型尺寸即不再變更，而研究中探討的變數共可分成下列幾大項：

1. 振源作用在A測線上對兩條測線之影響

當振源作用在A測線上，在此主要分析A測線與B測線受振源的影響，並觀察在測線上波傳變化行為。

2. 振源位置不同之影響

觀察振動源設置於A測線與B測線前方位置；改變振動源設置位置研究其對兩條測線的影響。



3. 建築物不同樓層數的影響

振波雖然主要於土層中傳遞，但在此則是假設振源在A測線上，觀察建築物不同樓層高度對A測線與B測線衰減的影響。

4. 建築物開挖深度對振波之影響

波傳主要在土層半無限空間狀態下傳遞，因此考慮變更建物不同開挖深度，研究振源在A測線上，建築物不同開挖深度對A測線與B測線之分析，反之考慮振源在B測線上，建築物開挖深度對A測線與B測線之振波阻隔關係。

5. 振源與建築物不同距離之影響

物理行為中波傳會因距離之增加而衰減，在此處模型欲設置不同位置之建築物，觀察對於振波先後遇到建物其衰減行為。

依照前述所說明的分析架構，首先對於分析後成果圖表示方法加以說明，研究中主要分析為波傳衰減探討，當建築物作為阻隔時，可由圖4.6顯示出振波於不同測點（五個測點）Y方向衰減行為，其中第一個測點位於振源與建築物之間，波形衰減現象有微小轉折之情形，研判是因測點在房屋前受到干擾而形成，至於其它測點位置則在建物後方，所以波形衰減現象無受建物之干擾。此外數值分析結果可依照選取不同之觀測點，呈現該測點之三度空間位移（X、Y、Z方向），如圖4.7～圖4.9所示。

數值分析成果之展示，因模擬設定振動源為一衝擊載重，探討則多以較具代表性之Y方向振動位移說明，在測點觀察其受衝擊力之影響會發現，於振波抵達前測點沒有任何反應，於振波抵達後產生一較大振幅之振盪，隨後隨時間之歷時振幅逐漸變小而至於消失，在應用上以最大振幅較具意義，因此以後均以第一最大位移表示，本文雖採用無反射邊界，但仍然無法完全消除因邊界設置而產生之反射波（圖4.10），因此只採用到無反射現象之216m處測點，橫座標代表的是距離（m）；縱座標則代表測點位移和振源位移的比例 $\frac{u}{u_0}$ （%），其中 u 為測點位移， u_0 為振源位移。

4-3 振源作用在A測線對兩條測線之影響

在此先觀測A測線與B測線在振源於A測線上之衰減行為。數值分析模型如圖4.11所示，在位置1處有一阻擋振波之建築物，其假設條件為四層樓高建築物，無開挖地下室，觀測點位於A測線，以及B測線上。

由圖4.12之分析成果可明顯看出，在A測線方向之測點上，第一個測點為分析中實際距振源距離12m處，位於振源與建築物之間，在A測線上因有建築物阻隔部份振波由建築物反射回來，其反應明顯偏高，其位移振幅為振源之53.14%，建築物後方測點之振波受建築物阻隔明顯變小很多，在建物後方測點則只剩下11.43%，由於反應已小，衰減速度較B測線小很多。在B測線上由於不受建築物阻隔之影響除了在建築物附近有較大的反應外，其餘測點所受的影響並不大，所有測點均較A測線來得大。

4-4 振源位置不同之影響

分析中觀察因上述測點的不同位置，而於A測線與B測線方向之振波衰減有所不同。在此節則改變振動源設置時其位置之不同加以分析呈現，模型如圖4.13，模型中將半個Sin週期的振波分別設置在A測線與B測線前方，建築物依舊擺放於位置1，設置四層樓高建築物 $\rho=47088$ (N/m³)，無開挖地下室，剪力波速為300 (m/s) 等相同參數假設條件下，僅改變振動源之位置，觀測點則是位於振源右側A測線與B測線方向上。

當振源位於A、B測線前，觀測距離為12m處的A測線其位移振幅分別是振源之53.14%與43.72%，為了觀看不同振源的微小變化，故此測點並無標

示於圖4.14中。模擬分析成果主要是觀察振波遭遇建物阻擋後之測點（圖4.14），即模型中距振源距離為42~216m處的測點，由結果可知波傳衰減因振動源設置位置的不同，導致振波在A測線上衰減行為有微小的變化，圖中振源於A測線前經由建築物阻隔於距離42m處位移振幅則為振源之11.43%，受到振源變換位置之關係可看出，振源於B測線前經由建物阻隔後相對振源於A測線前經由建物阻隔後其測點會因微小的距離變化，使位移振幅有稍微減少的趨勢。

另外將測點設置於B測線上作比較，可由圖4.15中得知，因觀測點設在B測線上無受到建物阻隔，波傳呈現穩定衰減行為；但是當振源施加於A測線前方時，同樣觀察B測線上測點，振波衰減會因為受到建築物影響，導致測點初始位移振幅為振源之44.62%，跟振源設至於B測線前無阻隔影響的60.04%相互比較下，振源設於A測線前會有明顯的衰減現象。

4-5 建築物不同樓層數下振波衰減之分析

分析完振源作用在A測線前對於A、B測線之影響和改變振動源位置後，其次則對於建築物本身架構作另外的探討。研究中改為分析建築物不同樓層高度，並將其分成四層樓、八層樓和十二層樓，變更參數見表4.2，模型如圖4.16。數值分析模型於此並非建立各種建物不同高度之元素體，而是把整個建物重量模擬成建築物開挖基礎的質量，把建築物視作剛性體， ρ 分別為47088、94176、141264（N/m³）。

由圖4.17可知，當改變建築物樓層高度而建物開挖深度不變時，波傳衰減會因建築物高度變化而有細微影響，在受到建築物阻隔後（距振源距離42~216m處的測點）振波衰減從位移振幅為振源之11.43%依照距離的增加持續衰減至1.23%，衰減有其一定的規則分佈。圖4.18中，於B測線上因受到鄰近建築物阻隔影響，其位移振幅（距振源距離18~36m處的測點）分別為振源之42.39%、39.03%、37.69%和36.69%。另外在距振源距離42m處的測點，位移振幅為振源之35.08%，接著依照距離增加到距振源距離216m處的測點其位移振幅衰減至3.81%，衰減有規則分佈。由此可知波傳行為主要在土層中傳遞，對於建築物樓層高度的不同狀況因素下，波傳衰減因距離有所變化，對於不同樓層高度則衰減僅微小改變。



4-6 建築物開挖深度對振波之影響行為

由上節中結果顯示可知建物樓層高度對於波傳衰減行為影響並非關鍵處，在此則針對建築物開挖深度之多寡，進而分析探討由開挖因素導致波傳受阻隔的衰減變化行為。圖4.19表示振源於A測線前建築物開挖範圍與深度之模型分佈狀況，圖4.22則是振源於B測線前之模型分佈，在數值分析過程中，首先分別假設建築物開挖時無地下室（僅基礎開挖3m）、地下室一層（開挖深度6m）、地下室兩層（開挖深度9m）作為主要變數依據，並將振源設置在A測線與B測線前，分析不同開挖深度對A測線及B測線的影響，觀察經由建築物阻隔後因開挖深度不同時之波傳衰減情況。

當振源於A測線前，建物開挖深度不同對A測線之分析結果如圖4.20所示，圖中可看出不同開挖深度（深度分別表示為3m、6m和9m）之波傳衰減行為。衰減會因受挖面積不同，導致開挖3m時經由建築物位置一阻隔後在距振源距離42m處的測點迅速衰減至11.43%，而距振源距離216m處的測點其位移振幅已降為振源之1.23%；另外於開挖6m時經由建築物位置一阻隔後在距振源距離42m處的測點迅速降為7.62%，而距振源距離216m處的測點其位移振幅則為振源之0.82%；當開挖深度到達9m時經由建築物位置一阻隔後在距振源距離42m處的測點衰減行為急速降至5.91%，在距振源距離216m處的測點其位移振幅僅為振源之0.61%。由此可知，應力波傳遞時因主要傳遞土層受建築物阻隔因素影響，導致間接影響波傳衰減之行為。

圖 4.21 為振源於 A 測線前，建物開挖深度不同對 B 測線之分析，當無地下室時，在距離 12m 處的測點其位移振幅為振源之 44.62%，受到鄰近建物位置一阻隔的影響在距離 42m 處的測點為 35.08%，而距離 216m 處的測點位移振幅則降為振源之 3.81%；當開挖地下一層時，在距離 12m 處的測點位移振幅為振源之 29.75%，受到鄰近建物位置一阻隔的影響在距離 42m 處的測點衰減為 23.38%，於距離 216m 處的測點其位移振幅衰減為振源之 2.54%；當開挖地下二層時，在距離 12m 處的測點位移振幅為振源之 22.87%，受到鄰近建物位置一阻隔的影響在距離 42m 處的測點衰減行為降至 17.65%，於距離 216m 處的測點其位移振幅僅為振源之 1.89%。

另外更探討振源於 B 測線前，建物不同開挖深度對 A 測線之分析，成果如圖 4.23，開挖深度在 3、6、9m 時距離 42m 處的測點位移振幅分別為振源的 10.86%、7.24%與 5.58%，隨後依距離增加至 216m，其測點位移振幅分別為 0.87%、0.58%與 0.43%；而振源於 B 測線前，建物開挖深度不同對 B 測線之分析可見圖 4.24，位移振幅在距振源 12m 處分別為振源的 60.04%、40.03%和 30.73%，受到鄰近建物影響位移振幅在距振源距離 42m 處分別為振源之 41.03%、27.35%及 20.41%，當距振源距離增加至 216m 時，測點的位移振幅分別為 2.86%、1.91%與 1.42%。在此不僅是受到開挖深度影響，同時建物也對 B 測線有些微阻擾。

4-7 振源與建築物不同距離之影響

由前述分析結果可知，建築物對於波傳有相對之影響關係，最後將建物設置在不同位置，觀測波傳行為是否有其變化。在此分析振源於 A 測線前，建物位置不同之模型如圖 4.25 所示，統一為四層樓建築物、無地下室的假設條件下，觀察數值分析後 A 測線方向之測點，因改變建物與振源距離情形中，振波衰減有何變化行為。

分析成果如圖 4.26 展示，在建築物位置分別為位置 1、位置 2 與位置 3 時，測點分析呈現可依序由菱形、方形及三角形之不同測點表示如圖中。第一個觀測點為分析中實際位置距離振源 12m 處，最後一個觀測點則為距離振源 216m，由圖 4.26 之分析結果可明顯看出，在波傳行為經過建築物阻隔後，

當建築物在位置1時，位移振幅可由在距振源距離12m處的53.14%降至距振源距離42m處的11.43%，接著隨距離衰減至最後一個測點位移振幅為振源之1.23%；而建築物於位置2時，在距振源12m到42m處振波位移振幅經由距離之關係由51.64%衰減至33.21%，而後受到建物阻隔影響位移振幅再由33.21%降至72m處的2.96%；另外探討建築物於位置3中，在距振源12m處測點的位移振幅由51.68%降至72m處的23.28%，在此為距離因素導致之影響，而後遭遇到遠處建物阻隔，使先前的位移振幅從23.28%迅速降至102m處的1.28%，最後在距離216m處的測點位移振幅為振源之0.28%。

數值分析成果依照圖 4.26 呈現，能看出前半部因為原先距離對振波衰減的關係曲線，其次若加上建築物對於波傳的影響，在相互比較之下受建物阻隔時波傳衰減則明顯降低許多。

本研究中所探討的各項變數，包含了觀測同一振源對兩測線之影響、改變振動源設置位置探討 A 測線與 B 測線的互制關係、變更建築物不同樓層高度下振波衰減之分析、建物不同開挖深度對振波位在 A 測線與 B 測線前方之影響行為、振源與建物位置不同之影響等，比對分析中尚有各種不同之交叉分析結果，在本章節中分析成果顯示僅選擇重要因數探討。

第五章 結論與建議

本研究利用有限元素法為數值模擬分析工具，在簡化模擬土層中振動源因受建築物阻隔導致其波傳衰減行為，因此各別建立數種不同的數值模型，藉由變數影響模擬分析振波於土壤介質與建物阻隔之間的傳遞互制行為，對於本研究分析所得成果由下列之結論與建議簡單加以說明。

5.1 結論

1. 探討振源作用在 A 測線對兩條測線之影響案例中，波傳遇到建築物有明顯的衰減效果，而在建物前方的測點則稍受建物影響。
2. 對於改變振動源位置，觀測 A 測線及 B 測線波傳衰減時，可顯示當測點距離振動源位置較遠，波傳衰減會相對明顯。
3. 當改變建築物不同樓層高度條件分析案例，主要控制變數依然在土壤對於振波衰減影響較大，而研究中數值模擬結果，其波傳衰減僅有細微之影響。
4. 分析建物不同開挖深度對不同振源與兩條測線之影響行為時，相較於樓層高度則有明顯的變化，位移振幅也因開挖深度較深波傳衰減相對降低。
5. 振源位置不變更時，不同建築物位置對波傳衰減則有顯著的影響關係，

分析成果中顯示，當波傳行為遇到建築物產生之衰減量，遠比振波隨距離衰減來得大。

5.2 建議

1. 有鑑於數值軟體分析之探討，輸入參數值視為重要之依據。經由結論得知，當變更建物樓層數時影響甚微，因此在後續模型分析中參數之探討可考慮變更楊氏係數E值。
2. 本研究施加的衝擊載重均採用固定週期，往後研究可替換不同週期之值，進而觀測振波傳遞行為。



參考文獻

1. Aboudi, J., "Elastic Waves in Half-Space with Thin Barrier," *Proc. ASCE, J. Engrg. Mechs. Div.*, Vol. 99, EM1, pp. 69-83 (1973).
2. Bornitz, G., *Über die Ausbreitung der von Groszkolben-maschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe*, J. Springer, Berlin (1931).
3. Edwards, A. T. and Northwood, T.D., "Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures," *The Engineer*, Vol. 210 (1960).
4. Ewing, W. M. and Jardetzky, W.S., *Elastic Waves in Layered Media*, McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 380 (1957).
5. Liou, G. S., "Vibrations Induced by Harmonic Loadings Applied at Circular Rigid Plate on Half-space Medium," *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION* (2008).
6. Gutowski, T. G. and Dym, C.L., "Propagation of Ground Vibration: A Review," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 49, No. 2, pp. 179-193 (1976).
7. Haupt, W. A., "Surface Waves in Nonhomogeneous Half-Space," *Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics*, Prange, B., Eds., Rotterdam: Balkema, pp. 335-367 (1977).
8. Kattis, S. E., Polyzos, D., and Beskos, D. E., "Modelling of Pile Wave Barriers by Effective Trenches and Their Screening Effectiveness," *Soil Dyn. and Earthqu. Eng.*, Vol. 18, pp. 1-10 (1999).
9. Kim, D. S., and Lee, J.S., "Propagation and Attenuation Characteristics of Various Ground Vibrations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 115-126 (2000).
10. Klein, R., Antes, H., and Le Houedec, D., "Efficient 3D Modelling of Vibration Isolation by Open Trenches," *Comput. Struct.*, Vol. 64, pp. 809-817 (1997).
11. Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J. (1996).
12. May, T.W., and Bolt, B.A., "The Effectiveness of Trenches in Reducing Seismic Motion," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 195-210 (1982).
13. Richard, F. E., Jr., Hall, J.R., Jr., and Woods, R.D., "Vibration of Soils and Foundations,"

Prentice-Hall, New Jersey (1970)

14. Saeed Moaveni, "Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS," Publishing House of Electronics Industry (2005)
15. Theissen, J. R. and Wood, W.C., "Vibration in Structures Adjacent to Pile Driving," *Dames and Moore Engineering Bulletin*, Vol. 60 (1982).
16. Wiss, J. F., "Damage Effects of Pile-Driving Vibrations," *Highway Research Records*, Vol. 155, pp. 14-20 (1967).
17. Wass, G., "Linear Two-Dimensional Analysis of Soil Dynamics Problem in Semi-Infinite Layered Media," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, California (1972).
18. Wiss, J. F., "Construction Vibrations: State-of-the-Art," *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol. 107, No. GT2, pp. 167-181 (1981).
19. Yang, Y. B., Yau, J. D., and Hsu, L. C., "Vibration of simple beams due to trains moving at high speeds," *Engrg. Struct.*, pp. 936-944 (1997).
20. 李建中，「打樁引致之地表振動」，*土木水利*，第十卷，第四期，第 45-59 頁 (1984)。
21. 王栢村，「振動學」，全華科技圖書股份有限公司，(1996)。
22. 中鼎工程股份有限公司，「南科振動影響評估及對策研擬工作第一階段工作成果報告」，台灣高鐵計畫，台南 (1999)。
23. 倪勝火，莊明仁，鍾啟泰，「台南科學園區背景及相關振源量測與分析」，第 20 屆中日工程技術研討會公共工程組 (10-2)，高速鐵路行車引致軌道振動之問題論文集，第 113-129 頁，台南 (1999)。
24. 黃俊鴻，「打樁震動對鄰近結構物影響之研究」，研究計畫期中報告，委託單位：榮民工程股份有限公司，執行單位：國立中央大學土木工程學系 (2000)。
25. 陳正興，朱惠君，「南科園區地盤振動衰減參數之量測」，南部科學園區振動防治策略研討會論文集，第 151-170 頁，台南 (2000)。

26. 林建儀，「振動衰減模式與振波阻隔效應之實驗研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，台南 (2001)。
27. 曾祥岳，「捷運列車引致振動之衰減模式之分析」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，台南 (2003)。
28. 李輝煌，「ANSYS 工程分析基礎與觀念」，高立圖書有限公司 (2005)。
29. 郭俊良譯，「土壤與基礎振動學」，科技圖書股份有限公司。



表 2.1 幾何阻尼係數[15]

研究人員	土壤種類	幾何阻尼係數 γ (1/ft)
Wiss (1967)	砂土	1.0
	黏土	1.5
Johnson & Duvall (1971)	硬土層或岩層	1.4~1.7
Attewell & Farmer (1973)	各種堅硬土層	1.0
Brenner & Chittikuladilok (1975)	表層砂土	1.5
	軟性黏土上覆砂質填土	0.8~1.0



表 2.2 材料阻尼係數[15]

研究人員	土壤種類	材料阻尼係數 α (1/ft)
Richart (1962)	覆蓋 4~6 吋混凝土版之礫石回 填層	0.006
Barkan (1962)	飽和細砂	0.03
	冰凍飽和細砂	0.018
	夾泥炭土及有機沈泥之飽和砂土	0.012
	地下水位以上之黏土質砂	0.012
	黏土含砂及沈泥	0.03
	黃土	0.03
	含砂及沈泥之飽和黏土	0.012~0.036
Forssblad (1965)	沈泥質礫石砂	0.04
Woods (1967)	沈泥質細砂	0.018
Dalmatov (1968)	砂及沈泥	0.008~0.11
Peng (1972)	軟弱曼谷黏土	0.079~0.134
Clough & Chameau (1980)	灣泥之上的砂填土	0.015~0.06

表 2.3 不同波源之幾何阻尼係數[6]

振源位置	振源形式	波傳形式	幾何阻尼係數 γ (1/ft)
地表面	點振源	實體波	2
		表面波	0.5
	線振源	實體波	1
		表面波	0
地表下	點振源	實體波	1
	線振源	實體波	0.5

表 2.4 南科土層波速與動態彈性模數[25]

深度 D (m)	縱波 速度 Vp (m/sec)	橫波 速度 Vs (m/sec)	動態剪 力模數 Gd (kg/cm ²)	動態楊 氏模數 Ed (kg/cm ²)	動態總 體模數 Kd (kg/cm ²)	動態 蒲松比 Vd	密度 D (g/cm ³)
0~4	400	80	124	367	2934	0.4792	1.9
4~14	1150	250	1338	3947	26527	0.4752	2.1
14~26	1670	261	1458	4338	57757	0.4875	2.1
26~30	1670	296	1876	5566	57200	0.4838	2.1
30~50	1670	318	2165	6413	56815	0.4812	2.1
50~55	1670	428	3921	11488	54473	0.4648	2.1

表 3.1 模型 Y 方向寬度對波傳影響

Y 單元	Y 方向位移 (m)	Y 方向位移 相對誤差 (%)
1	9.06E-04	-
2	8.12E-04	10.38
3	7.86E-04	3.20
4	7.78E-04	1.02
5	7.77E-04	0.13
6	7.77E-04	0

表 3.2 模型 Z 方向寬度對波傳影響

Z 對稱 單元	Y 方向位移 (m)	Y 方向位移 相對誤差 (%)
1	8.96E-04	-
2	8.13E-04	9.26
3	7.85E-04	3.44
4	7.76E-04	1.15
5	7.76E-04	0
6	7.76E-04	0

表 4.1 波傳衰減分析結果[5]

距離	a	b	位移 $u = \sqrt{(a^2 + b^2)}$
0.5	-1.61815E-01	1.35993E-01	2.113722E-01
1	5.20469E-02	-9.14126E-02	1.051910E-01
2	-1.25075E-02	-5.27883E-02	5.424981E-02
3	-1.63110E-02	-2.65186E-02	3.113334E-02
4	-1.93765E-02	-8.27722E-03	2.107038E-02
5	-1.25933E-02	-1.23104E-03	1.265333E-02
6	-8.50598E-03	3.96547E-03	9.384916E-03
7	-3.86975E-03	3.93431E-03	5.518493E-03
8	-1.36752E-03	4.04544E-03	4.270327E-03
9	2.91838E-04	2.48564E-03	2.502714E-03
10	8.88240E-04	1.70862E-03	1.925708E-03
11	1.00529E-03	6.25555E-04	1.184030E-03
12	8.23420E-04	2.23982E-04	8.533396E-04
13	5.52822E-04	-1.85074E-04	5.829790E-04
14	3.08234E-04	-2.13622E-04	3.750234E-04
15	1.15094E-04	-2.68308E-04	2.919517E-04
16	5.22963E-06	-1.69465E-04	1.695457E-04
17	-5.60676E-05	-1.32441E-04	1.438200E-04
18	-6.69975E-05	-4.92743E-05	8.316623E-05
19	-6.28731E-05	-2.50815E-05	6.769127E-05
20	-4.26396E-05	1.27183E-05	4.449596E-05

表 4.2 不同樓層等值質量密度

樓層數	質量密度 ρ (N/m^3)
4	47088
8	94176
12	141264



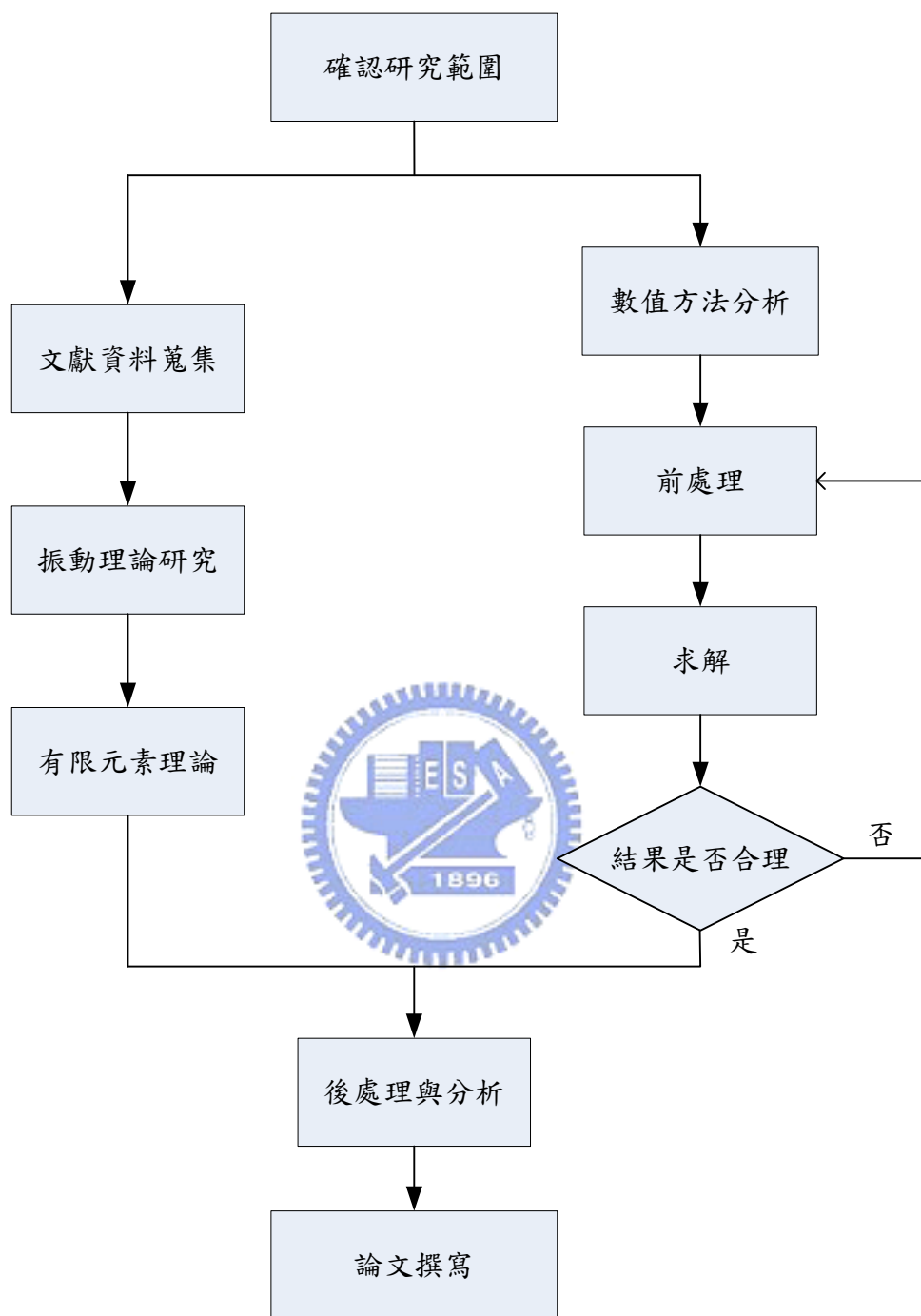


圖 1.1 研究流程圖

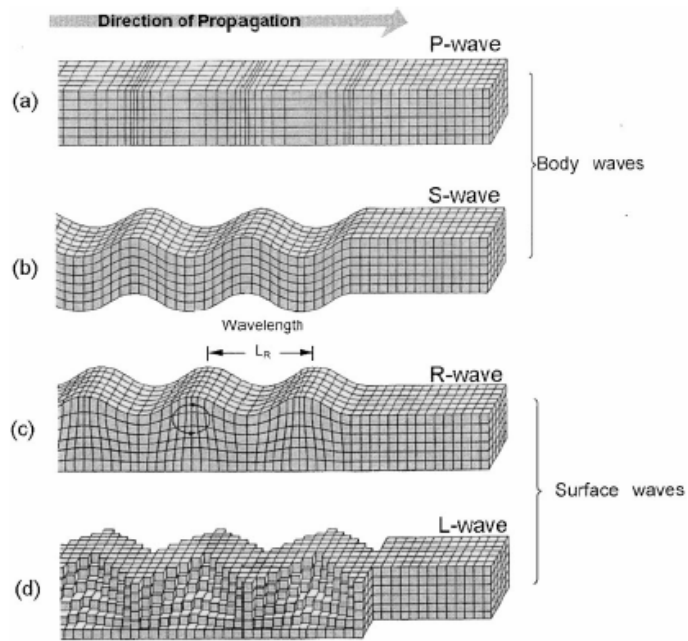


圖 2.1 振波於彈性半無限空間之運動模式(Bolt, 1976)

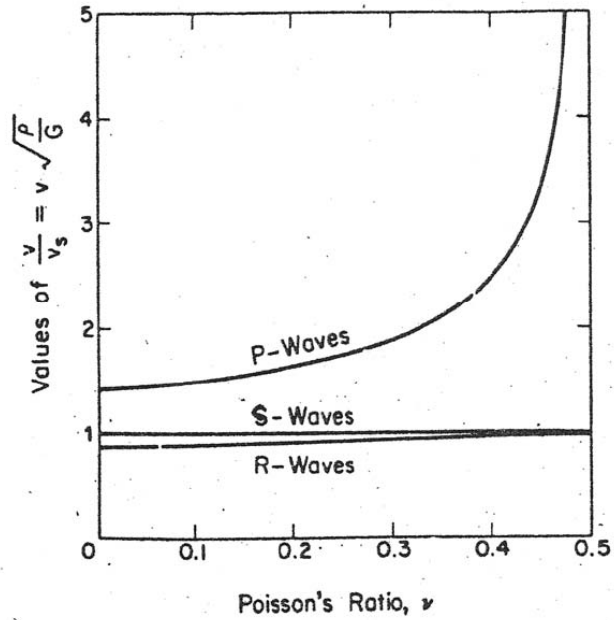


圖 2.2 各種彈性波之傳遞速度比與柏松比之關係[9]

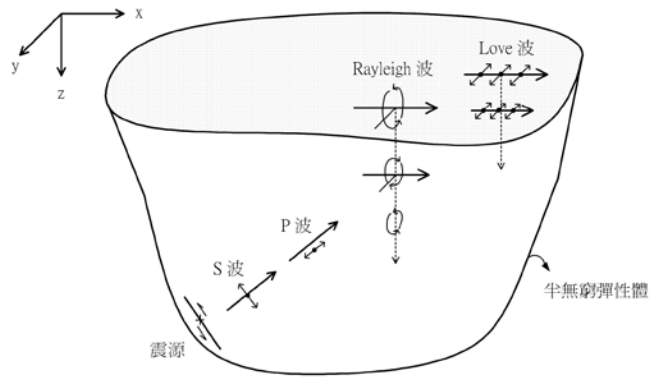


圖 2.3 半無限彈性體波傳形式(莊家瑄，2003)

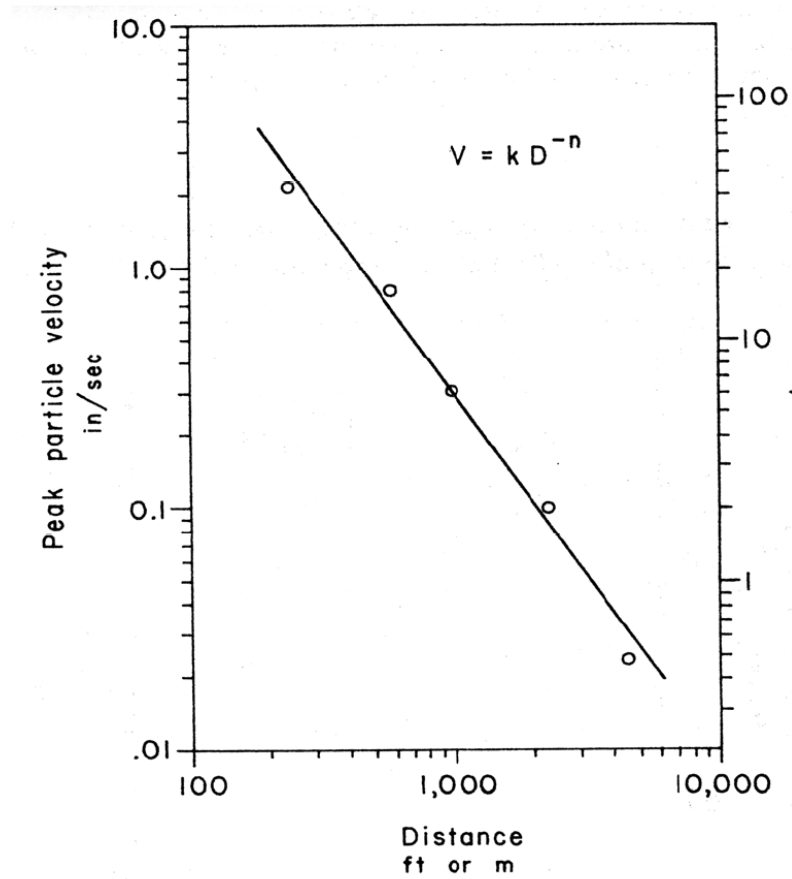
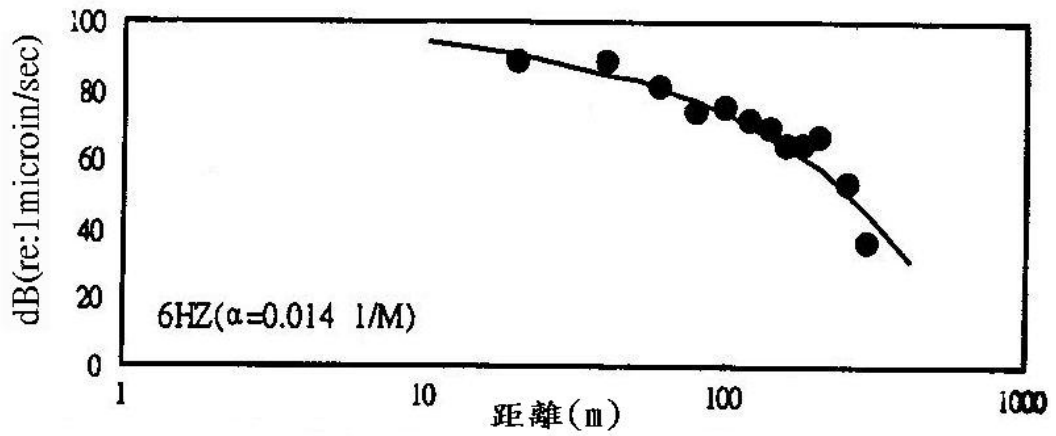
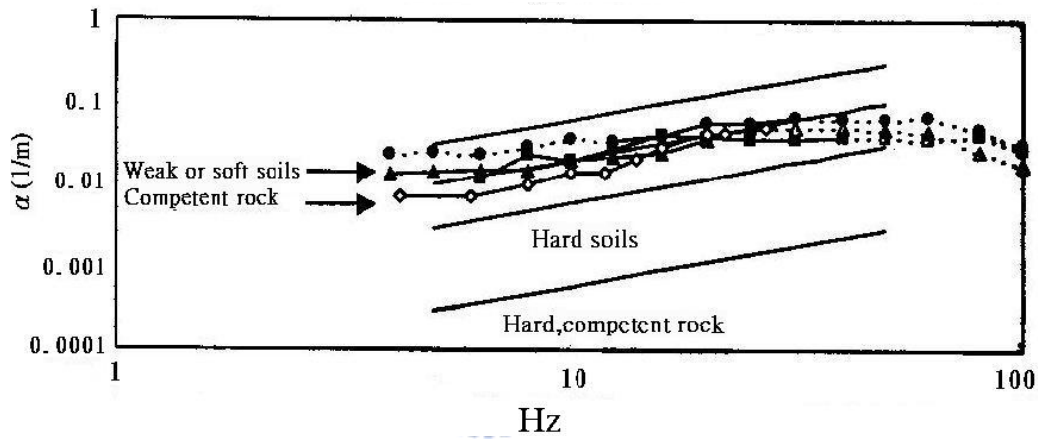


圖 2.4 土粒最大速度與振源距離之關係[18]

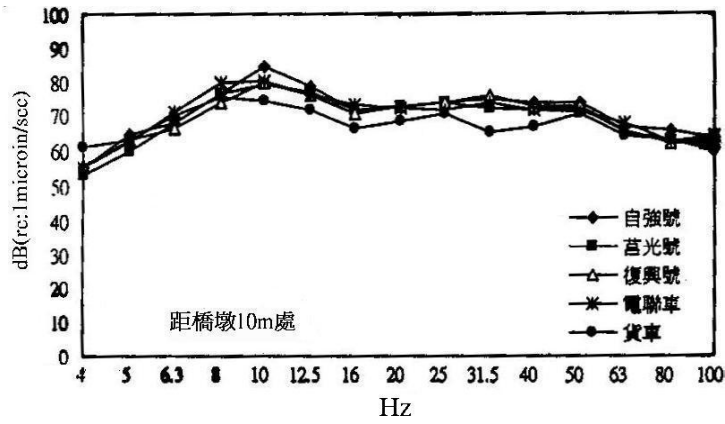


(a) 典型Bornitz 衰減模式迴歸曲線關係圖

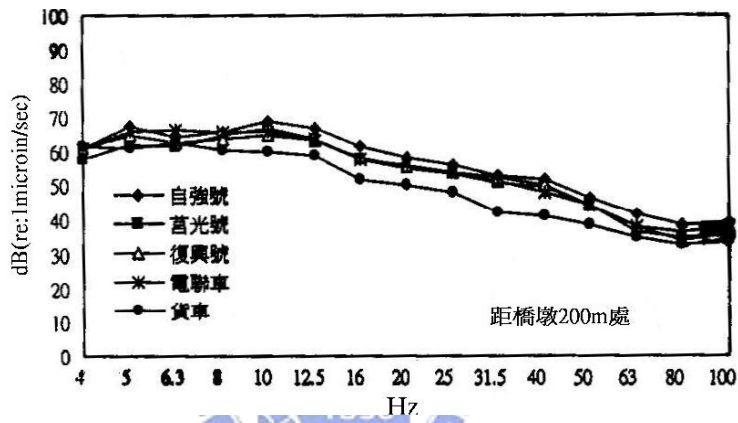


(b) 各頻率之材料阻尼係數 α

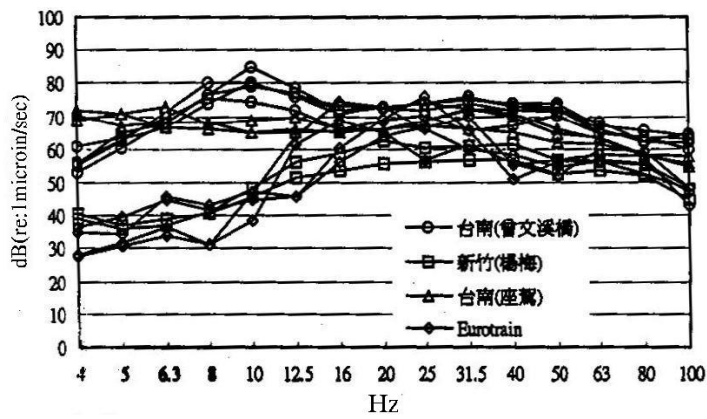
圖 2.5 中鼎公司在南科園區所測得之材料阻尼係數 α 值[22]



(a) 各級列車通過時之振動頻譜圖 (距橋墩10m處)



(b) 各級列車通過時之振動頻譜圖 (距橋墩200m處)



(c) 不同地點列車通過振動頻譜圖之比較

圖 2.6 中鼎公司於曾文溪河床旁量測列車振動之情形[22]

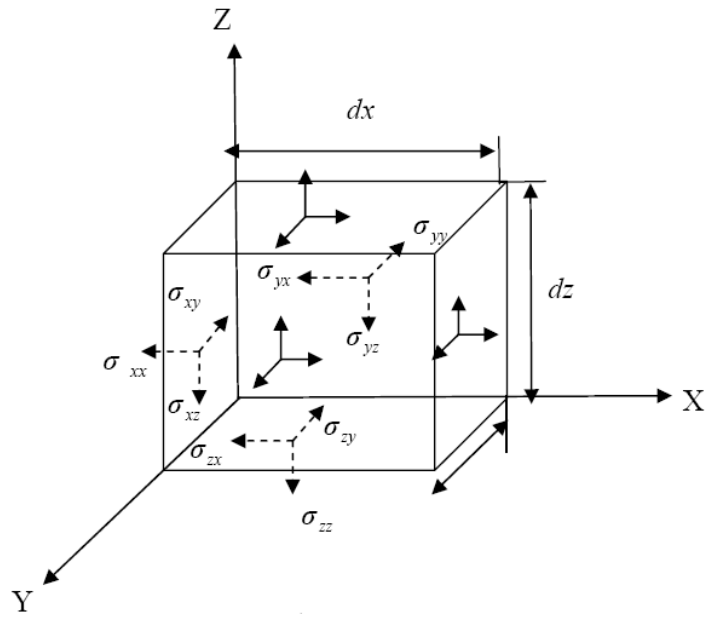


圖 2.7 元素表面應力分佈圖



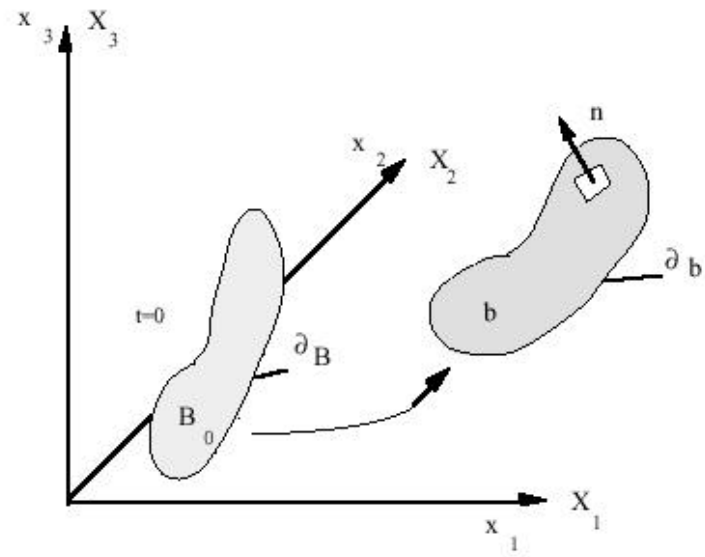


圖 3.1 物體位移示意圖

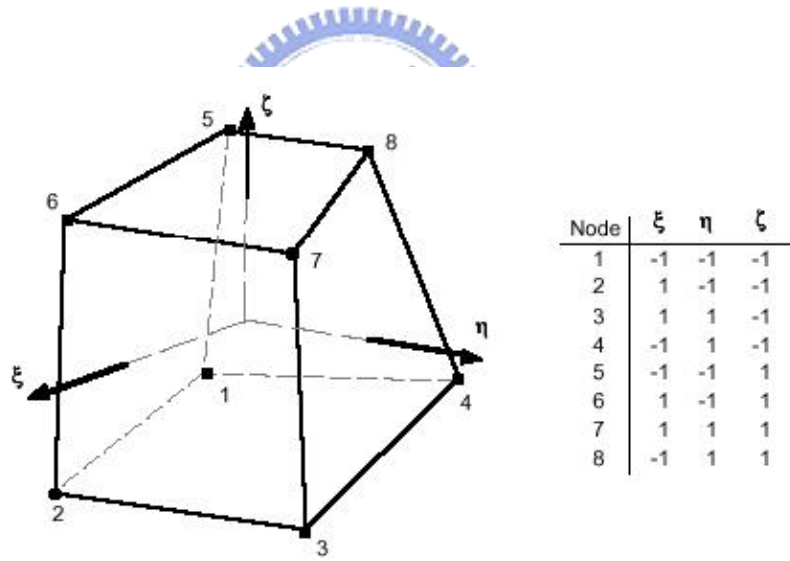


圖 3.2 八節點的六面立體元素

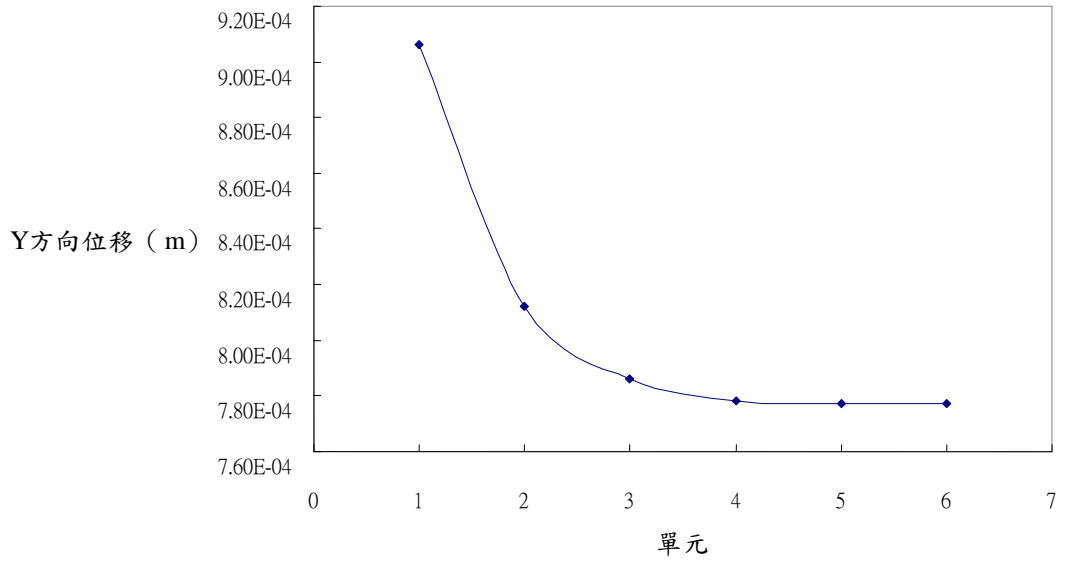


圖 3.3 Y 方向單元數收斂示意圖

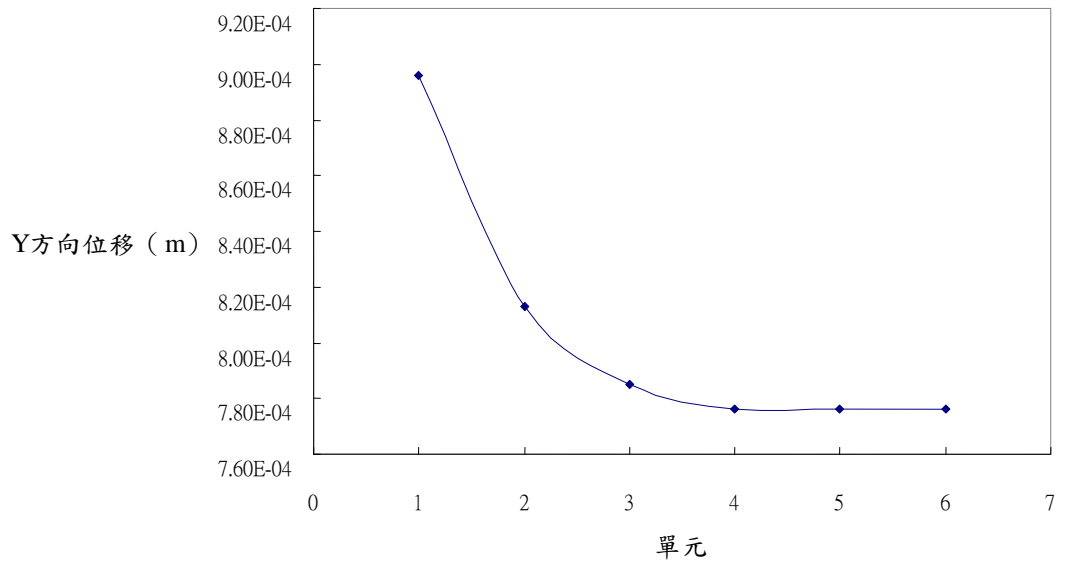


圖 3.4 Z 方向對稱單元數收斂示意圖

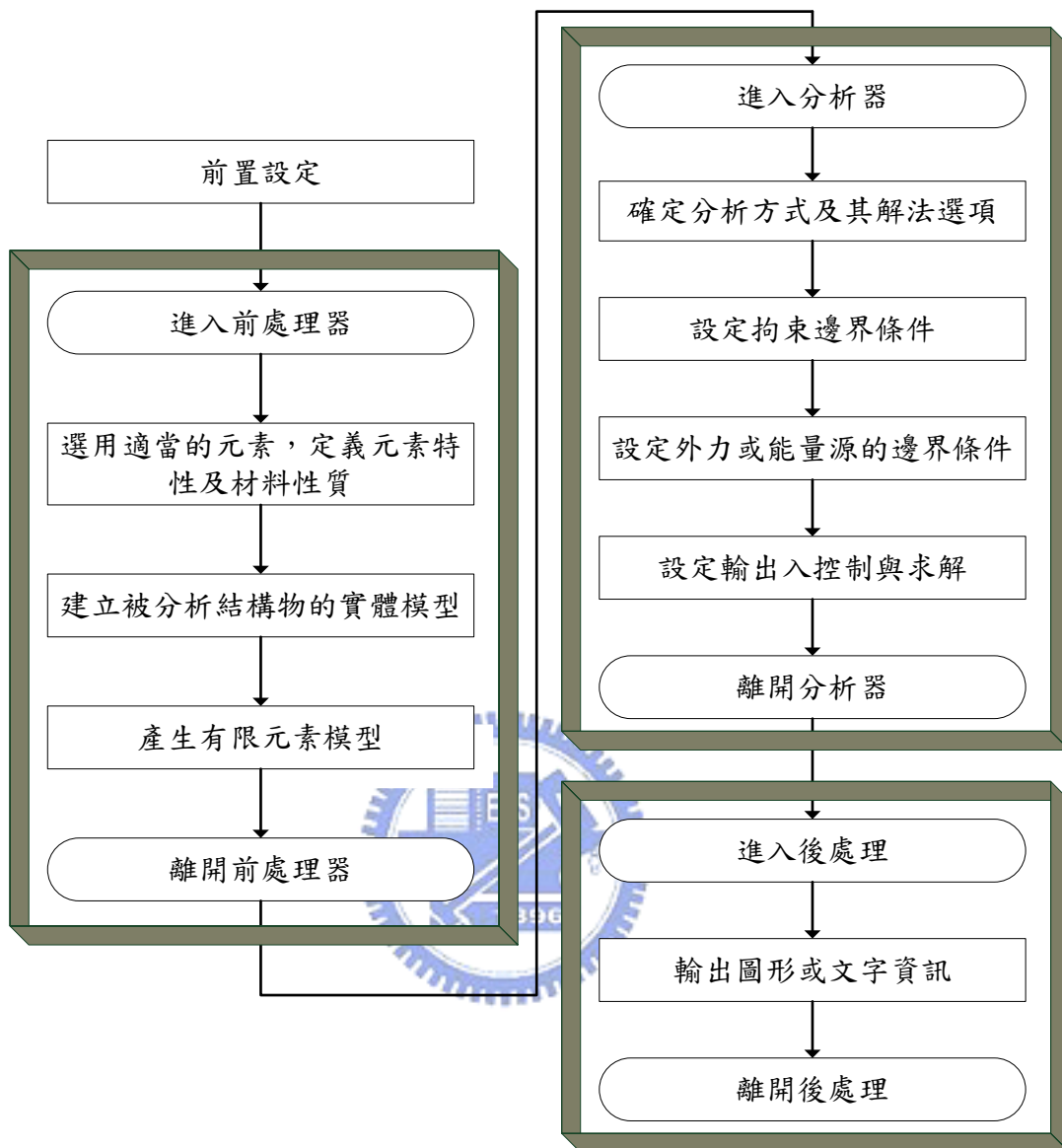


圖 3.5 軟體分析處理作業流程

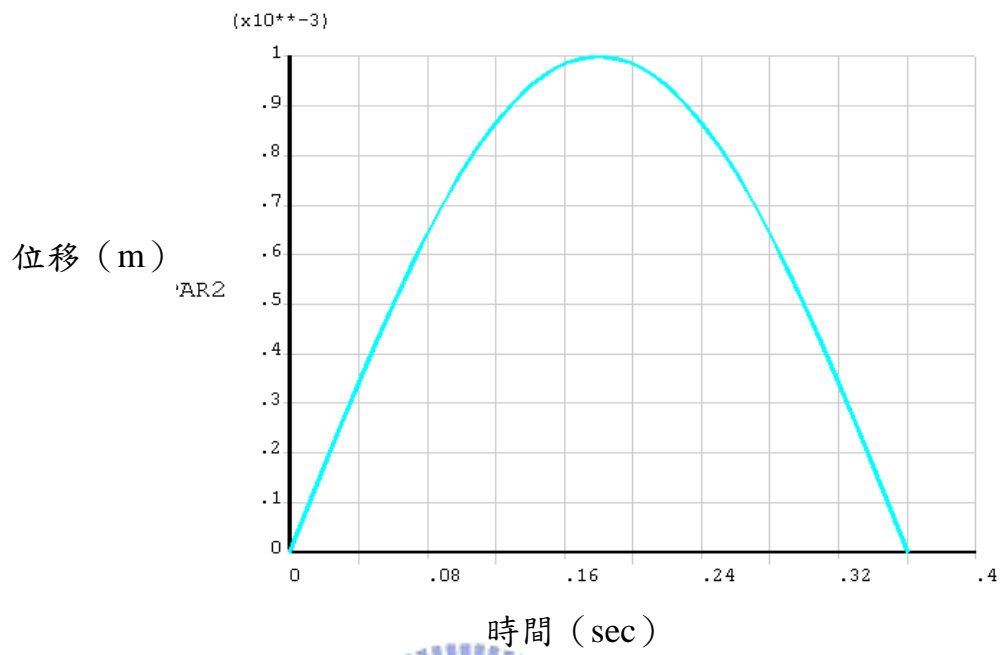


圖 3.6 時間-位移之荷重曲線



圖 3.7 顯式時間積分的最小元素長度

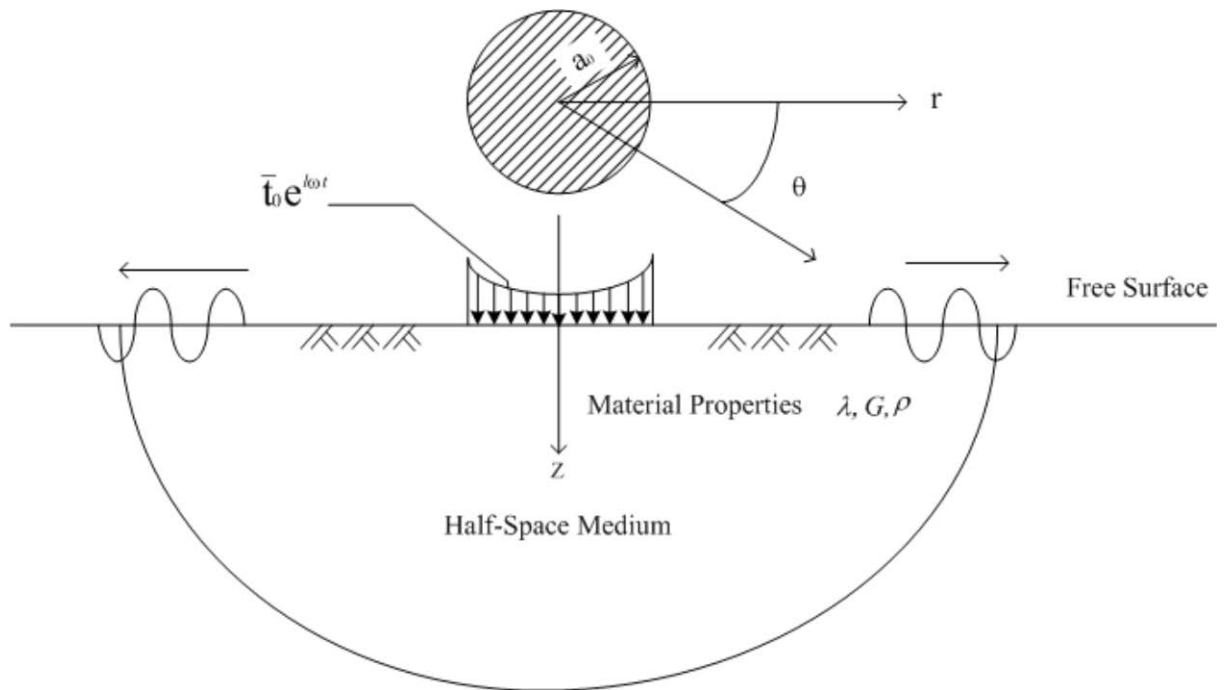


圖 4.1 動態載重施加於半無限域空間[5]

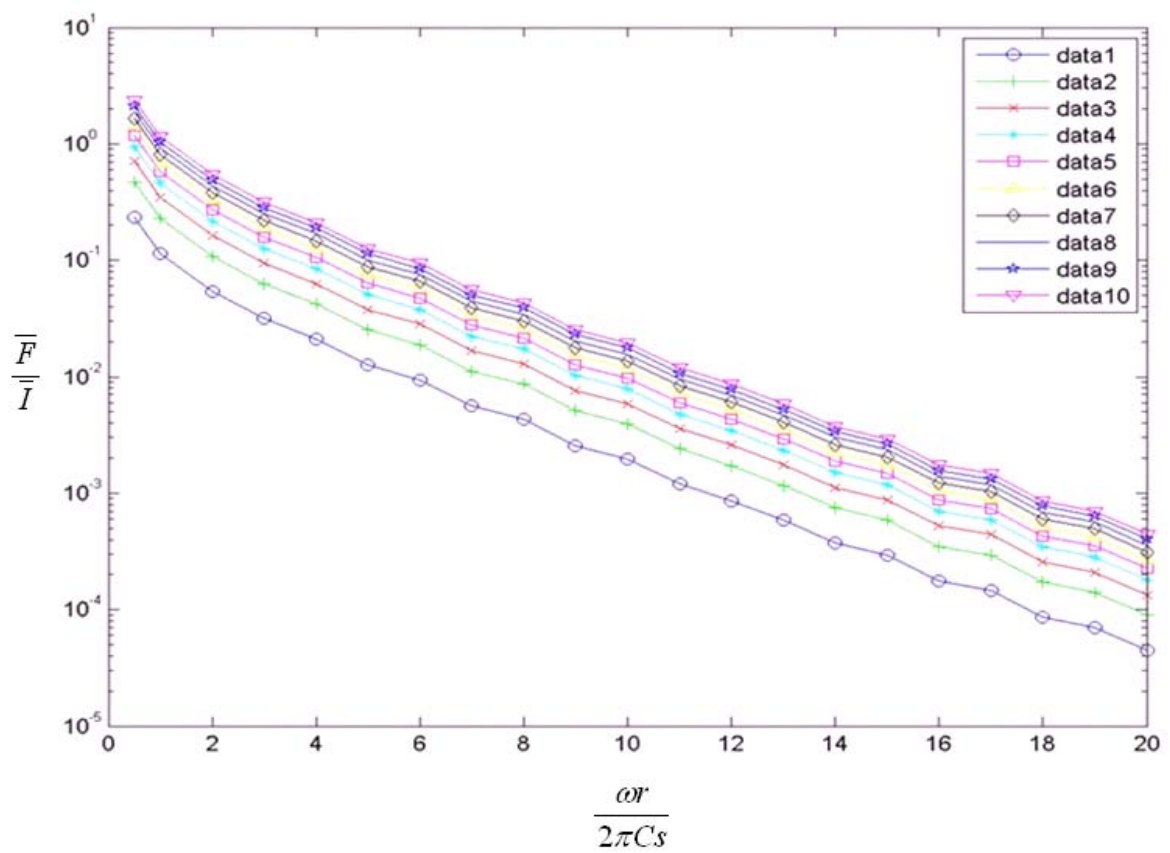


圖 4.2 波傳衰減曲線圖[5]

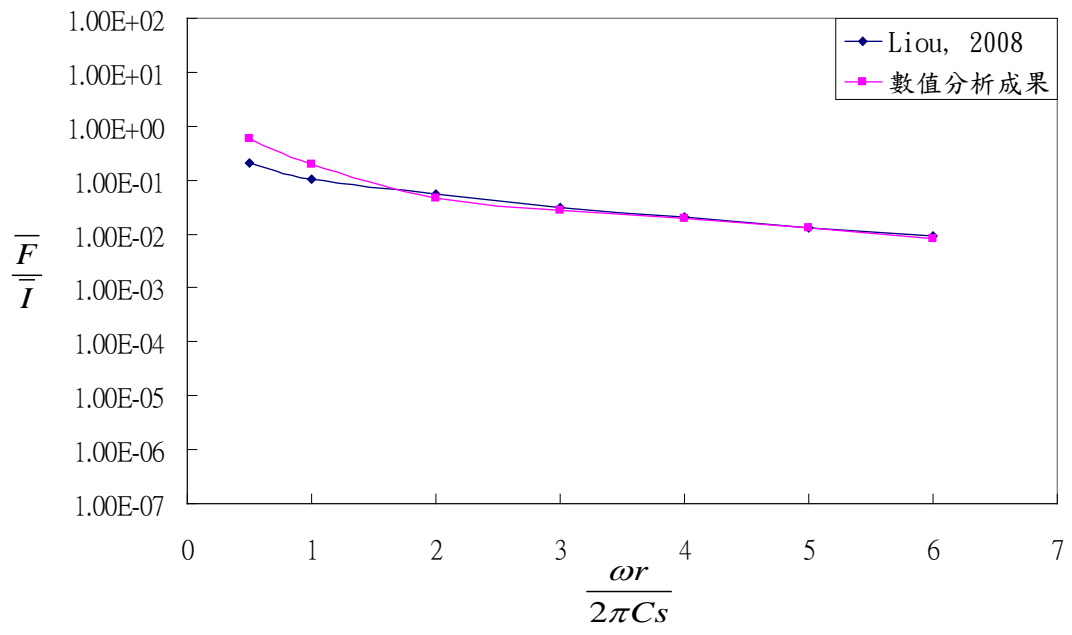


圖 4.3 數值正確性驗證



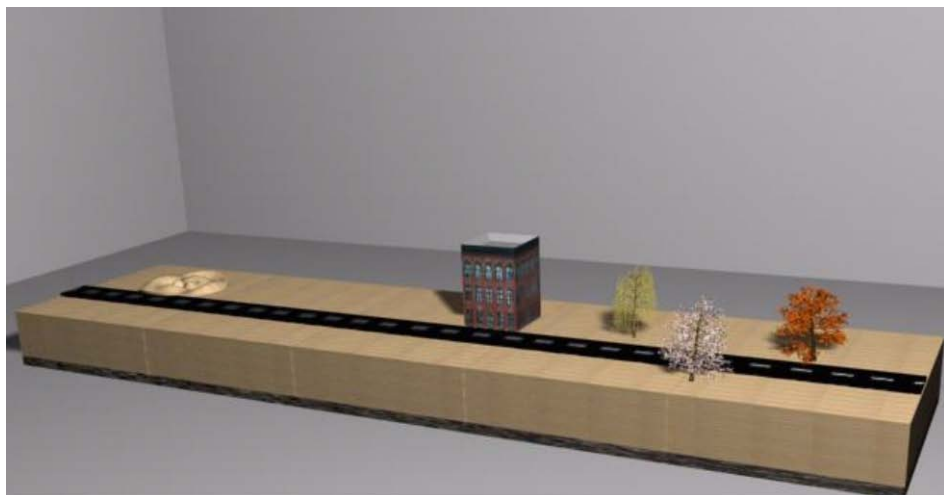
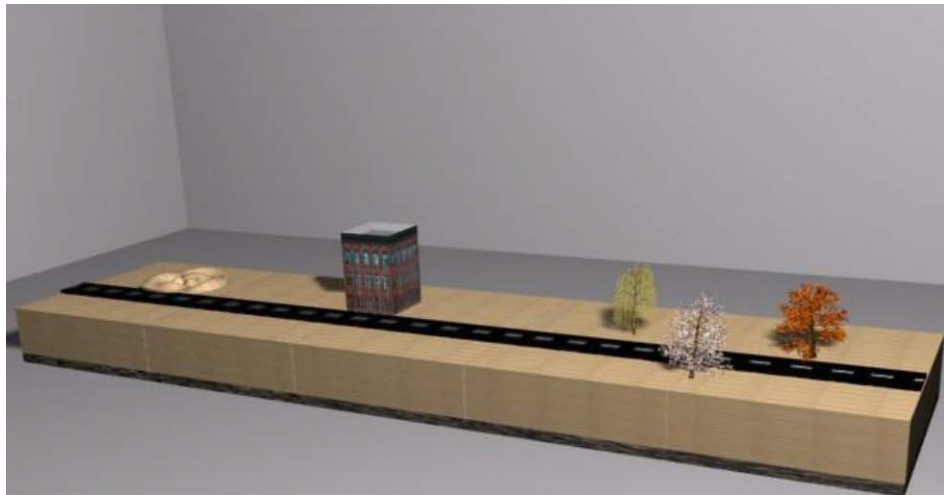
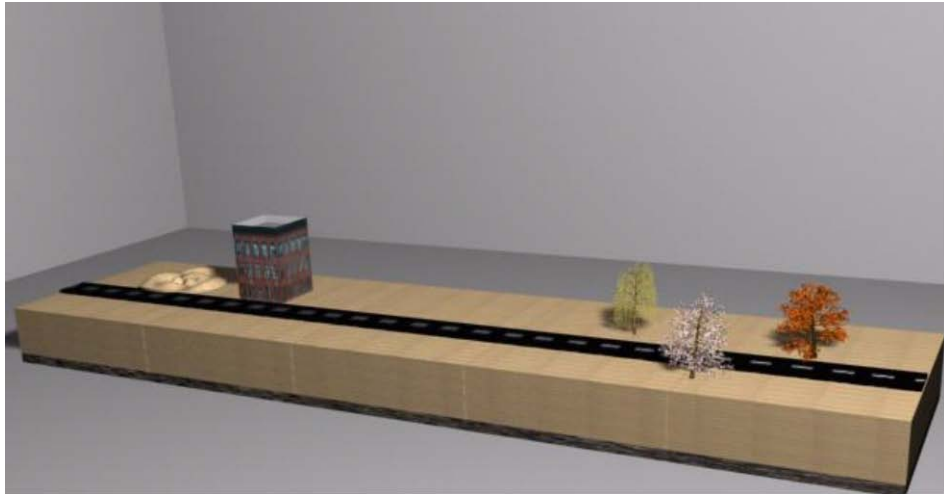


圖 4.4 振源於 A 測線前數值模擬分析示意圖

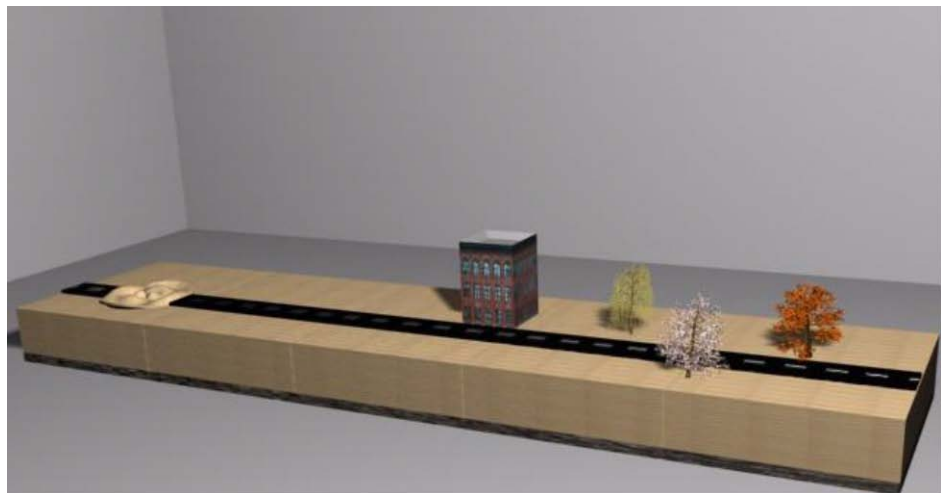
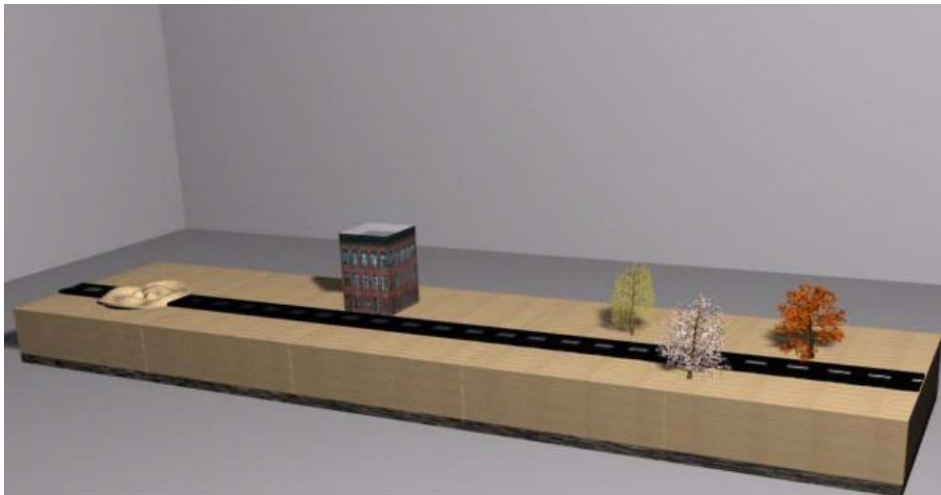
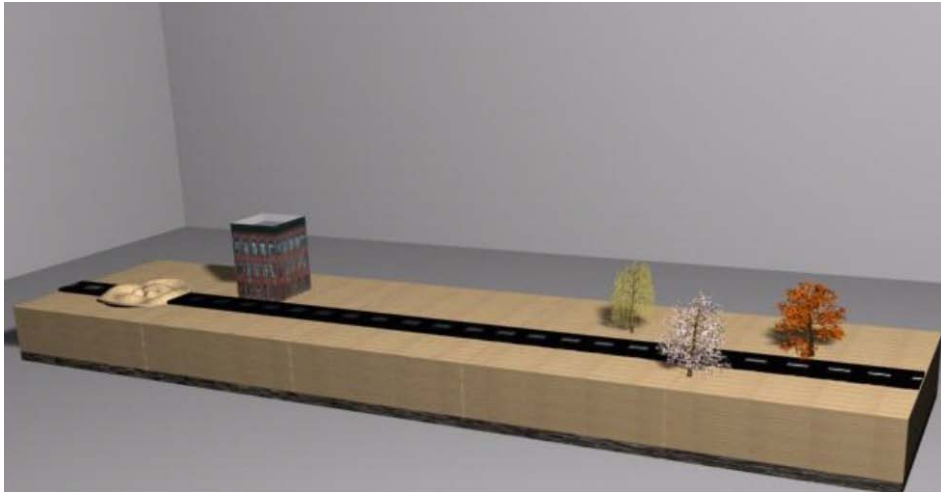


圖 4.5 振源於 B 測線前數值模擬分析示意圖

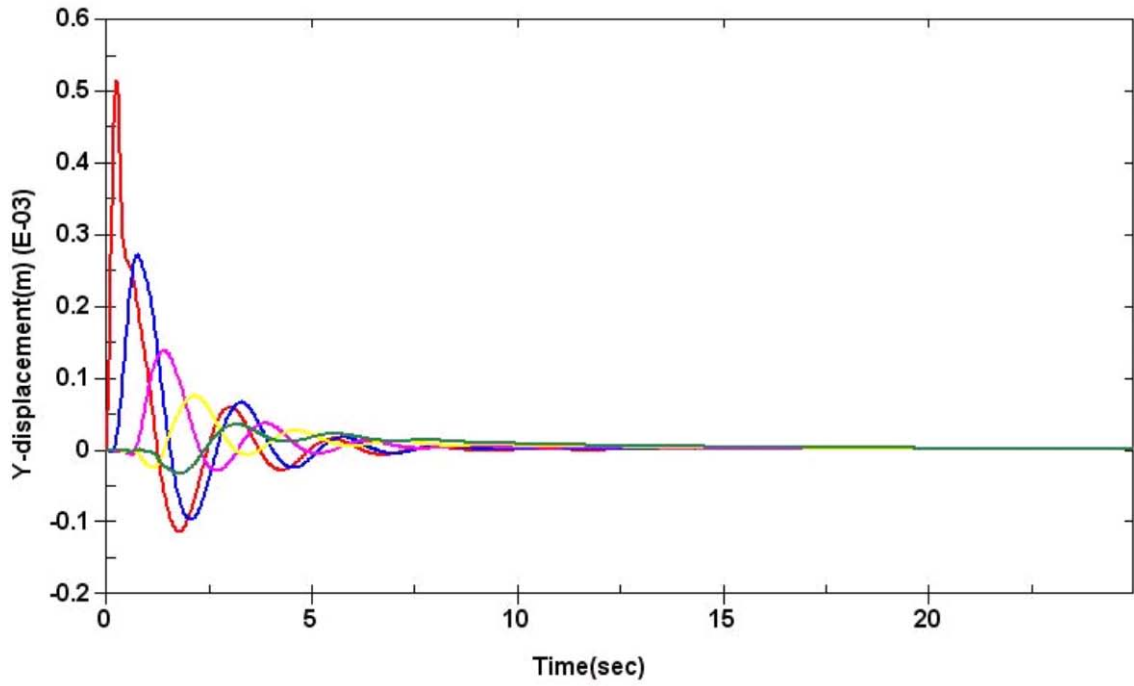


圖 4.6 振波於不同測點 Y 方向衰減行為

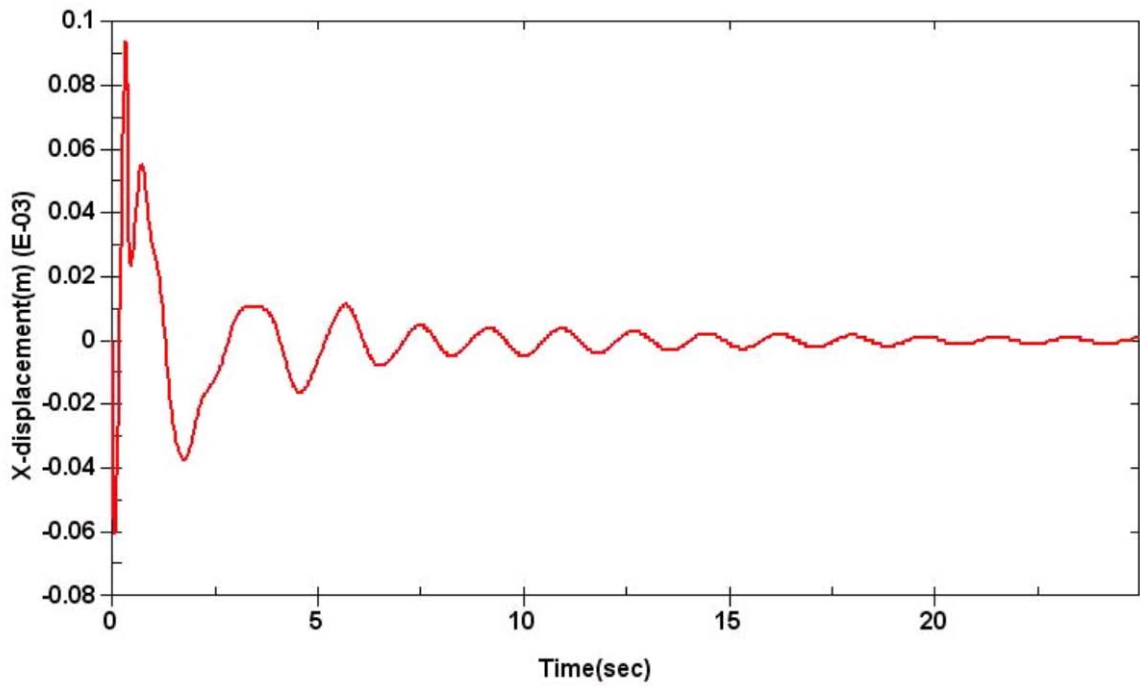


圖 4.7 距振源 12m 處 X 方向位移歷時

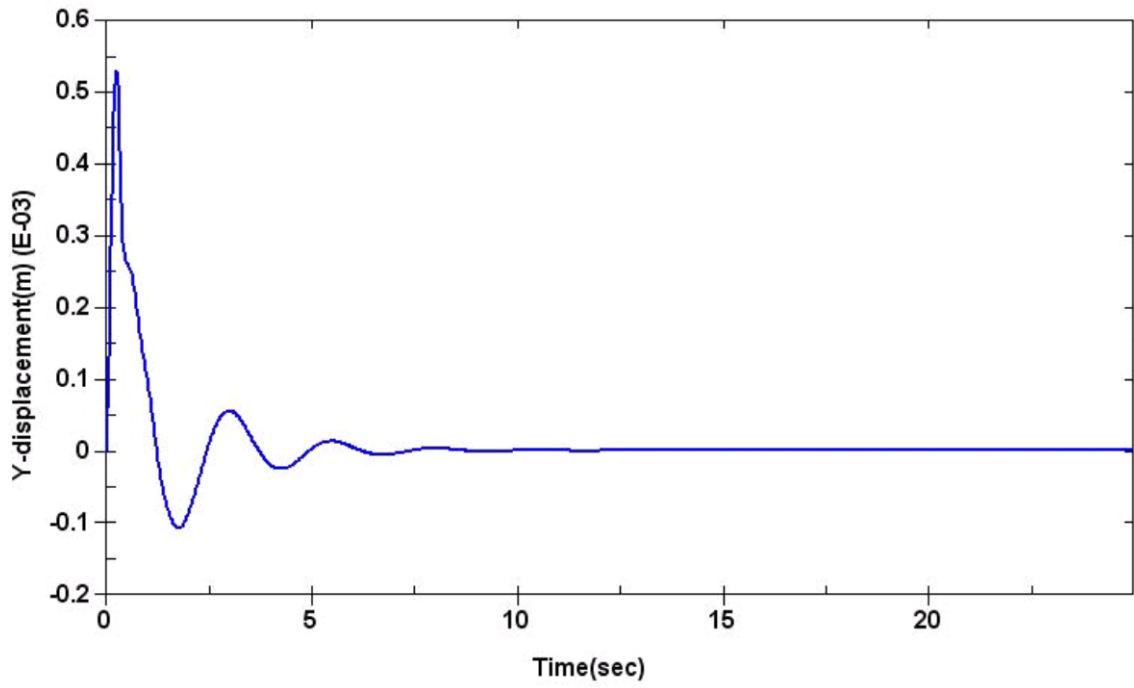


圖 4.8 距振源 12m 處 Y 方向位移歷時

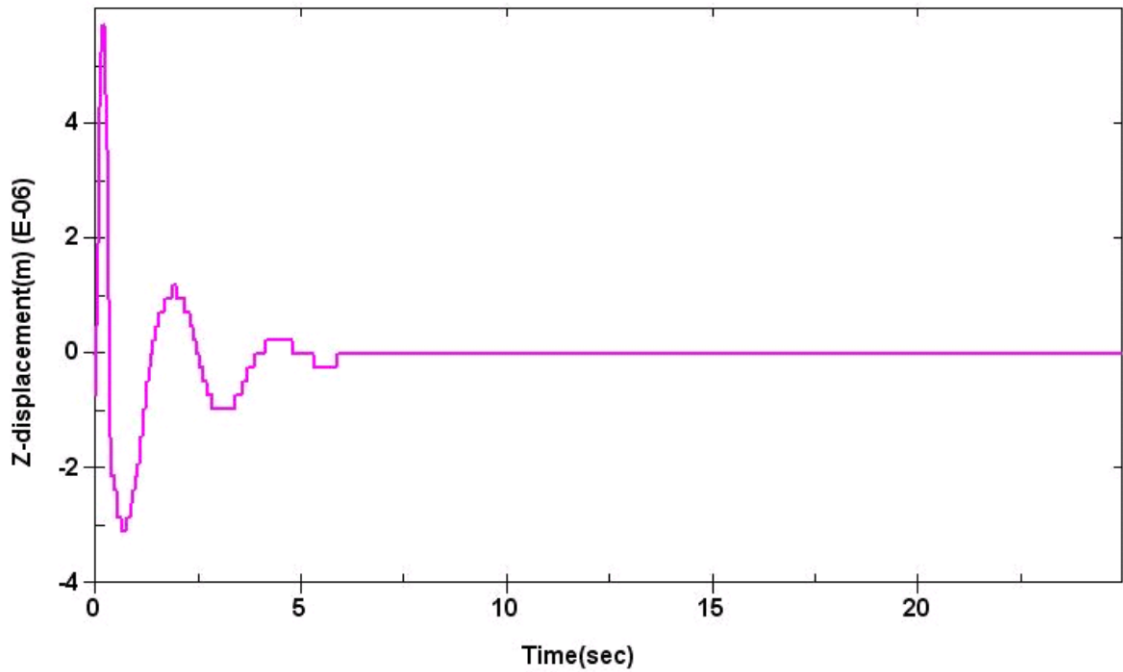
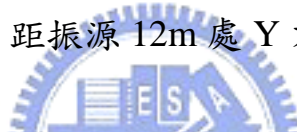


圖 4.9 距振源 12m 處 Z 方向位移歷時

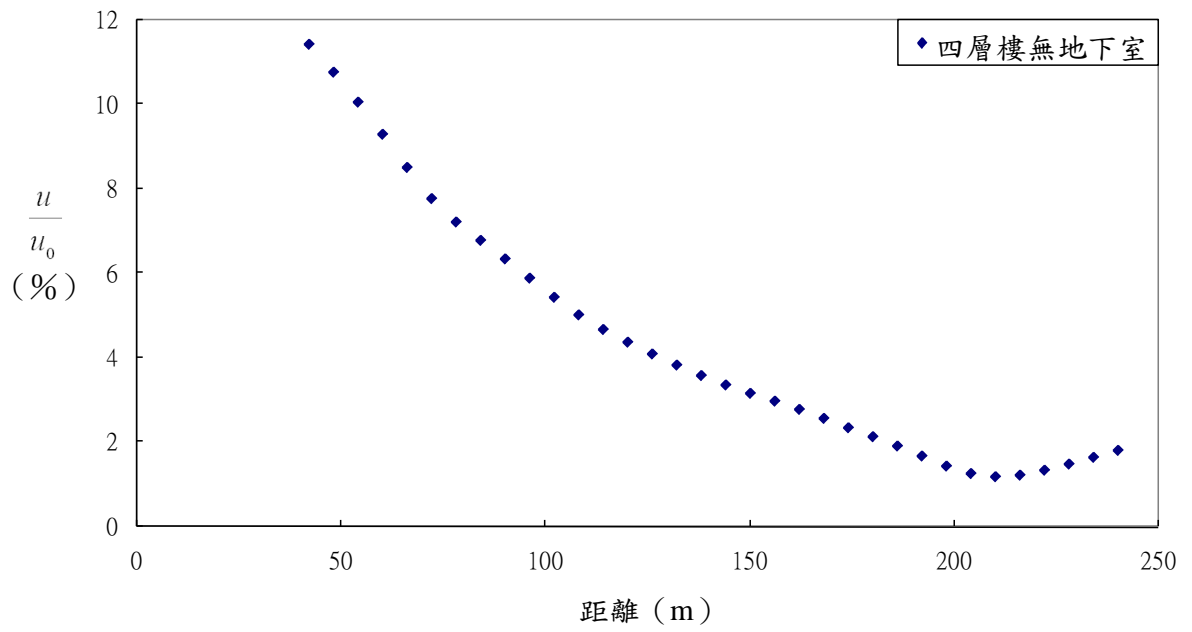


圖 4.10 振源在 A 測線前之波傳衰減行為

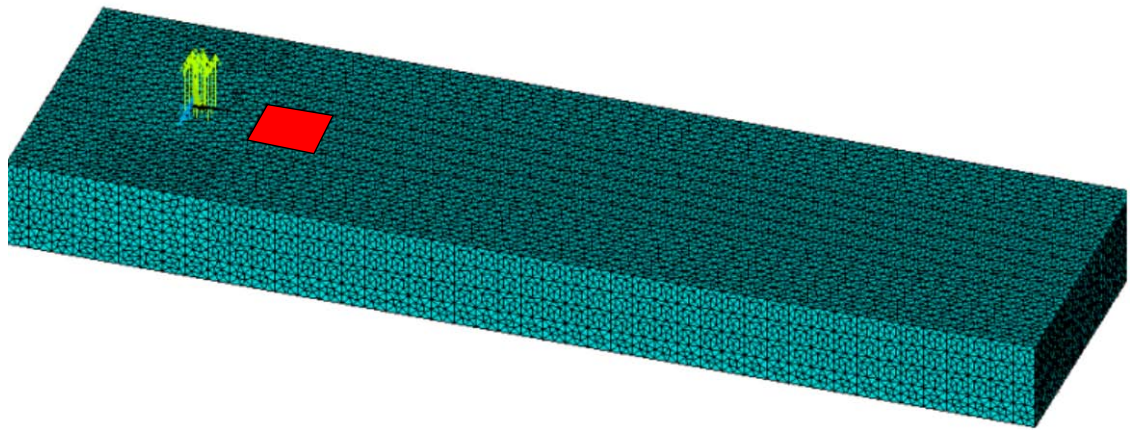


圖 4.11 振源在 A 測線前之四層樓高無地下室模型

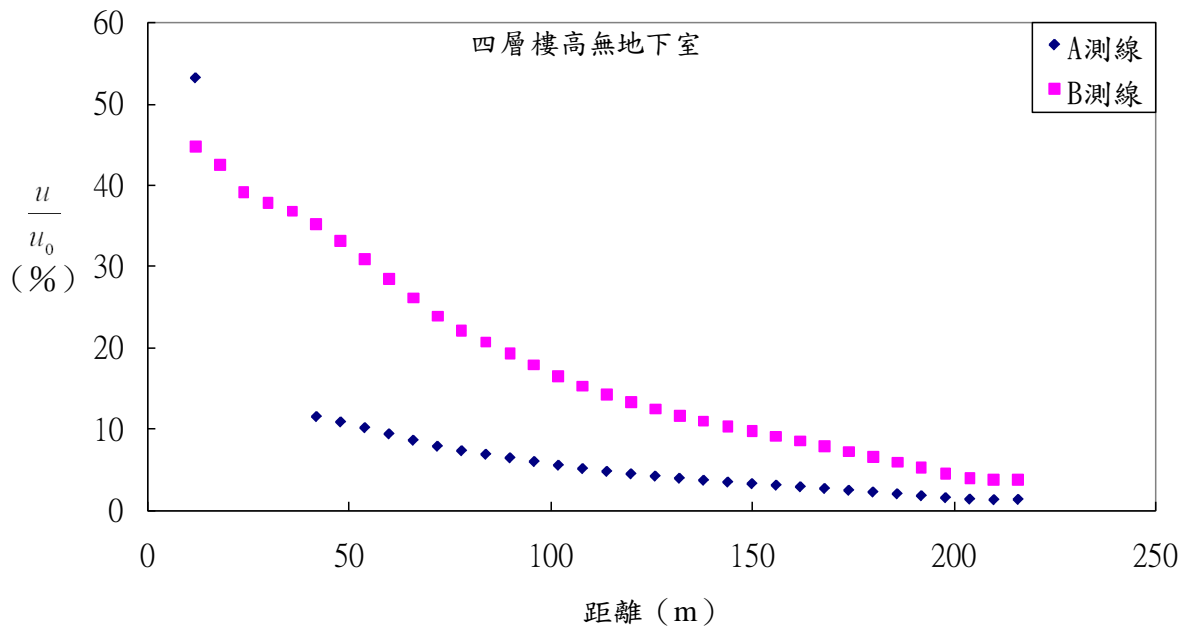
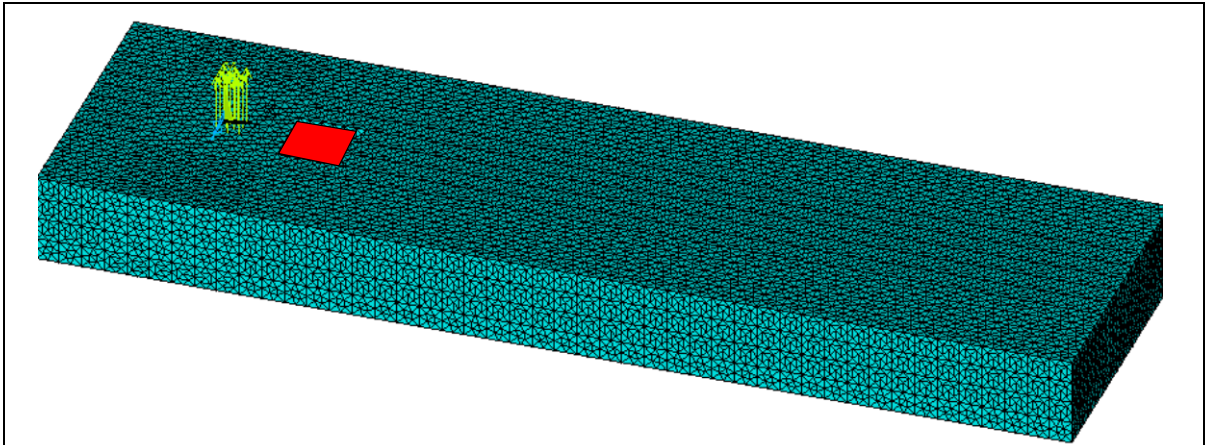
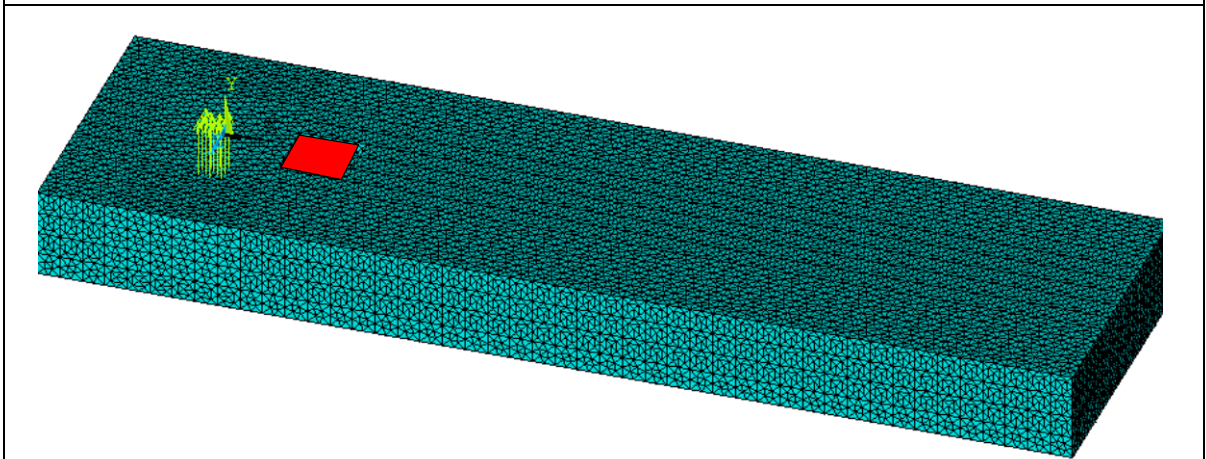


圖 4.12 振源在 A 測線前其 A 測線與 B 測線之分析





振源在 A 測線前之四層樓無地下室模型



振源在 B 測線前之四層樓無地下室模型

圖 4.13 振動源不同之模型

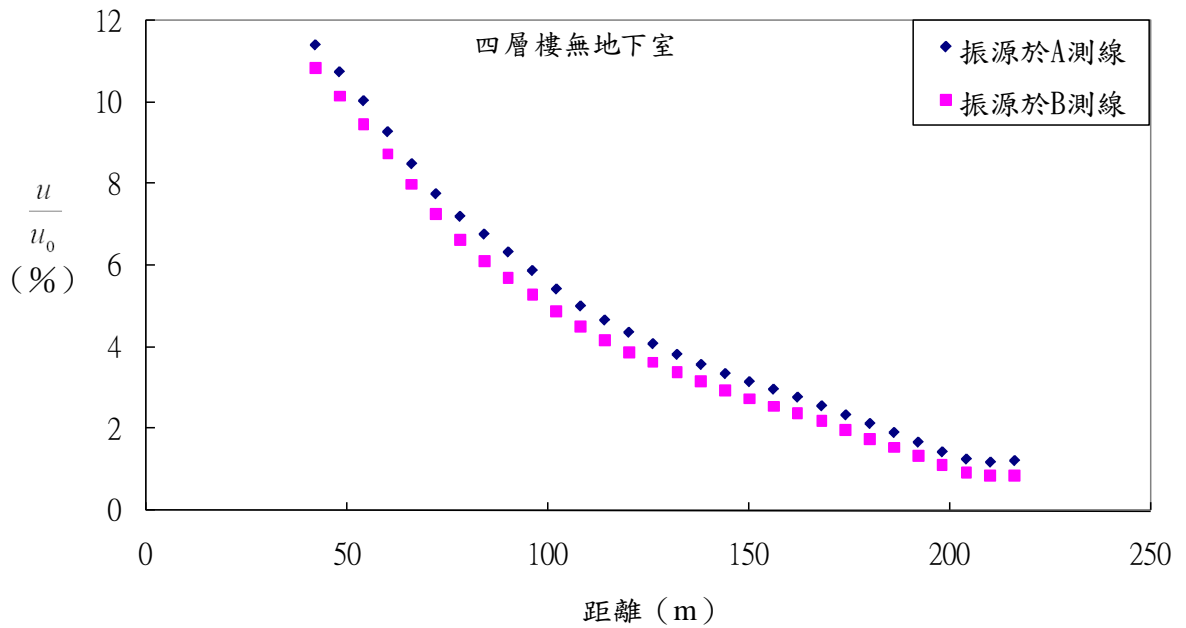


圖 4.14 不同振動源對於 A 測線之測點分析

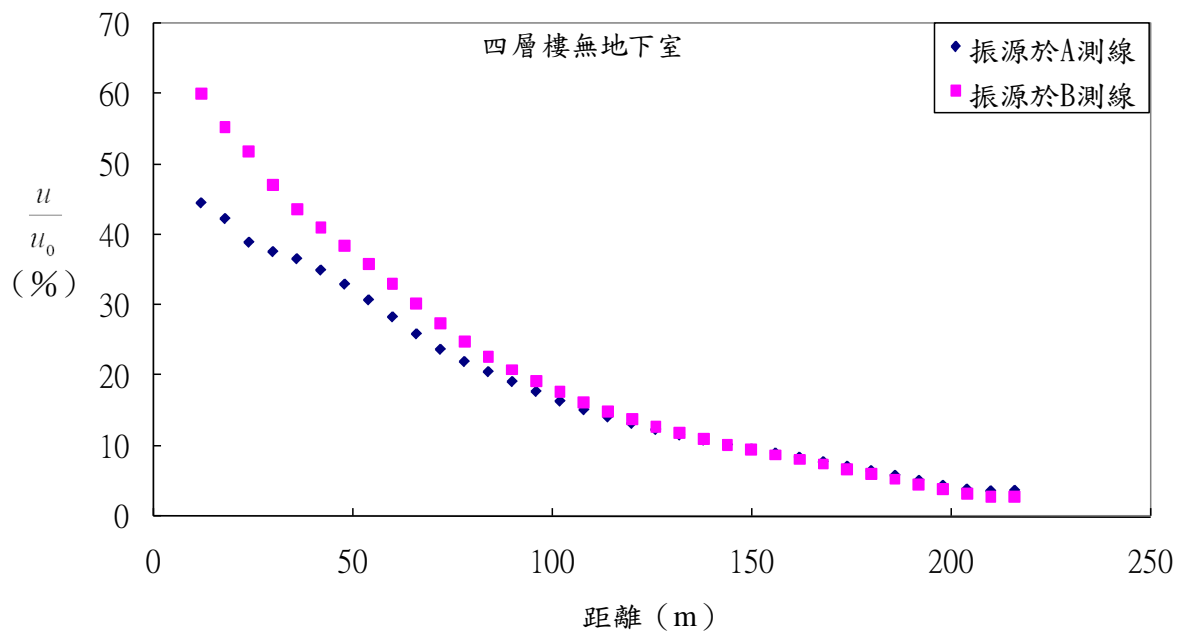


圖 4.15 不同振動源對於 B 測線之測點分析

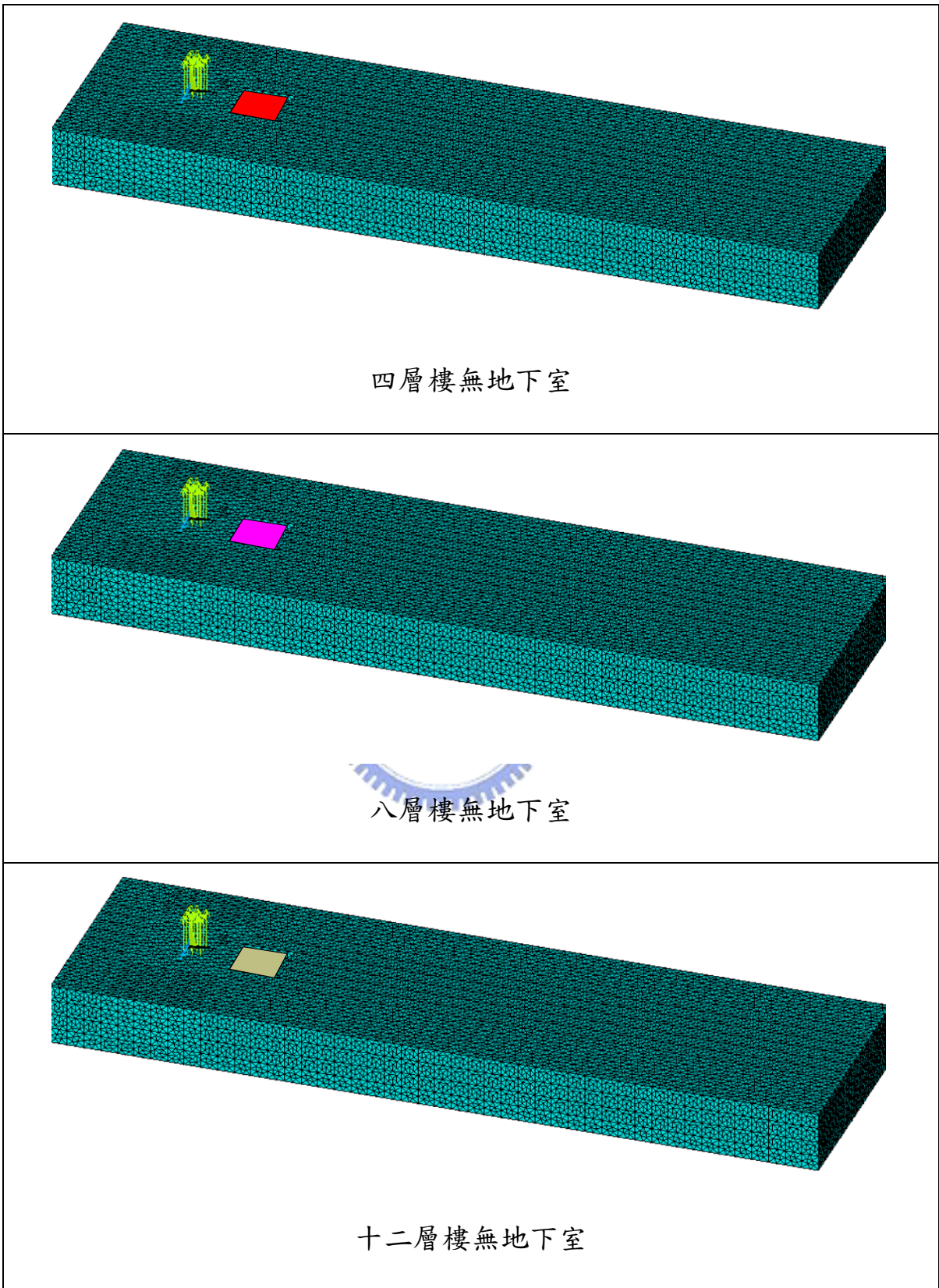


圖 4.16 振源於 A 測線前，不同樓層數之模型

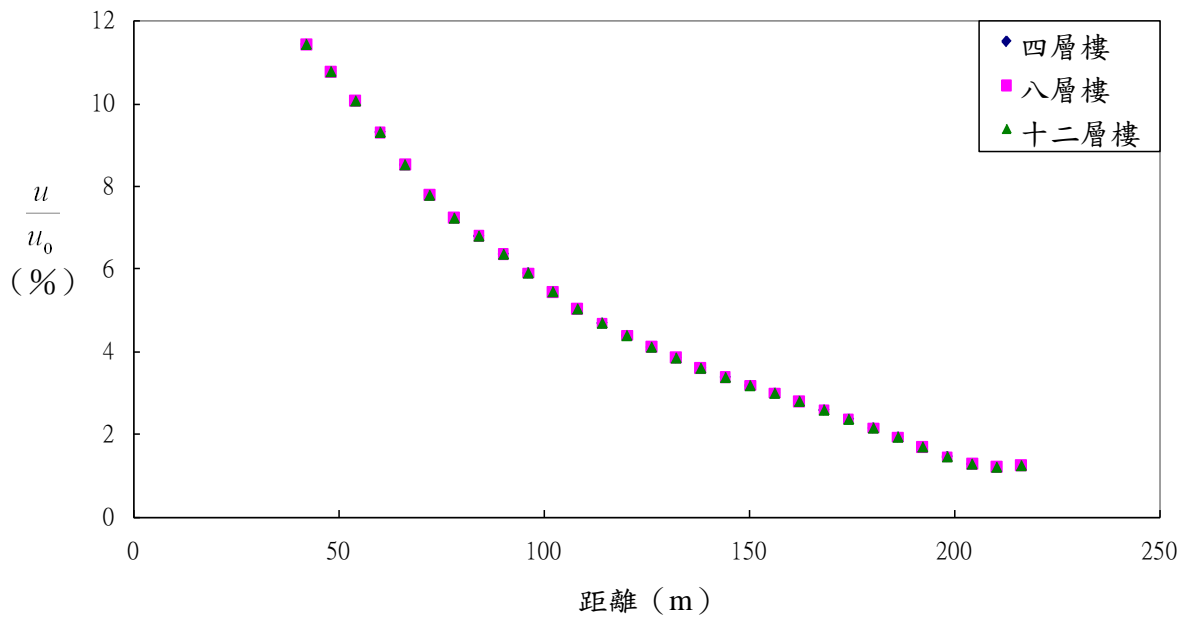


圖 4.17 振源於 A 測線前，不同樓層數對 A 測線之分析

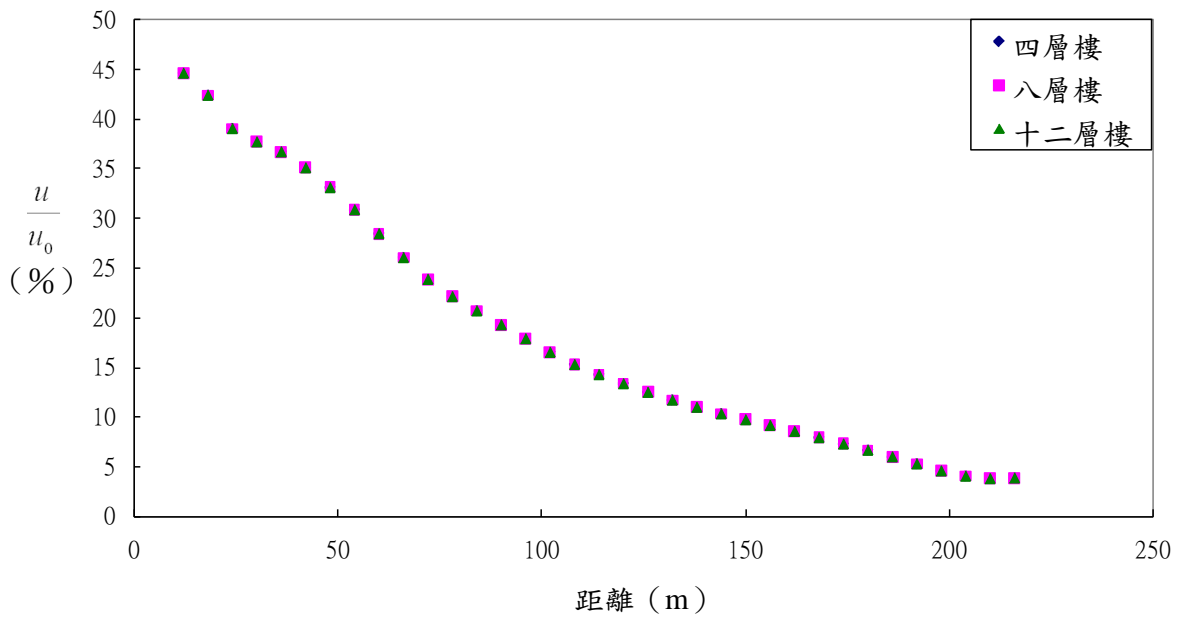
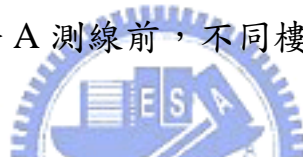


圖 4.18 振源於 A 測線前，不同樓層數對 B 測線之分析

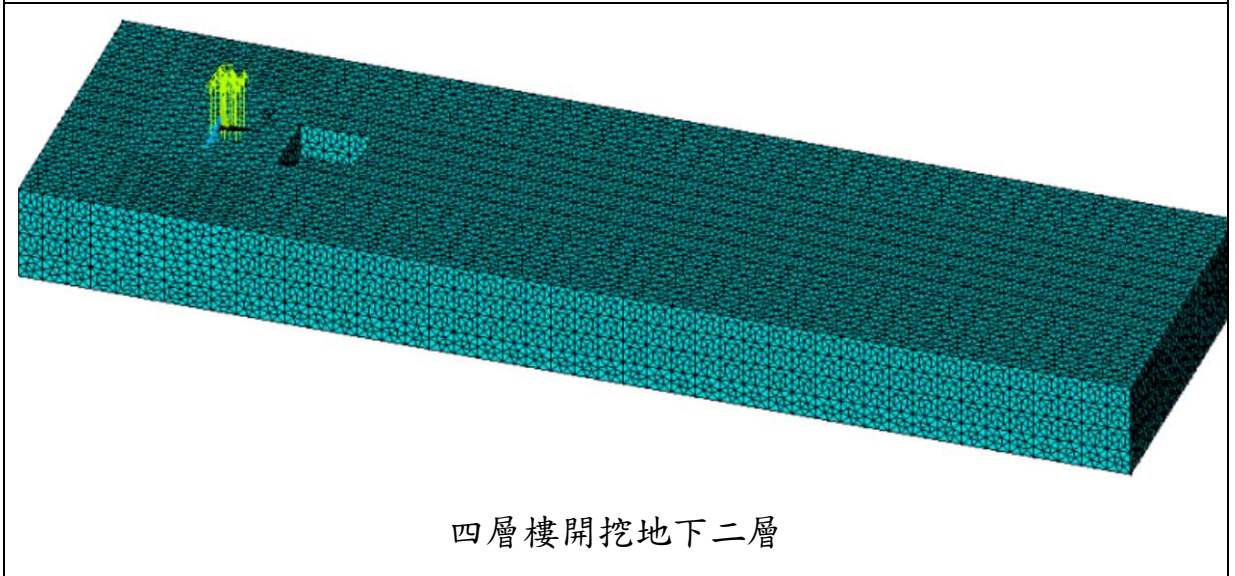
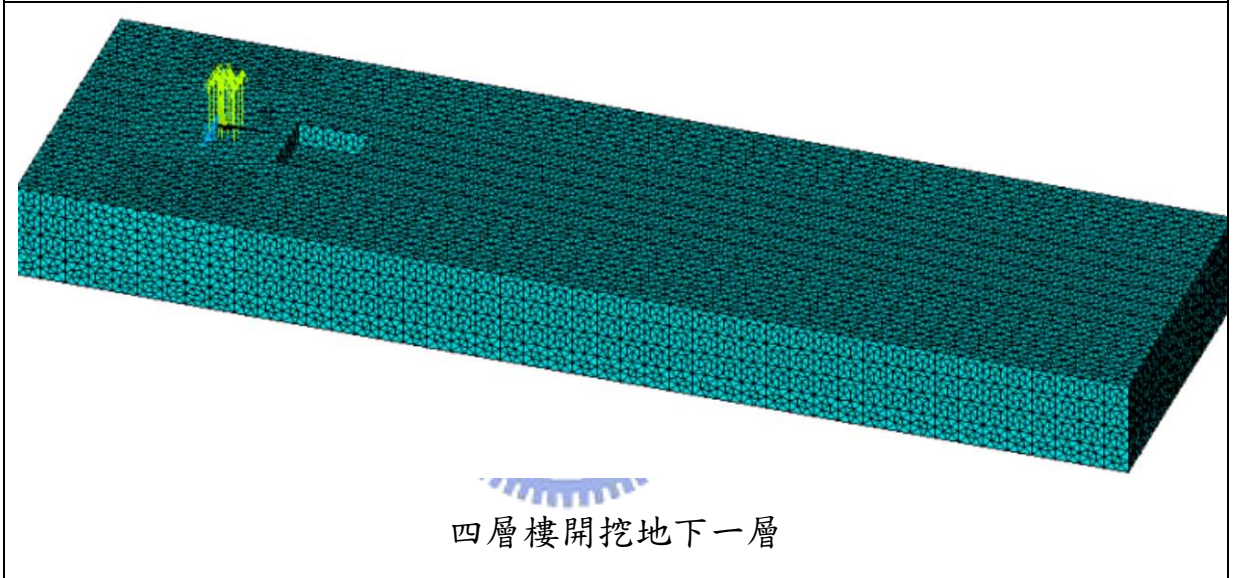
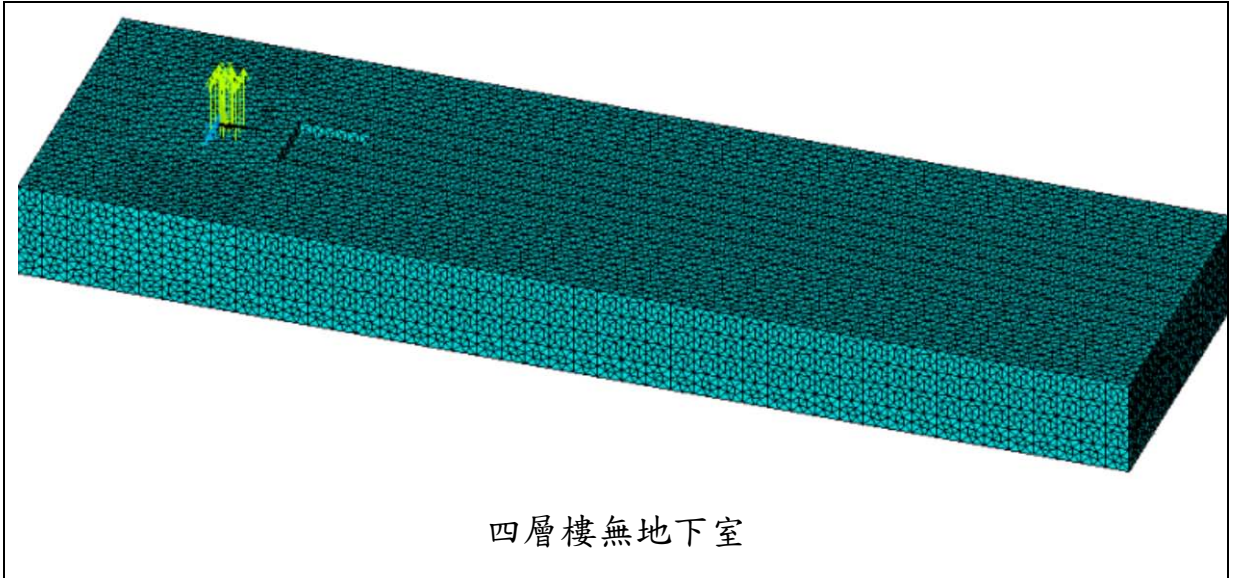


圖 4.19 振源於 A 測線前，改變開挖深度之模型

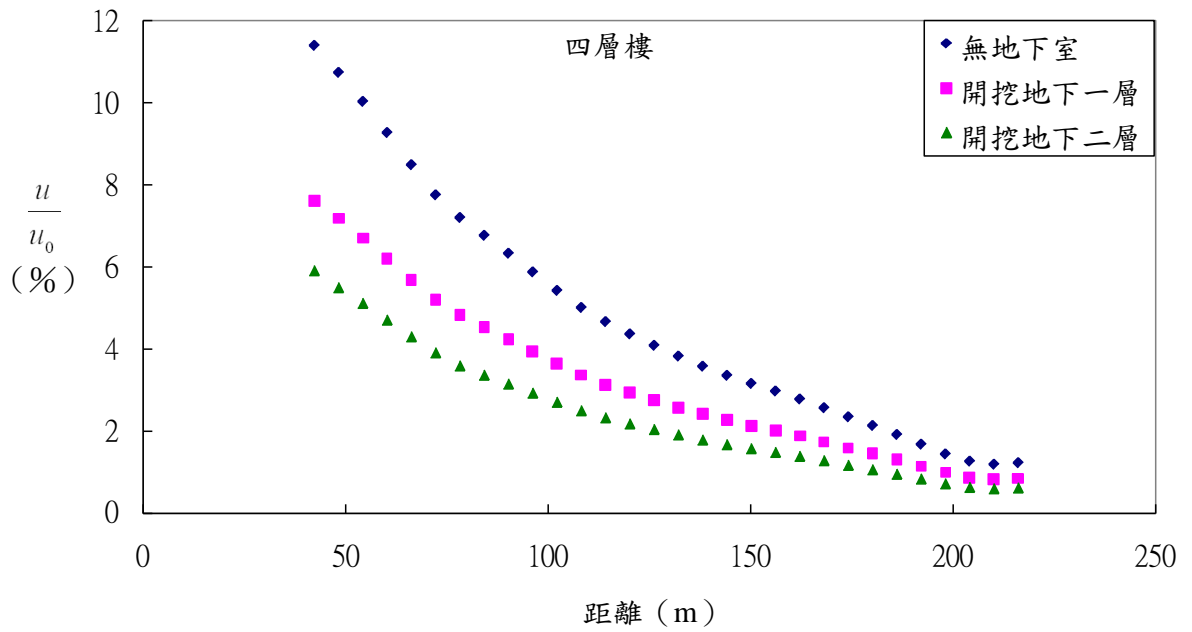


圖 4.20 振源於 A 測線前，不同開挖深度對 A 測線之分析

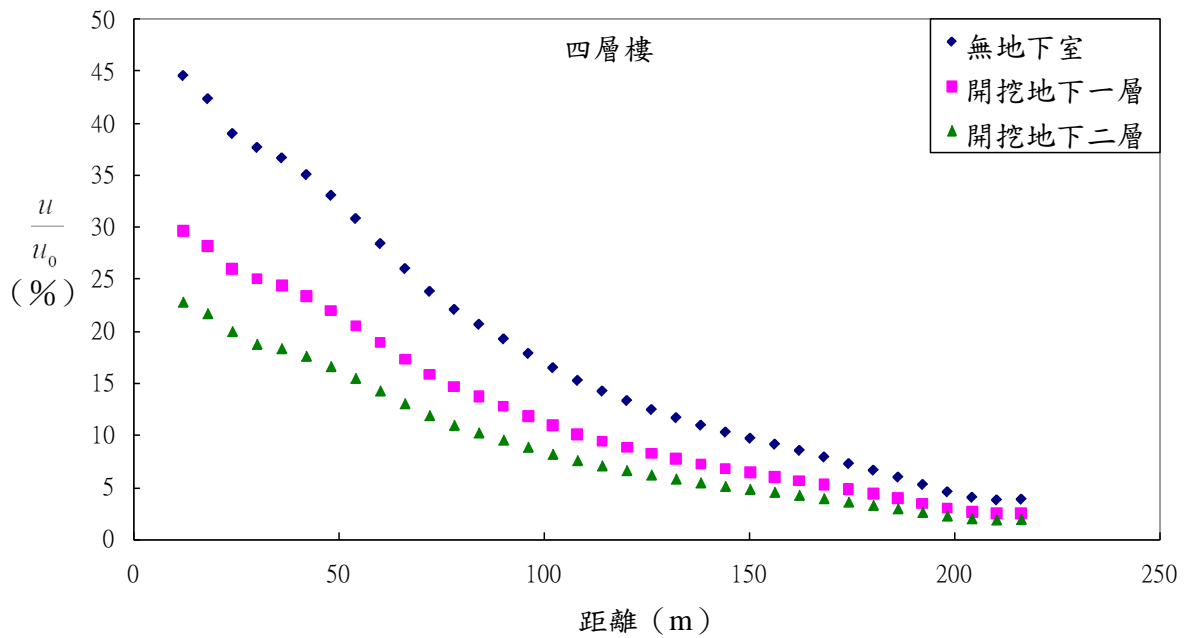


圖 4.21 振源於 A 測線前，不同開挖深度對 B 測線之分析

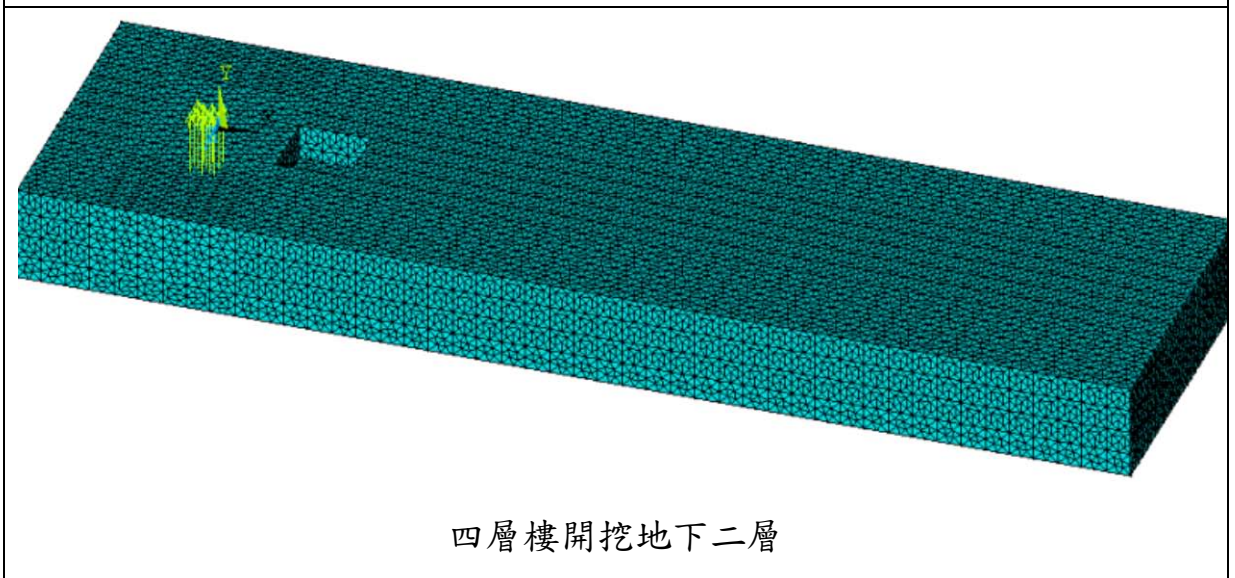
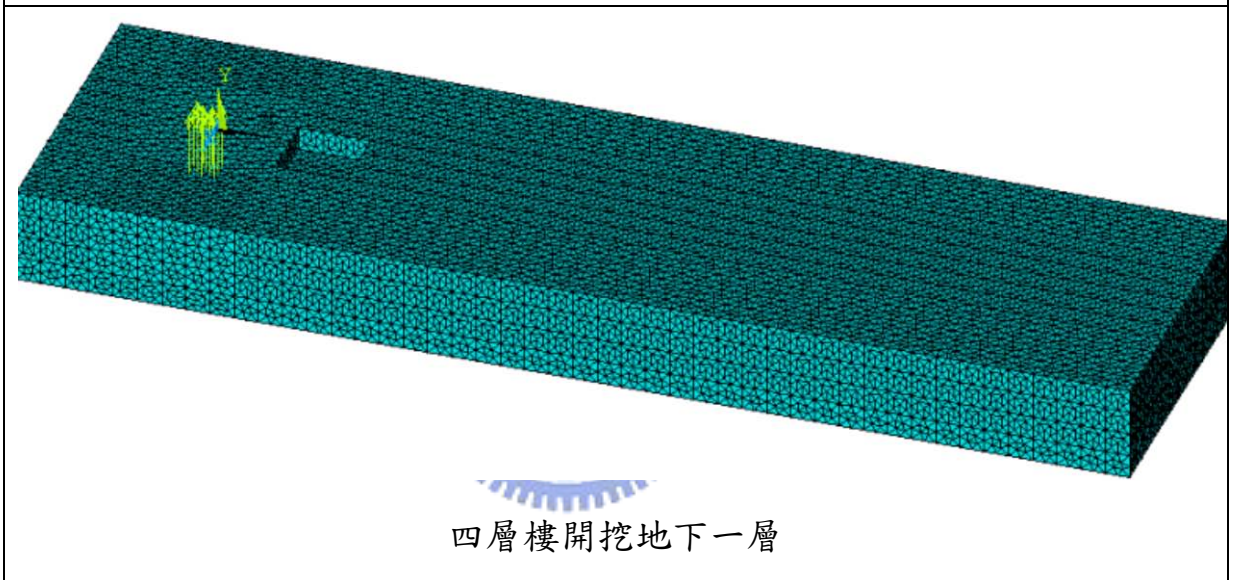
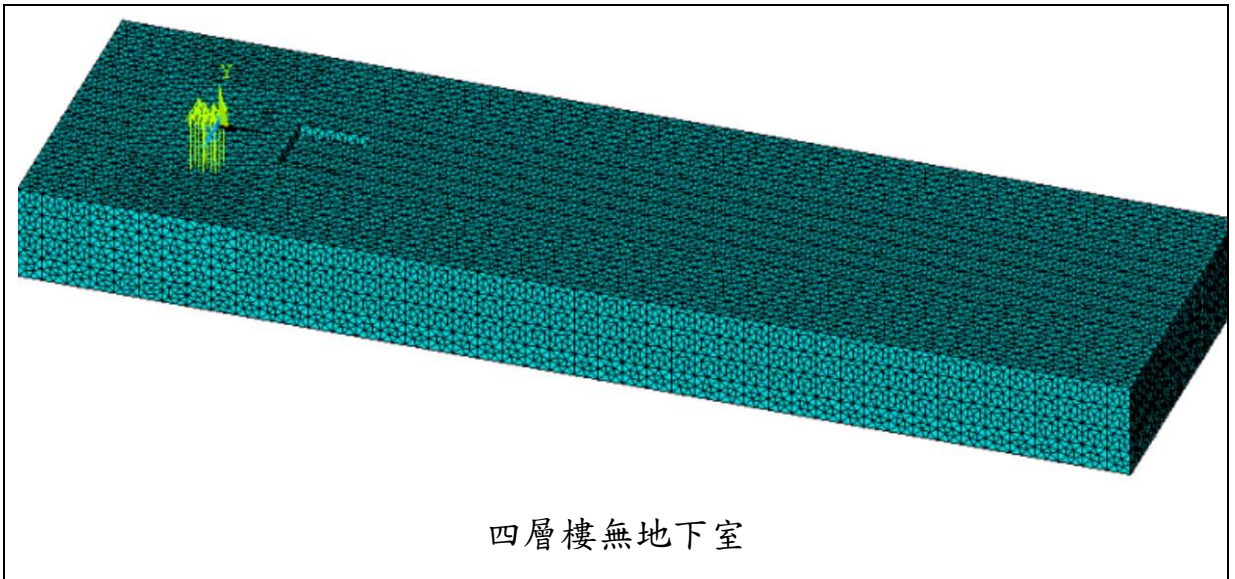


圖 4.22 振源於 B 測線前，改變開挖深度之模型

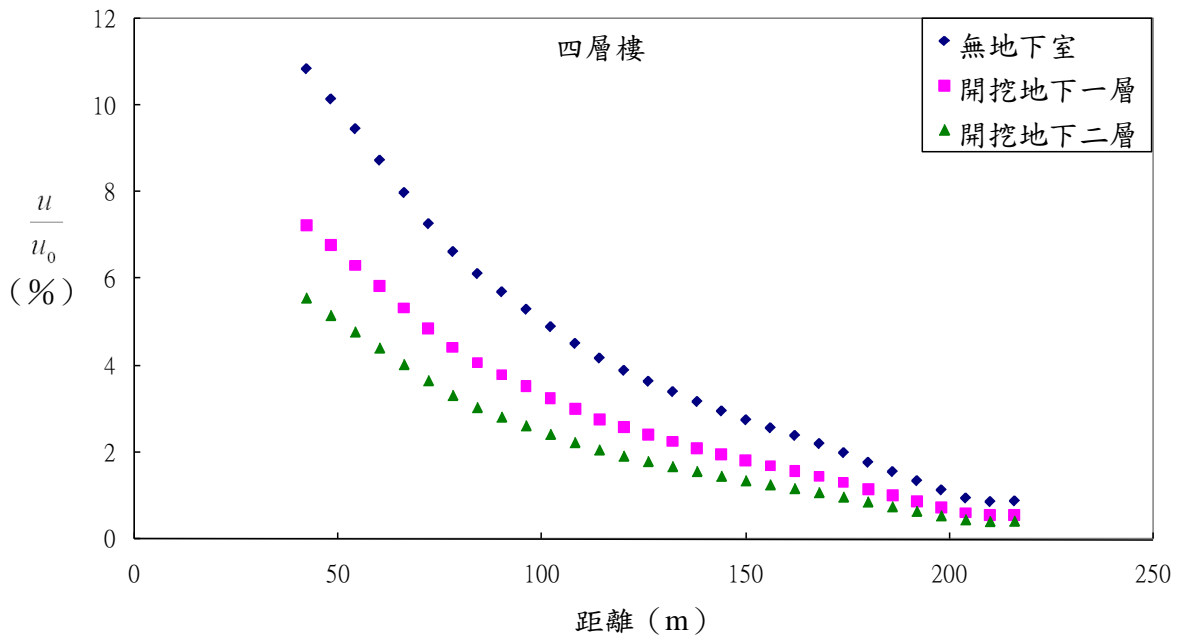


圖 4.23 振源於 B 測線前，不同開挖深度對 A 測線之分析

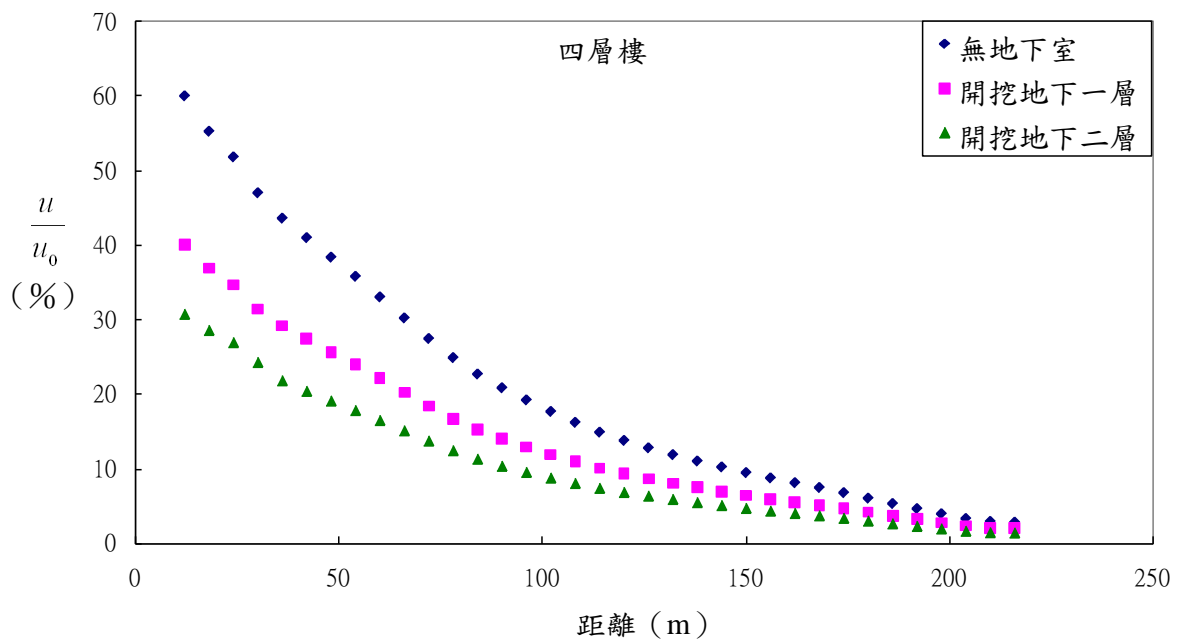


圖 4.24 振源於 B 測線前，不同開挖深度對 B 測線之分析

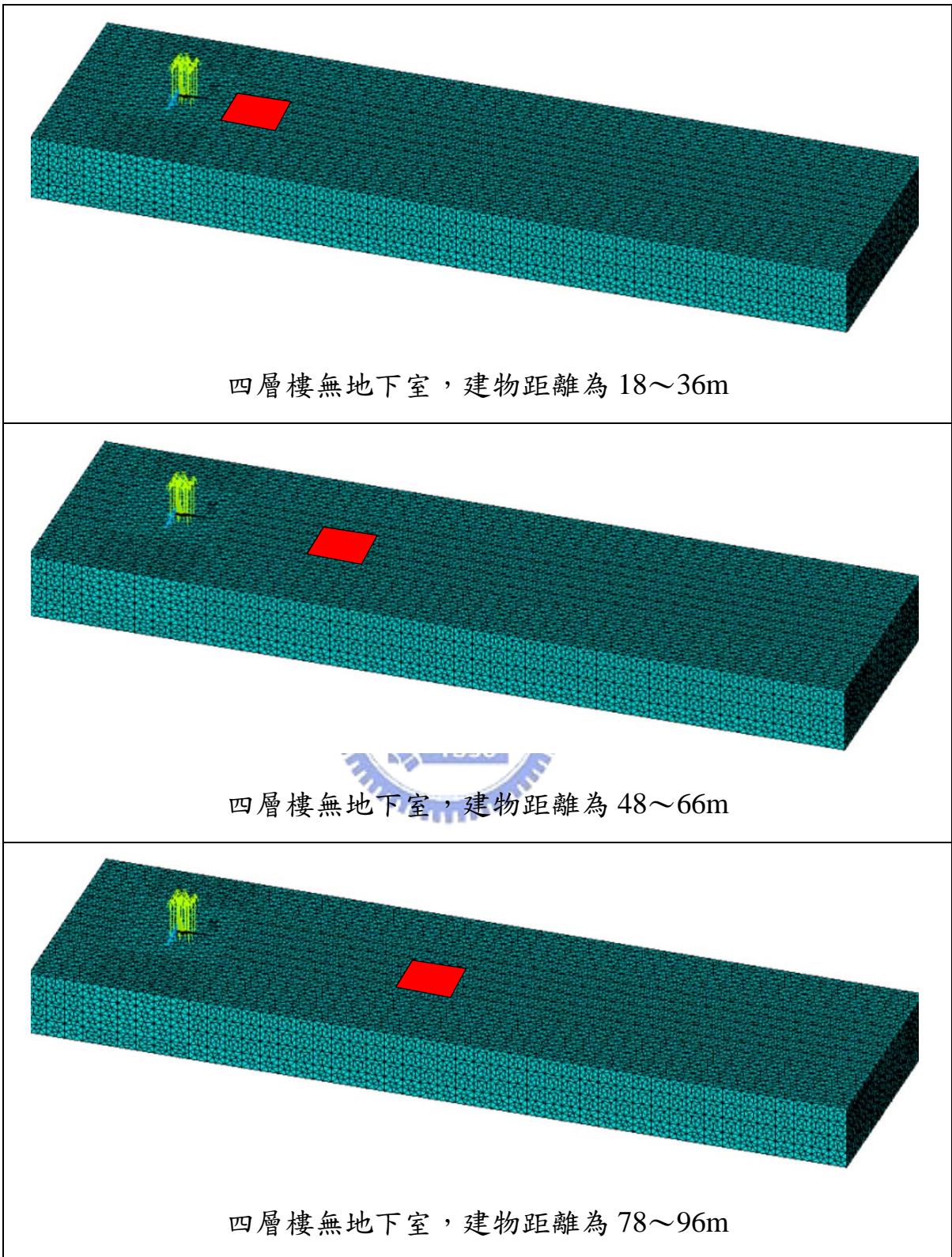


圖 4.25 振源於 A 測線前，建物位置不同之模型

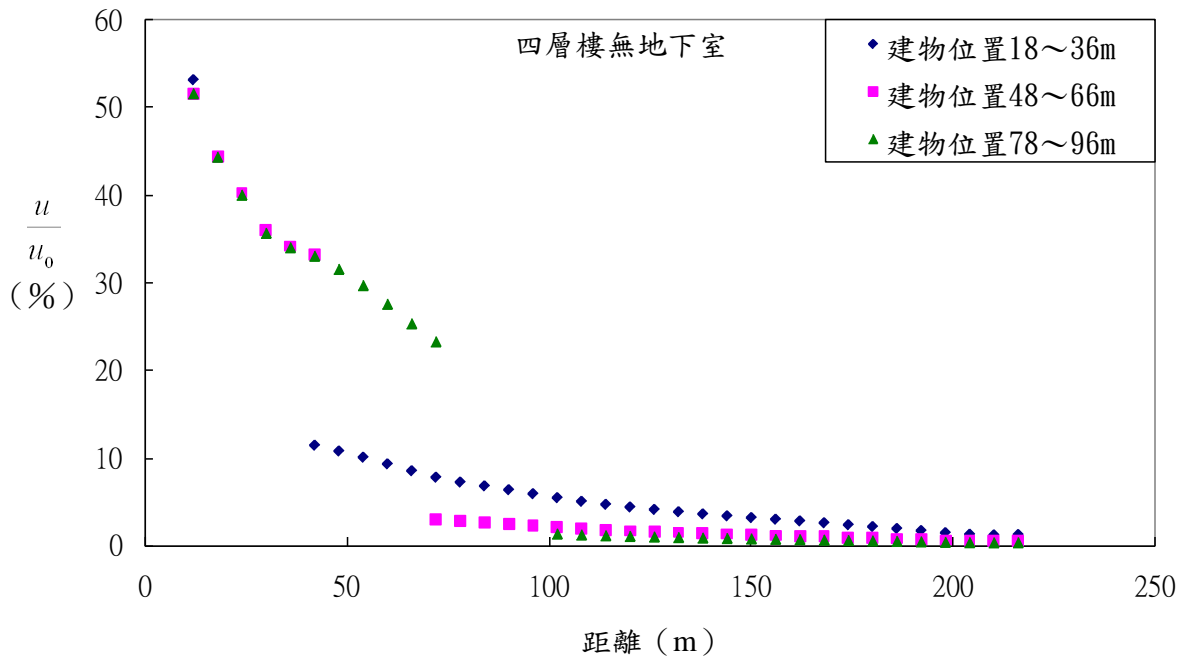


圖 4.26 振源於 A 測線前，建物位置不同之 A 測線分析

