

# 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國中組 地球科學科

**探究精神獎**

030509

**減震行不行-論改變地基密度分布的減震效果**

學校名稱：臺北市立敦化國民中學

作者：  國二 傅珩育  國二 陳聖文	指導老師：  劉睿荷
---------------------------------	------------------

關鍵詞：減震、數值模擬、震動實驗

## 摘要

本研究旨在利用地震波在通過介質後的干擾性質，改變建物地基密度分布以減輕地震的地表振幅。本研究中分別以自製程式進行地震波數值模擬，並利用實際地層模型進行震動實驗，驗證此構想的可行性，並找出最佳地基密度分布。

模擬程式以利用簡化的力、加速度、和質點性質的關係，進行地震波表面現象的模擬，將結果繪製成 3D 圖表觀察其地層變化，並比較出減震效果最佳的密度分布。實體模型根據實際地層資料製作，利用國家地震中心的地震機台模擬真實地震的地動情形，與程式結果比對。結果顯示與數值模擬的預測相符，在現實中也可減震。此工法可實踐在城市中，與有抗震工法相比，具有可針對大範圍減震的優點。也可與其他抗震工法互相搭配提升減震效果。

## 壹、 研究動機與目的

臺灣位於地震帶，地震減災一直都是相當重要的議題。以往的地震減災方式，大多針對建築物的耐震結構，以及地震的即時預警、前兆預測以降低地震造成的損害。有沒有一種訊號強度減弱的手段，能調配地震波到該地的震動程度呢？

理化課程八上第三章與九上第六章有提到，地震波與水波具有相似的干擾性質（比如破壞性干涉）。地震波在前進時遇到波速差異大的介質，會製造折射和反射波，如果利用人為方式改變地層介質，能不能製造具有互相破壞性干涉的地震波以減少對建物的損害？我們想到一個創新的方法--如果設計和地層特性差異很大的「地樁」，找出其擺放的最佳位置，能有效減低建築物的搖晃程度，未來就能以最低的成本改變城市中大樓的地基材質，做為都會區防震減災的手段。

在建築物興建之前，都需要先打好地基或地樁，現今也有許多案例是直接利用灌漿的方法改善地質狀況，使得建築更加穩固。本研究希望能利用地震波傳播的數值模擬，藉由更改地樁密度和排列，選取最佳減震效果的地樁空間排列，並將此地樁分佈架設在真實的地層模型中，經由震動平台實驗製造真實的地動訊號，進一步驗證我們的假說。未來可以要在建商規劃建築方法時，利用數值模擬所運算出的分布方式。適當的進行規劃，其減低該地區在地震時所會遭受到的地表晃動。

## 貳、 工作重點

1. 設計地震波行進的數值模擬程式，有效描述以平面波傳遞的相對振幅表現
2. 利用數值模擬，自動由 400 組地樁分佈，選取 10 組地樁擺設的組合能有效減低振幅
3. 設計三種不同材質地樁，將上述最佳組合實體化
4. 利用國家地震工程中心的震動平台，測試實體化的地樁組合，以驗證減震效果

## 參、 研究流程

本研究分成數值模擬和震動實驗兩大工作方向，利用數值模擬找出最有效的密度分布方式，並利用震動實驗找出實際情況的減震程度。

### 一. 數值模擬

#### (一) 參閱文獻:

1. 參閱地震波性質相關文獻，提供地震模擬程式所需資料。
2. 參閱現有抗震工法文獻，與研究構想進行比較。

#### (二) 地震模擬程式:

撰寫能模擬地震波傳遞的程式以進行數值模擬。

#### (三) 3D 圖表程式:

撰寫能將模擬結果繪製成 3D 圖表的程式方便觀察模擬結果。

#### (四) 進行地震模擬、查看模擬結果、完成模擬程式:

觀察地震模擬程式中波的傳遞結果。

#### (五) 找出最有效密度方式:

模擬不同密度分布的減震程度找出最佳分布方式。

### 二. 震動實驗

#### (一) 製作實體化地樁模型:

根據地質鑽井的岩層分層資料，製作等比例地層模型。

#### (二) 規劃實驗變因:

設計實驗中的操作、控制和應變變因。

#### (三) 設定地震機台:

了解地震機台的使用方法，並調整成需要的模式。

(四) 依密度分布放入介質:

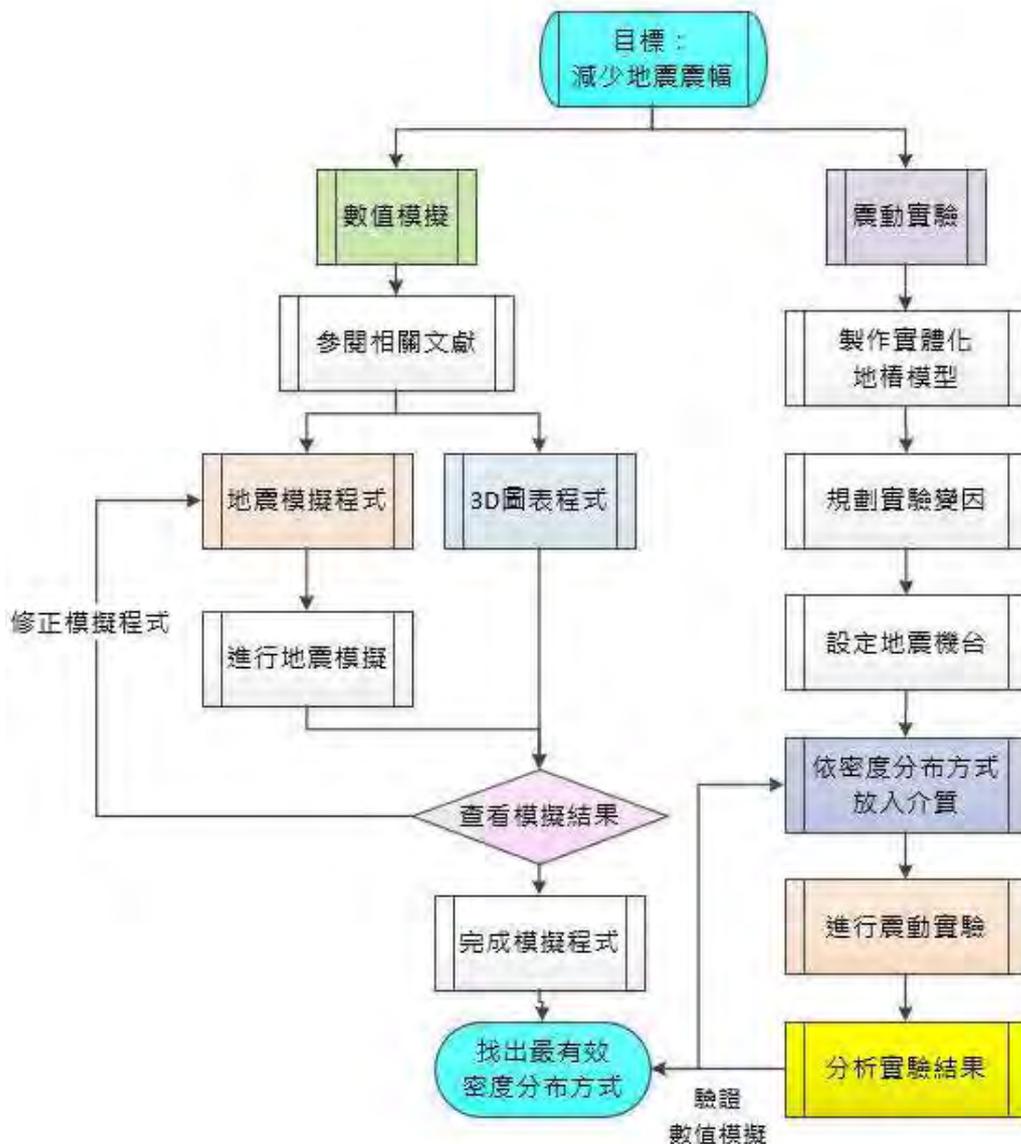
將數值模擬結果中密度分度的座標換算成模型中的位置，並在模型中埋入相對應的介質。

(五) 進行震動實驗:

利用地震機台進行地樁種類和地樁分布對減震程度影響之實驗研究。

(六) 分析實驗結果:

分析儀器記錄到的波形圖並計算減震百分比以比較結果。



圖一 本研究流程圖-

## 肆、 研究器材與設備

### 一. 數值模擬及震動實驗使用之分析軟體

Dev-C++編譯系統：撰寫數值模擬程式

Python 3.6 編譯系統：撰寫 3D 圖表程式

Excel 試算表：分析數值模擬結果並繪製波形圖及折線圖

Accelerometer：紀錄震動實驗結果

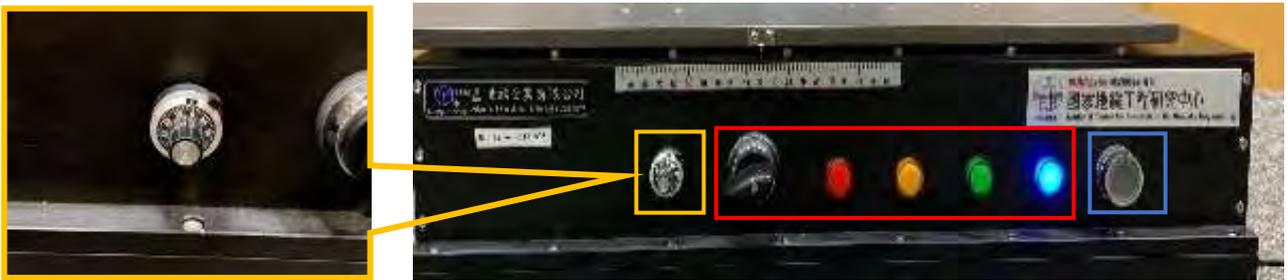
### 二. 實體化地樁模型使用之材料

		
圖二 礫石（製作模型）	圖三 砂岩（製作模型）	圖四 泥岩（製作模型）
		
圖五 木條（模擬地樁）	圖六 鋁條（模擬地樁）	圖七 鋼條（模擬地樁）
		
圖八 標準篩網	圖九 地震機臺(國震中心)	圖十 岩盤

### 三. 地震機台

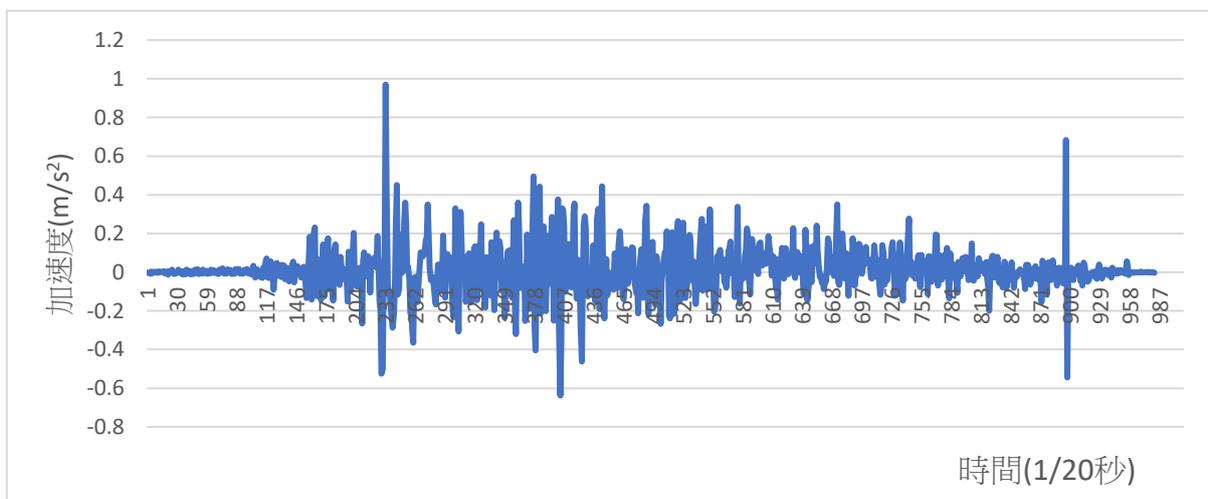
地震機台由國家地震工程研究中心所提供，此設備用來模擬不同震源、路徑、場址特性下的搖晃程度。

地震機台上方可以放置本研究所設計的地樁模型和感測儀器，下方的按鈕可以調整模擬地震的振幅、頻率和模式。啟動後，震動平台會根據設定的震動模式晃動。



圖十一 地震機台按鈕列示意圖。

按鈕列中，黃色框中的滾輪狀旋鈕為振幅調整，刻度為 0~1000，1000 是指原振幅的 1 倍，100 則為原振幅的 0.1 倍。紅色框中的旋鈕及四個燈號為模式選擇，共有低頻率固定週期震盪（紅色燈號）、高頻率固定週期震盪（橘色燈號）、集集地震（綠色燈號）和台南地震（藍色燈號）四種模式。週期震盪會根據設定的振幅左右震盪，速度有快、慢兩種。地震資料是根據台中市 [科技部中部科學工業園區管理局](#) 的地震儀所記錄到的資料中水平方向震動的方式與加速度資料(如圖十二，晃動會根據資料中的振幅、頻率進行晃動，其中振幅會是利用滾輪狀旋鈕(黃色框中)設定的倍數(例如設定為 100 時會將原來的振幅乘上 0.1 倍)。藍色框中的則為啟動按鈕。



圖十二 地震機台標準加速度資料

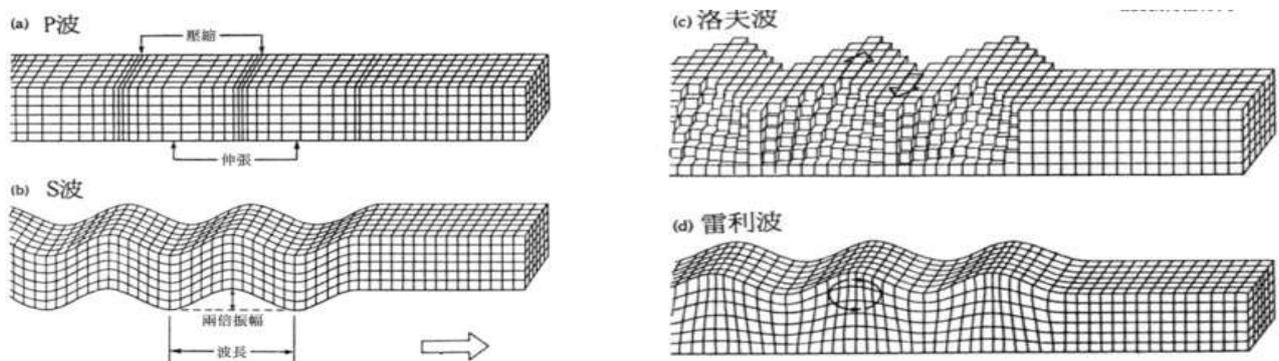
## 伍、 研究過程與結果

### 一. 文獻探討

#### (一) 探討地震波性質

##### 1. 選擇表面 / 實體波

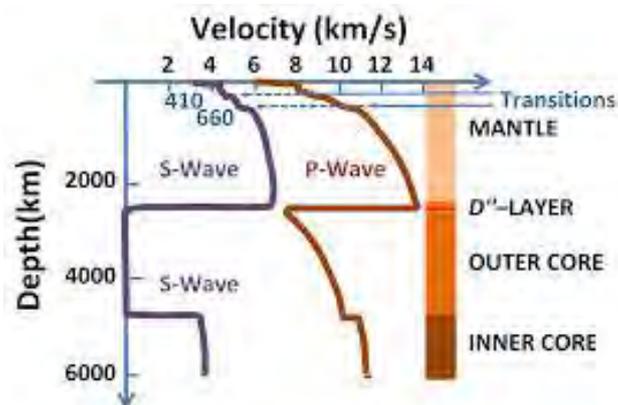
地震波依照性質的不同，大致上可分為實體波與表面波。由於表面波是沿著地球表面或岩層介面傳播，振幅隨著深度成指數衰減，其中最重要的叫做雷利波和洛夫波。實體波分成 P 和 S 波，在傳遞過程中 P 波以垂直於傳播方向的振動前進，而 S 波則以平行於傳播方向的振動前進。本研究先期的探究過程，以較容易模擬的 P 波為主。(資料來源:萬永革 著，地震學導論)



圖十三 地震波種類示意圖 (圖片來源：維基百科)

##### 2. 球面波的表面現象

P 波與 S 波皆為球面波，兩者在地球中的傳播為三度空間，然而三度空間的模擬較為困難，更需要考量不同地層中相對應的物理參數差異 (例如：波速、彈性係數等等)，易使模擬失去真實性，故此次實驗只針對**球面波的表面現象**進行模擬。



圖十四 地震波傳播示意圖。

## (二) 現有抗震工法探討

### 1. 耐震

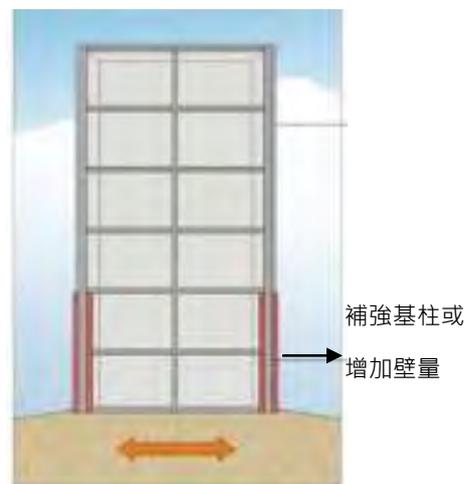
所謂的耐震,指的是建築物在最初設計規劃時,所能承受的最大力量。現行的耐震設計規範各地區的參數計算方式,須考慮建物所在地的土壤軟弱程度、斷層間距等數值加權,而結構技師則依照該數值設計出符合標準的建築結構。耐震係數愈高,建築可承受的震度就愈高,且耐震係數在最初建築設計時就已經確定,所有建築物在結構技師的規劃下,都具備基本的耐震能力。

### 2. 減震

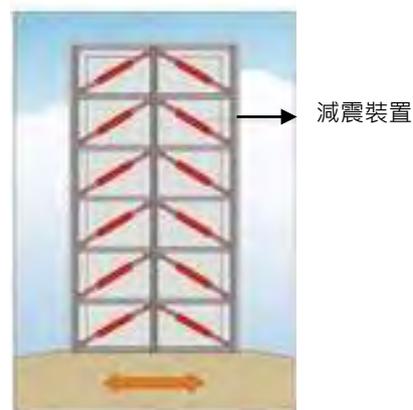
「減震」設備又稱為制震或避震器,是藉由裝置的特性形成物理抑制力,能讓建築結構本體承受較少壓力,有制震壁、阻尼器等形式。在地震來臨時會產生壓縮效能,以抵抗力來抑制搖晃時的作用力,能吸收地震部分能量,進而降低搖晃的程度,避免結構柱因變形而失去作用。

### 3. 隔震

使用隔震(免震)設備,通常會在建物1樓的樑柱頂端,或建築的結構柱底部裝設鉛心橡膠墊,在地表和建築本體結構間發揮緩衝作用,將地震波的力量轉移至可移動的隔震墊,藉由隔震墊的水平移動來抵銷上方結構的受力程度。之所以稱為「免震」,是因為該設備可隔絕60%以上的地震力,是所有設計中效果最好的一種。



圖十五 耐震設計範例



圖十六 減震設計範例圖



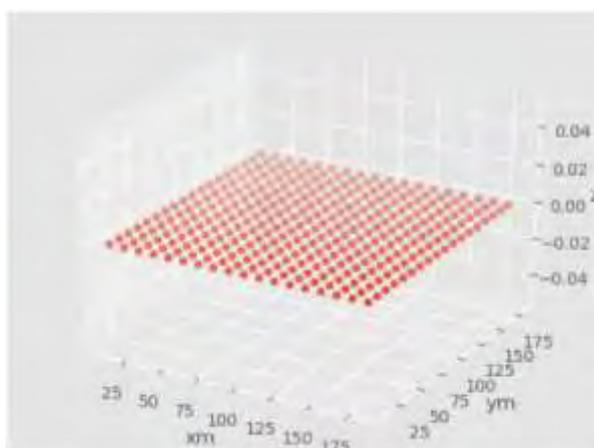
圖十七 隔震設計範例圖

(資料來源:日本株式會社 ORIMOTO 織本構造設計)(圖片來源:國家地震中心出版,認識地震工程)

## 二. 地震波傳播之數值模擬

### (一) 初始區域的空間和時間配置

受到力作用進行加速度運動時，每個質點的位置會改變，可用來描述地震波傳播隨時間空間的演化。本研究利用自行撰寫的地震波模擬程式進行 P 波傳播的能量傳遞模擬。在空間的配置，首先建立一個儲存 20\*20 格資料的陣列，陣列中每一格資料對應一個質點。質點的 x、y、z 三軸座標（位置）會隨時間而變，這樣的變化趨勢則由質點運動的加速度、傳播介質的密度和剛性係數決定。每一格質點的初始 z 座標(高度座標)為 0，而格點的水平分佈在 x 座標範圍 0~19、y 座標範圍 0~19 的正方形區域內，如圖十八所示，每個點間距為 1 單位長。



圖十八 程式中初始質點位置示意圖。

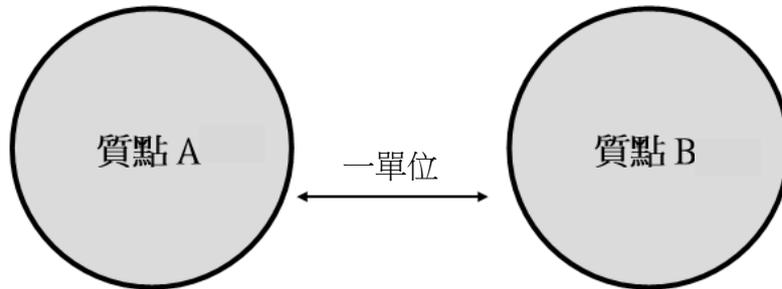
在時間的配置，則以時間 T 為初始時間，每個 0.01 的時間間隔( $\Delta t$ )進行質點位置的描述。在這裡每一個質點的初始加速度為 0 (靜止狀態)，各質點的密度、傳遞係數皆假設為 1，其為相對值，並無實際單位，其簡化公式將在下一章節描述。

```
{
    int YEEEE;
    int i, j, k, l, nnn, tx, ty, tt, tttt, [I, J];
    double p[100][100][12]; //xi yi zi xa
    double m[4][5];
    double t, T, dt, txx;
    double d=10;
    double a, f, u, r, ff;
    double s[8][2]; //temporarily use
    int det[8][2]={6, 6}, {6, 10}, {6, 14}, {1
int I, J, M, K1, K2;
double totalx, totaly, totalz;
int C;
```

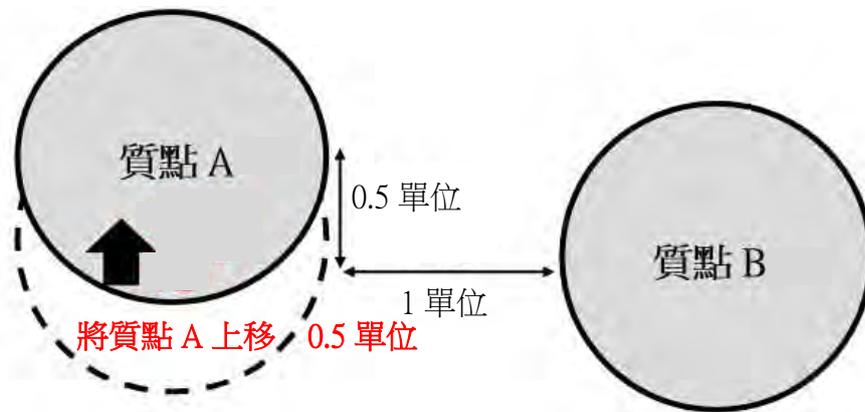
圖十九 此頁敘述對應程式碼截圖(設定初始區塊)

## (二) 質點運動演算

為描述能量在介質中，每個空間質點在不同時間的位置變化，我們接著加入質點間的互動。如圖二十到圖三十所示，質點A 受力而產生位置的變化，然而質點 B 卻無。



圖二十 程式中兩個質點初始位置示意圖。



圖二十一 因加速度擾動後，兩質點位置示意圖。虛線表現前一個時間點的位置。

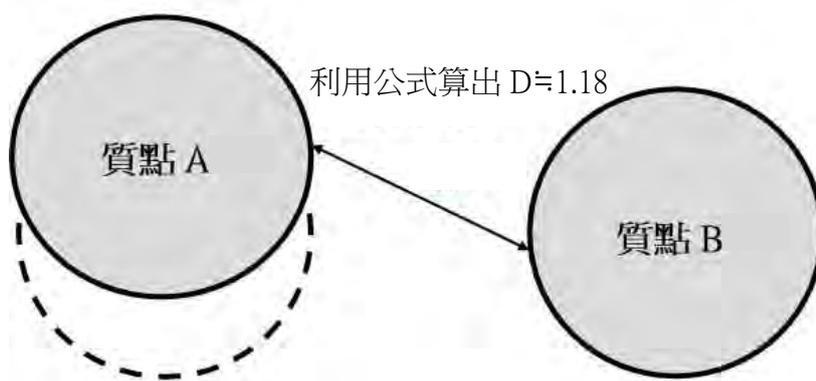
在初始時間  $T$ ，A 點與 B 點的距離可由下式的  $D_{AtoB}$  表示，式中的  $x_A, y_A, z_A$  和  $x_B, y_B, z_B$  為質點 A、B 的空間位置:

$$D_{AtoB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2}$$

```
double ab(double a)
{
    if(a<0)
        return -a;
    return a;
}

double dis(double a, double b)
{
    double c=a-b;
    return c*c;
}
```

圖二十二 此頁敘述對應程式碼截圖(運算距離)

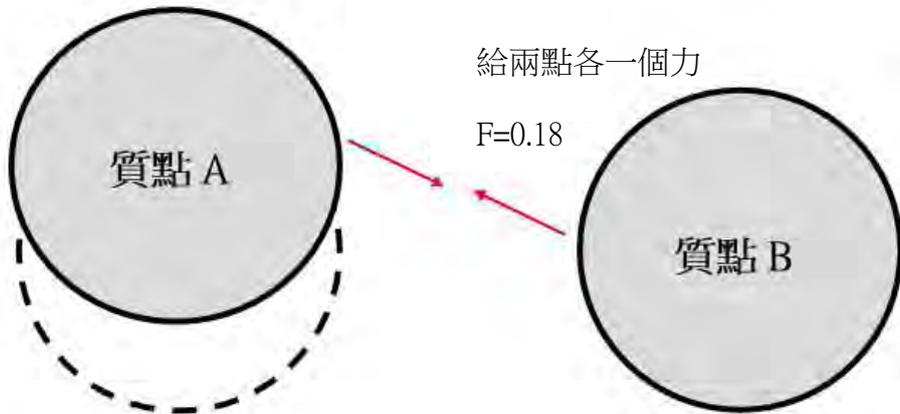


圖二十三 在程式中算出兩點距離示意圖

在模擬過程中，突然改變某一點的位置以製造能量來源，一旦兩點之間的距離改變，則製造一個作用力  $F$  (向量)，方向各是朝著對方 (圖二十四)。 $F$  的運算公式如下:

$$F = (D_T - D_0) \times k \times (1 - \mu)$$

其中  $D_T$ 、 $D_0$  分別為兩點在時間點  $T$  的距離、兩點初始的距離，此公式類似於虎克定律的公式 (彈簧公式)，如同每個質點之間都繫了一條假想的彈簧。 $k$  是我們在程式中為了方便運算加入的變數，預設是 1。 $\mu$  就是能量衰減的常數，預設為 0.01。加入  $\mu$  是為了避免程式中的能量沒有損耗。



圖二十四 質點間作用力示意圖。

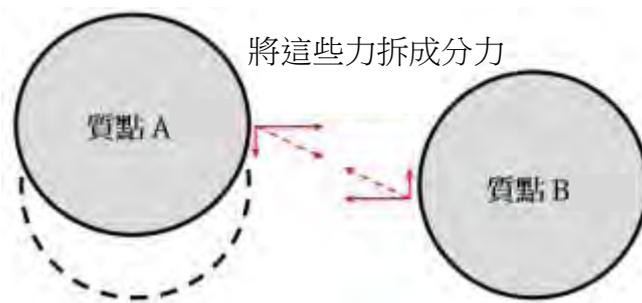
```

for (j = 1; j < 19; j++)
  for (i = 1; i < 19; i++)
  {
    for (k = 0; k < 5; k++)
    {
      l = 0;
      if (k > 2) l = 7;
      m[0][k] = p[i][j][k+l];
      m[1][k] = p[i+1][j][k+l];
      m[2][k] = p[i-1][j][k+l];
      m[3][k] = p[i][j+1][k+l];
      m[4][k] = p[i][j-1][k+l];
    }
  }

```

圖二十五 此頁敘述對應程式碼截圖(力的運算)

為了運算方便我們會將這個力 F 再分解為兩個分力（電腦比較容易直接運算與座標軸平行的力）。



圖二十六 作用力分解示意圖。

下一個時間點質點所受到的加速度，可用下列公式表現：

$$a = \frac{F}{M}$$

其中  $a$  與  $M$  分別為作用在點上的加速度與點的質量，接下來將加速度轉換為作用在質點上的速度  $v$ ：

$$v = a \times \Delta t$$

最後，將速度轉換成質點的位移(S):

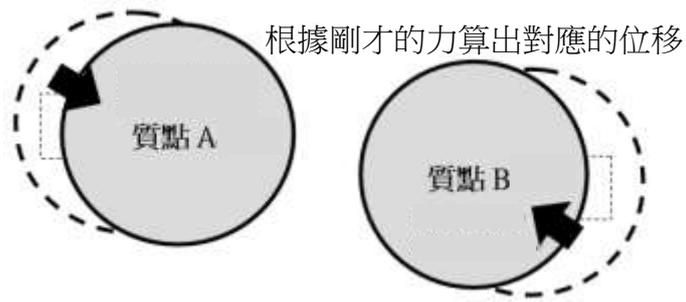
$$S = v \times \Delta t$$

為簡化運算，我們把連續的動作拆解成許多不同的時間點來運算。一般在這種利用一個時間點的加速度轉換成位移的過程中，需要將加速度積分成位移，而上述的運算過程中已經藉由以上幾個公式完成了。

```

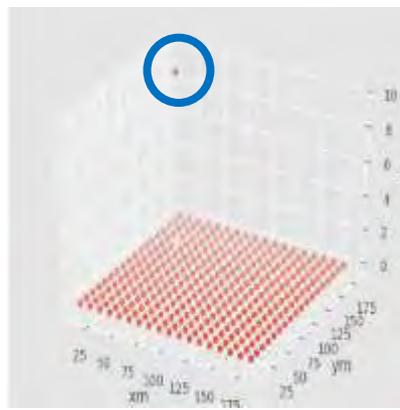
a = 0;
for (k = 0; k < 3; k++)
    a += dis (p[i][j][k], p[i + 1][j][k]);
r = sqrt (a);
a = 0;
for (k = 0; k < 3; k++)
    a += dis (p[i][j][k], p[i - 1][j][k]);
r -= sqrt (a);
f = r * m[0][3];
    
```

圖二十六 此頁敘述對應程式碼截圖(運算位移)



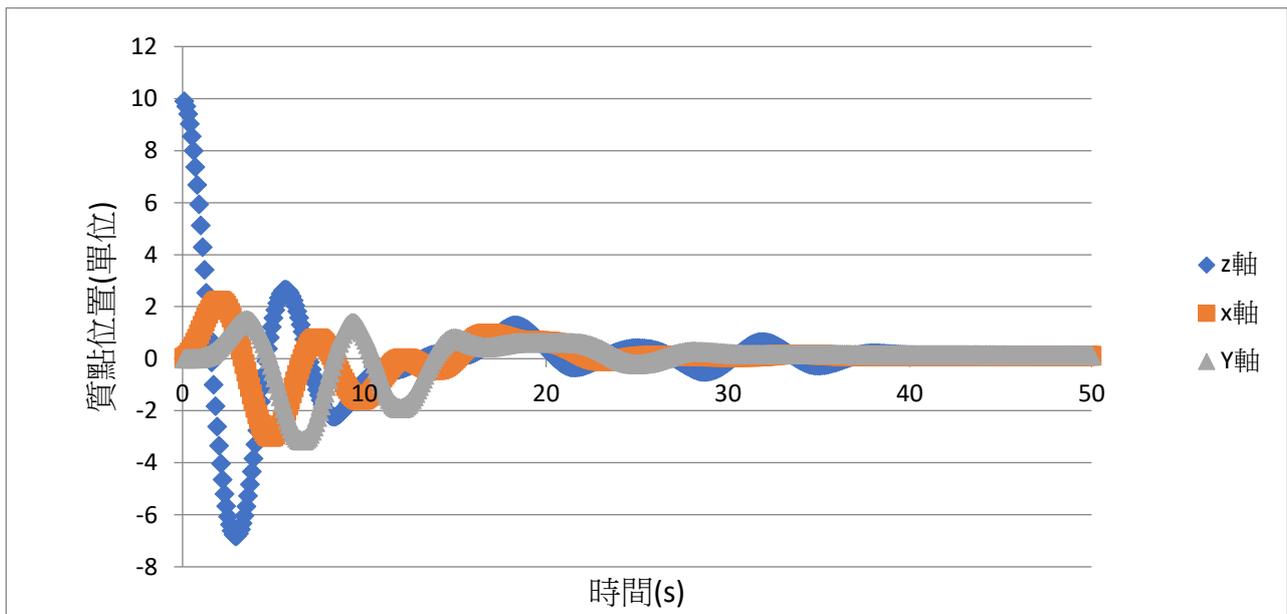
圖二十八 在程式中給予兩質點位移示意圖

對整個區域的模擬，則考慮到所有 400 個質點的時空演化。如圖二十九所示，當震源放置在  $z=8$  的位置，賦予系統一個能量擾動，將造成 400 的質點不同等級的位置變化。



圖二十九 研究區域內 400 的質點和震源( $z=8$ )的相對位置。

每個質點於是在不同的時間點，有持續的空間變化。以其中一個質點為例，圖三十表現了不同時間單一質點在三個方向上的移動。

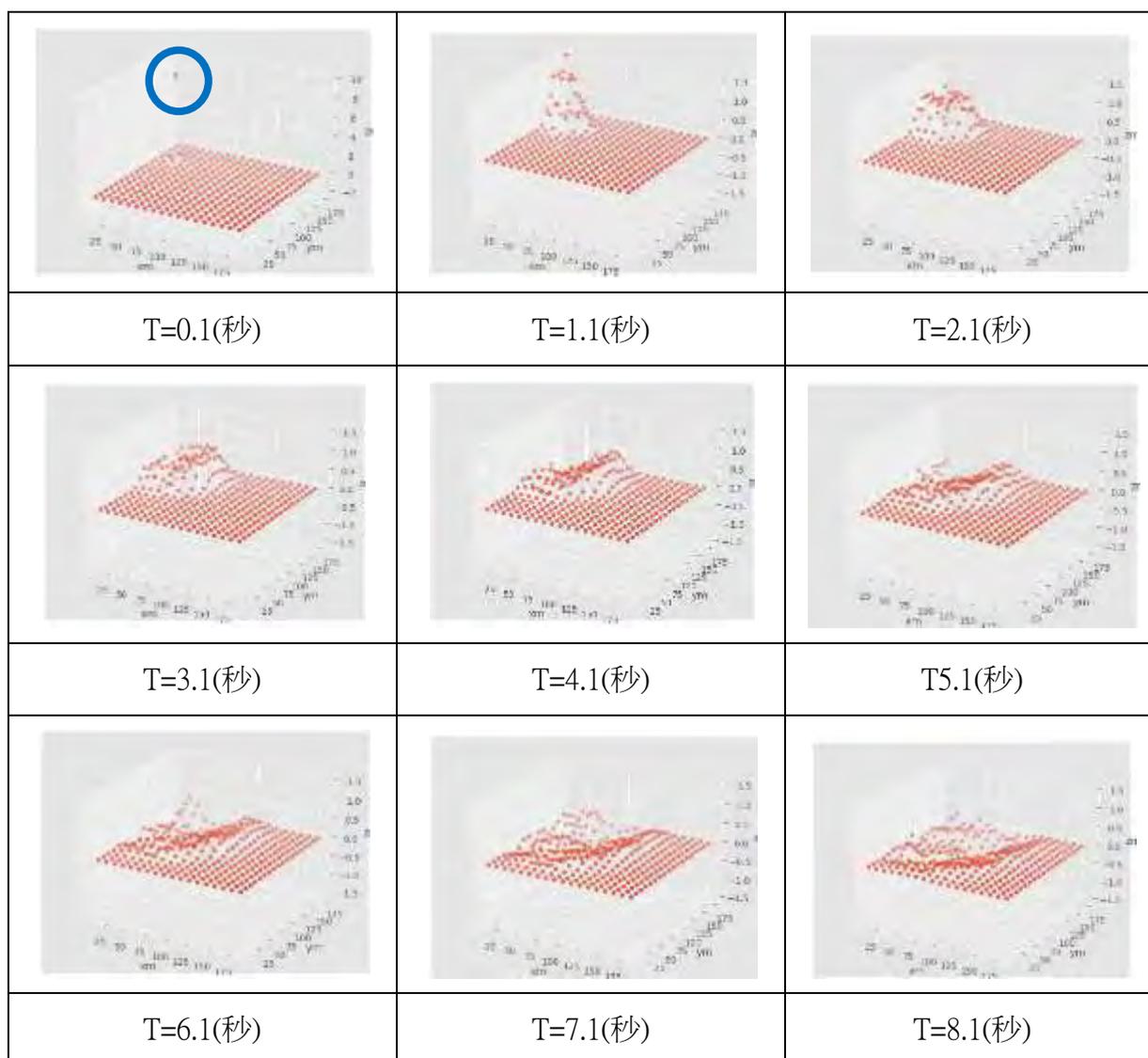


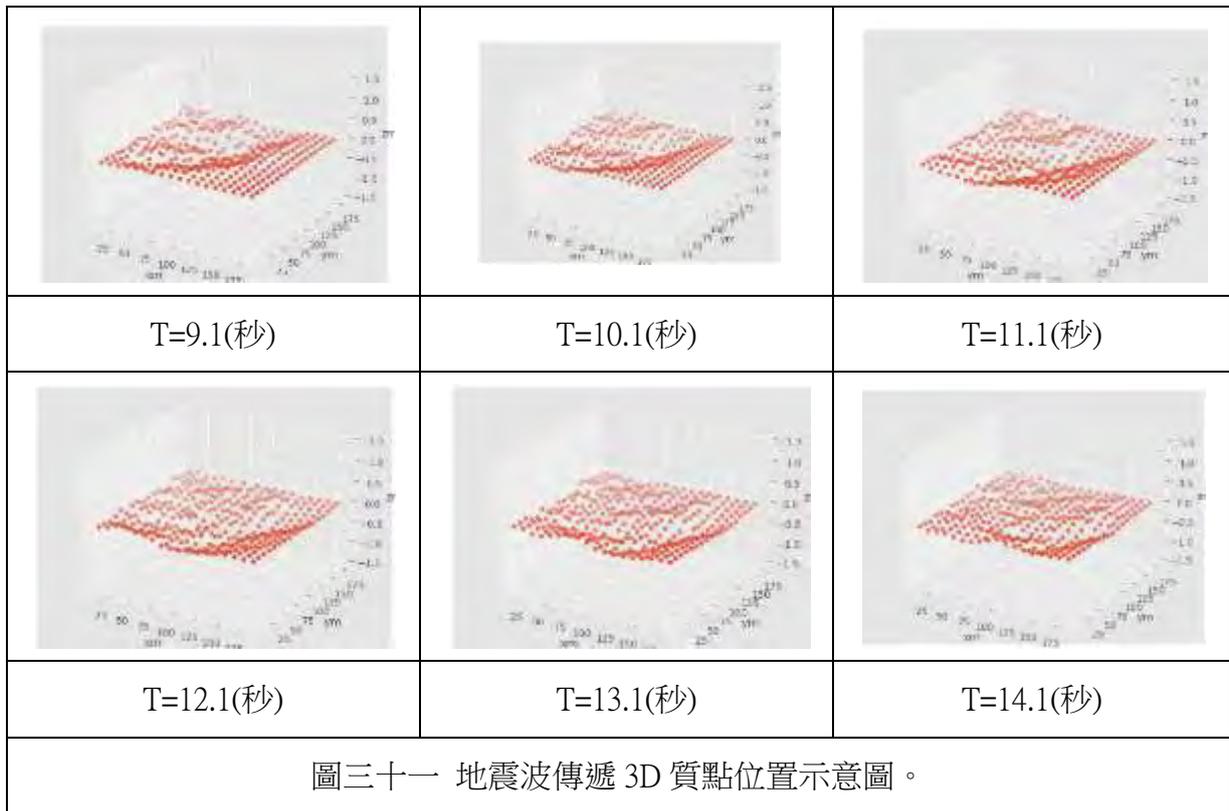
圖三十 數值模擬中單一質點在三個座標軸上的移動。

可以清楚的觀察到，程式中每個質點間距離的變化，呈現了似簡諧運動但隨時間衰減的行為。進行 400 個質點的相對位置運動時，我們的做法是，把每個點與鄰近的四個點之間的距離在每個 $\Delta t$ 都進行運算。可以在下方的圖表中看到最後的成果。

### (三) 繪製 3D 圖表

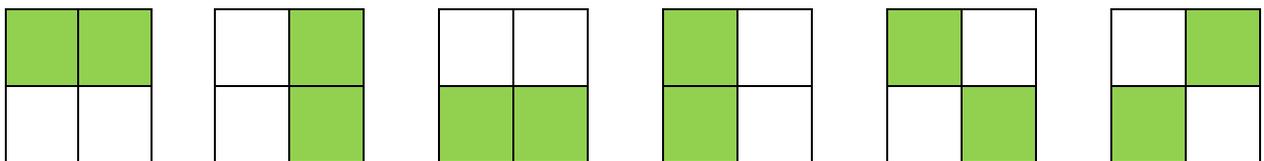
為具體表現地震波在三度空間中傳播，我們進一步利用繪圖程式，將數據中每個時間點  $T+\Delta t$  繪製出 3D 質點位置圖。如圖三十一所示，當其中一個質點產生向上的位移後，會拉扯周圍的質點，因此產生加速度，並以同心圓的方式向周圍的質點傳遞能量，同時因為能量消耗，振幅也逐漸減少。隨著地震傳播，空間質點的相對位置持續改變，對應到地表的振動情況。





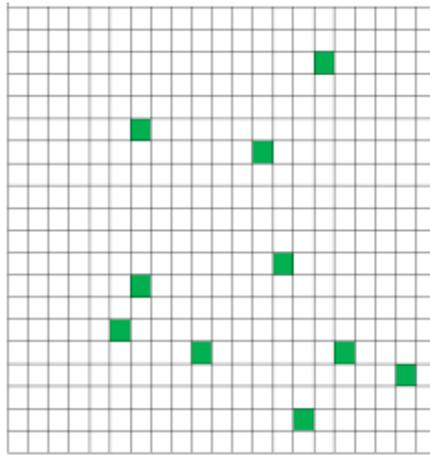
#### (四) 最佳減震效果計算

當地震波傳可以由上三步驟計算和描繪後，下一步就是要計算質點對應之密度改變時，質點振動幅度如何產生變化？能不能有效降低振福？為達到此目的，地樁的設計，就是製造比初始密度大 10 倍的數值，讓它們隨機排列在研究區域內。為節省未來的地樁成本，我們僅在 400 個質點中選擇 10 個進行密度的改變。若要在區域 2\*2 的區域中改變兩個質點的密度，實驗的排列組合會如下圖的六種。

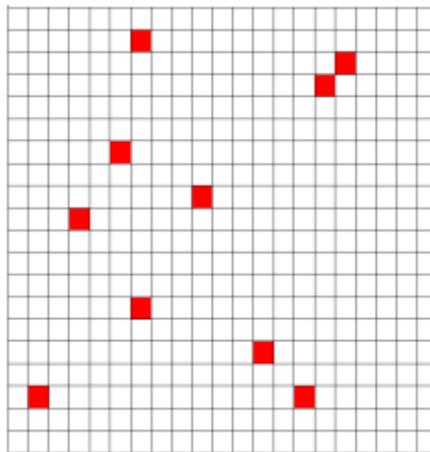


圖三十二 實驗排列

若是在 20\*20 的區域改變 10 個質點的密度，我們要求程式計算所有組合方式並刪去重疊或多餘的運算量(共有  $\frac{C_{10}^{400}}{C_5^{400}}=12154120257$ (約一百二十億組))每一個組合方式會分別來自區域上、下、左、右四個方位的地震波。最佳的減震效果如何呈現？在這裡不同排列組合下，我們計算四個震源位置在 400 個質點的三軸平均振幅。經過一百二十億次的運算實驗，平均振幅最低和最高的地樁組合，由圖三十三和三十四分別展現。



圖三十三 產生最低平均振幅的地樁分佈。綠色方塊表現了密度比周圍大十倍的質點。



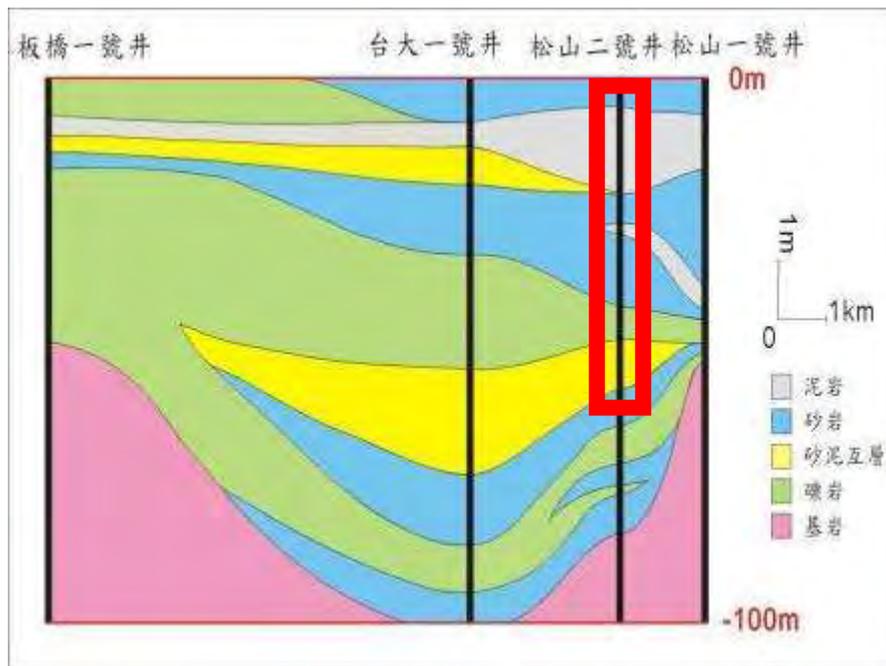
圖三十四 產生最高平均振幅的地樁分佈。紅色方塊表現了密度比周圍大十倍的質點。

### 三. 震動實驗

震動實驗數值模擬選定的地樁分佈，是否真的能有減震效果？如果能，振幅降低的幅度多大？為了回答這些問題，我們進一步製作地層模型以配置地樁，並利用震動平台進行真實的震動量測。

#### （一） 製作地層模型

為了在實際情況中進行震動實驗，我們製作了地層模型以進行實驗。地層模型是根據松山二號井地質鑽井的資料製作。資料中各岩層分布依照比例縮小至 15 cm 的高度，石材則選用與實際岩層顆粒大小相符的岩石製作。



圖三十五 台北地區地質鑽井資料(資料來源:行政院水利署)

選定的地層中共有泥岩層、砂岩層、礫岩層和泥沙交互層 4 種岩層。礫岩層選用顆粒大小為直徑 4mm 以上的礫石，砂岩層選用顆粒大小為直徑 16/1mm 到 4mm 的砂石，泥岩層選用顆粒大小為直徑 16/1mm 以下的泥沙，泥沙交互層則是砂岩和泥岩摻雜堆積。



圖三十六 礫岩



圖三十七 砂岩



圖三十八 泥岩

製作模型的方法是在 20\*20\*20 的壓克力箱中，依照岩層高度比例分別填入不同石材。



圖三十九 地層模型實品。

## (二) 設計實驗變因

### 1. 控制變因

- (1) 地震模式: 模擬集集地震時地動的加速度與振幅情形(p.6 圖十二)。
- (2) 地層模型: 地層模型固定為我們所製作的松山二號井地層模型 (圖三十九)。

### 2. 操作變因

- (1) 介質種類: 所研究的介質種類分別為三種不同密度的地樁, 依密度大到小分別為鋁條、鐵條, 和木條。
- (2) 地樁分布: 所測試的地樁分布為數值模擬中最佳地樁分布和最差地樁分布(p.18 圖三十三~三十四)。
- (3) 地震加速度: 研究的加速度為震動機台加速度的 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1 倍。

### 3. 應變變因

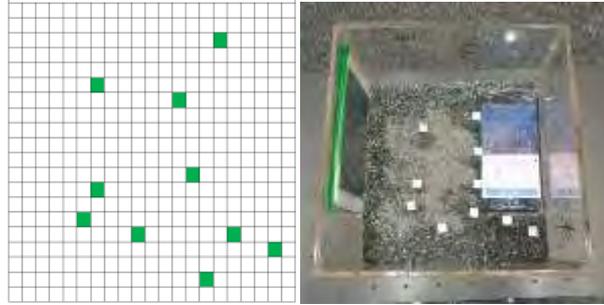
- (1) 實驗組: 實驗組為埋入介質後進行實驗時放置在模型上方的手機所記錄到的加速度。每組實驗會進行 4 次, 將每一次所記錄到的最大加速度平均就是所要的加速度數據。
- (2) 對照組: 對照組為未埋入地樁時, 將手機放置在模型上所記錄到的加速度。每組實驗會進行 4 次, 將每一次所記錄到的最大加速度平均就是所要的加速度數據。

- (3) 減震效率:  $\text{減震效率} = 1 - \frac{\text{對照組}}{\text{實驗組}} \times 100\%$

### (三) 實驗過程及結果

#### 1. 實驗方法

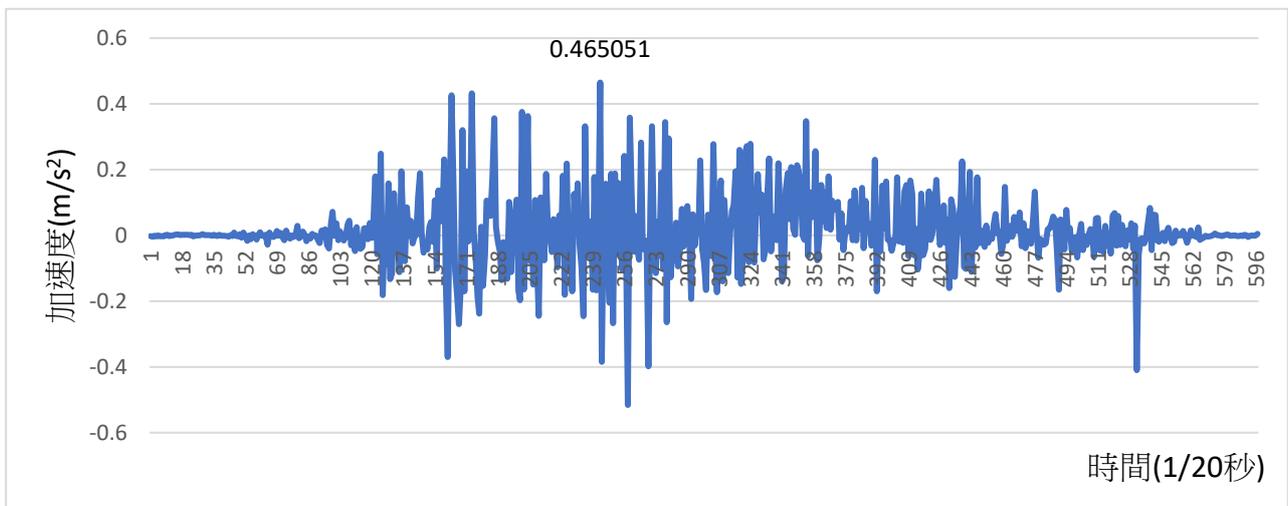
實驗組模型劃分成 20\*20 的座標軸，地樁的埋入依照數值模擬的最佳減震結果(圖四十)配置。



圖四十 地層模型中地樁放置配置圖

左圖為數值模擬的最佳減震組合(與圖三十三相同)。右圖則為真實地層模型的地裝分佈和感測器(手機)配置。

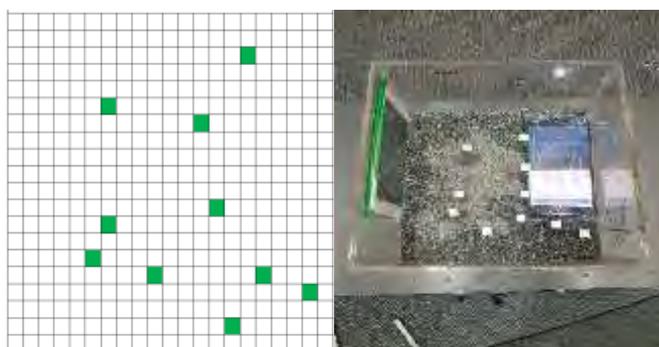
未置入任何地裝的實驗組，所得到之加速度紀錄如下圖，最大振幅約為  $0.47\text{m/s}^2$ 。



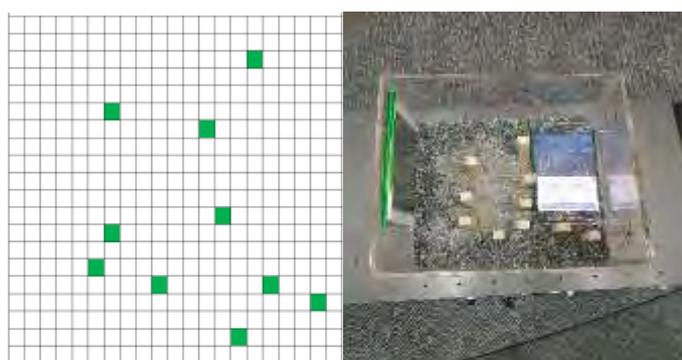
圖四十一 在實驗組(未加入地樁)的加速度紀錄圖。

## 2. 改變介質種類實驗

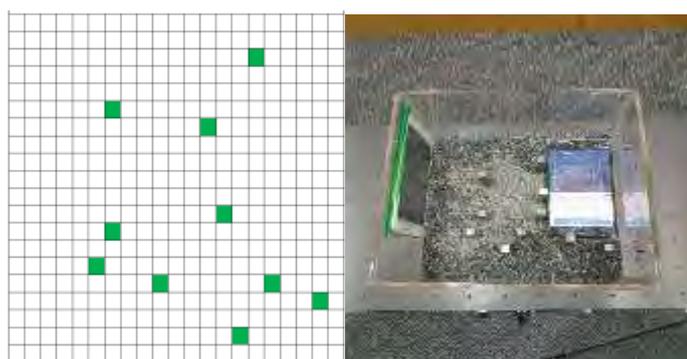
用三種不同材質的介質(鋼條、鋁條、木條)依樣擺成最佳減震的地樁分布，以比較每種材質的減震效率。



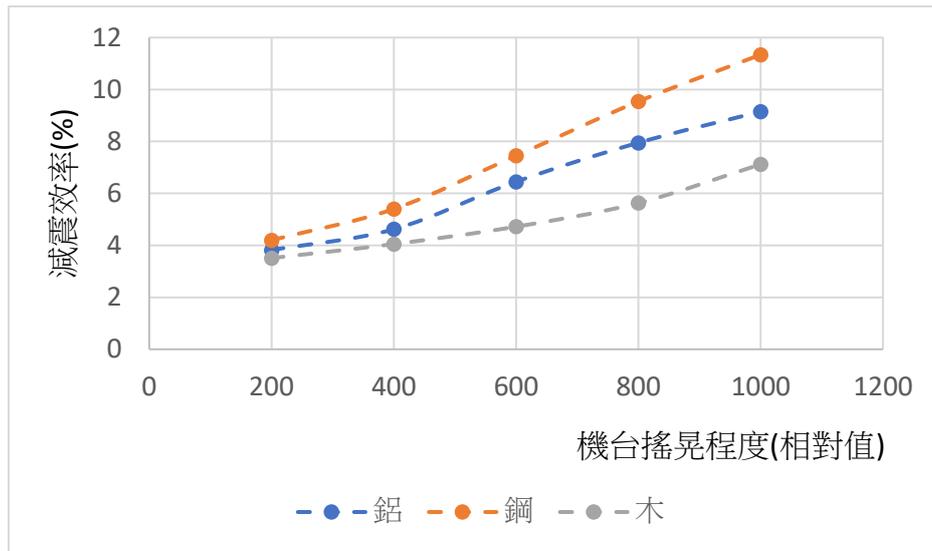
圖四十二 鋁條地樁實驗。



圖四十三 木條地樁實驗。

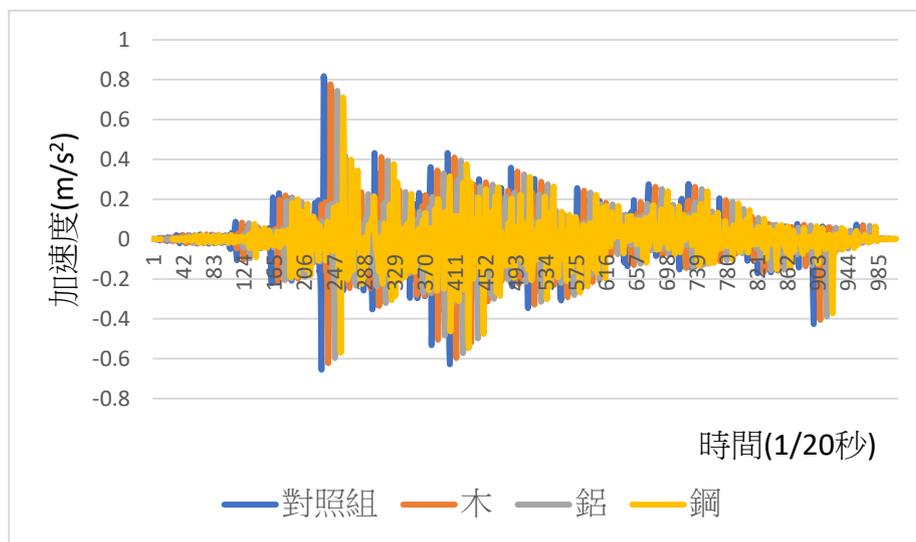


圖四十四 鋼條地樁實驗。



圖四十五 不同地樁材質的減震效率比較。

結果由圖四十五所示，在使用同樣地樁分布下，減震效率以鋼條最為顯著，當機台搖晃程度越大時，減震的百分比越大，在加速度設定為一倍時減震效率達 12%。木條則具有最低的減震效率，即便如果仍然比沒有配置地樁時振幅減低了 5%。

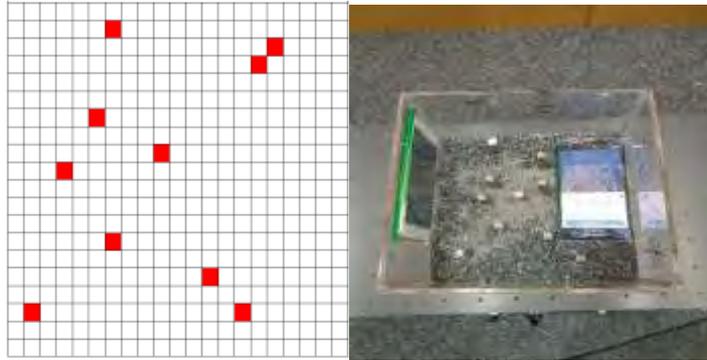


圖四十六 加速度紀錄圖比較圖，不同顏色代表不同的地樁材質。

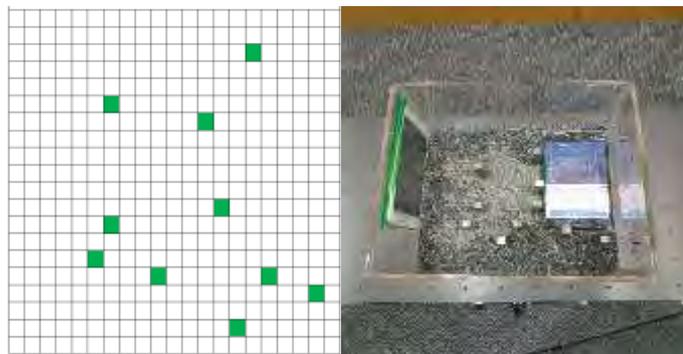
圖四十六是將四次實驗記錄疊在一起的結果，為了方便比較將每次資料稍微排開。可以看到雖然本身的搖晃情形跟波的頻率並沒有改變，在配置地樁後振幅卻有顯著的降低。

### 3. 改變地樁分布

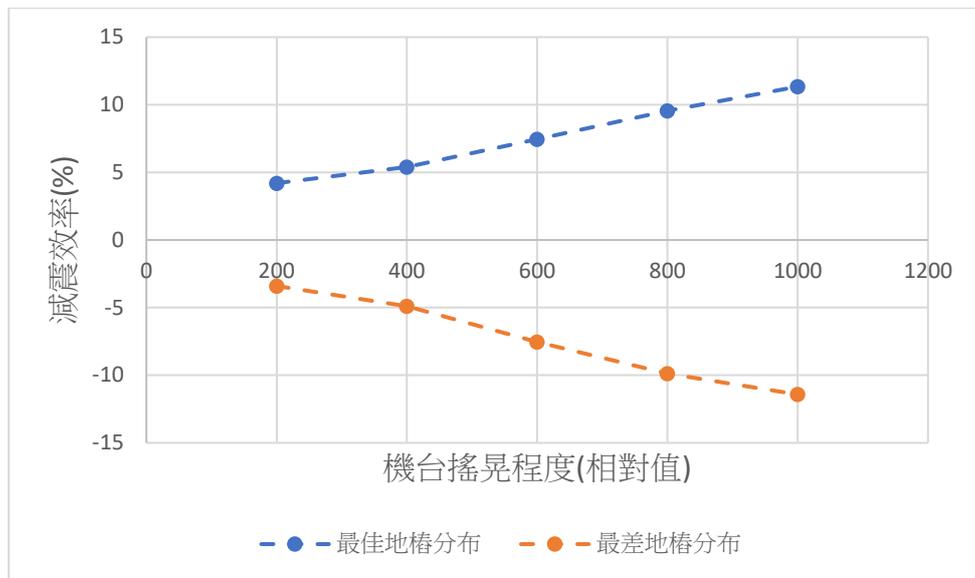
若將數值模擬中最佳和最差減震效率的配置，套入真實地層模型進行加速度圖的模擬，s 能否得到一樣的結論？為驗證此點，我們使用圖四十中減震效率最好的鋼條套用到地層模型中，進行震動實驗並用手機紀錄加速度波形。



圖四十七 最差減震效果的數值模擬結果（左，和圖三十三相同）和對應的地層模型配置（右）。

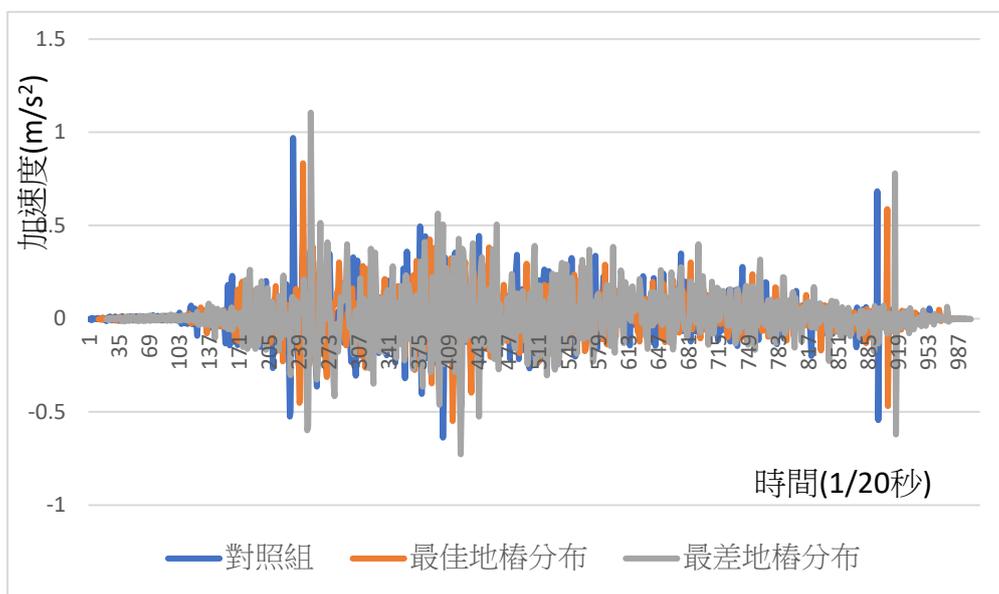


圖四十八 最佳減震效果的數值模擬結果（左，和圖三十四相同）和對應的地層模型配置（右）。



圖四十九 不同地樁分布方法的減震效率比較圖。

結果顯示，數值模擬結果中最能有效減震的地樁配置，在實際震動平台的加速度更低，因此減震效率較高，相對的，數值模擬結果中最不能減震的地樁配置，在實際震動平台的加速度反而更高，因此減震效率為負值。



圖五十 加速度紀錄圖比較圖，不同顏色代表不同的地樁分布。

將上兩種不同的實驗結果疊在一起與對照組（未配置地樁）相比，可看到與數值模擬結果一致的趨勢，亦即，能不能減少振幅高度取決於地樁的配置，配置方法可以經由數值模擬的方式進行設計和規劃。

## 陸、 討論

### 一、數值模擬過程中的限制和問題

#### (一) 以 0.1 秒為時間間隔是否會影響模擬結果?

以離散的方式描述連續動作，是必要的過程。這種方法與現實狀況的差距，就是會損失在每單位時間之間的區域的資料。選取更短的時間間隔，增加了時間精度，同時也增加了運算時間，以擷取最高振幅為目的時，更高的時間解析度能達到更精準的測量，然而為了節省龐大運算時間，我們以取樣率一秒十點初步模擬地震波訊號的樣貌，這個取樣率等同於早期台灣地震儀的取樣率。

#### (二) 程式中的密度、位移等數據都是相對值，是否會影響模擬結果?

在程式中密度、位移、與其他各項係數都是相對值，沒有實際的單位。考慮到數值模擬的目的，是在比較不同排列組合的地樁分佈可以得到較低的質點位移，並非完整和精確描繪波傳遞的過程，質點間的距離或是密度改變，雖然會影響波傳遞的過程，但是各種分布方法所能減震的趨勢依然不變，為了確認這件事，我們曾試過將改變密度與距離的數值，發現趨勢不變。

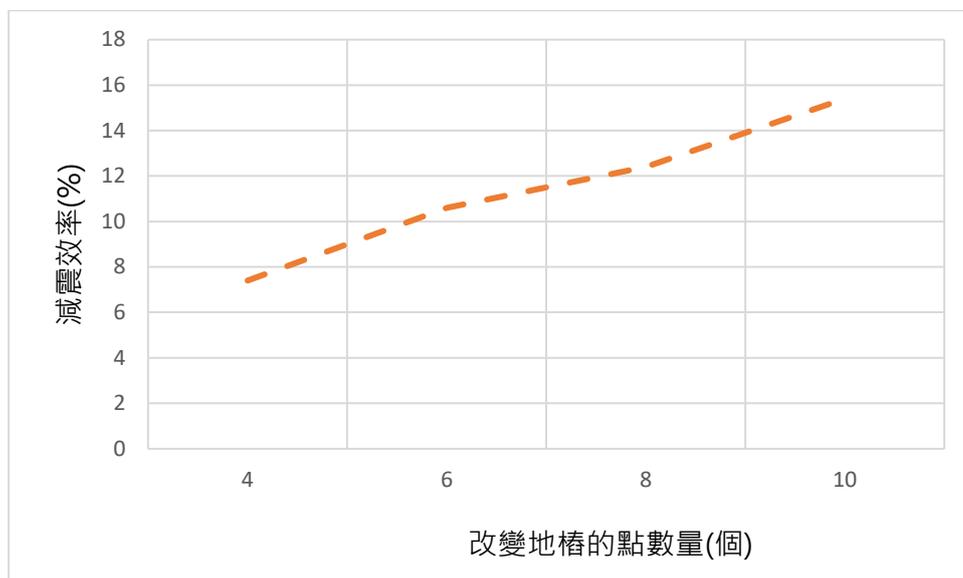
### 二、實體地層模型的限制和問題

#### (一) 地層模型與埋入地樁的比例與實際情況是如何換算?

地層模型與真實鑽井資料以比例尺 1:400 換算，原深度 60 公尺的地層，換算成模型中高度為 15 公分。長與寬從原長 80 公尺\*80 公尺換算成模型中 20 公分\*20 公分。一般地基深度約為深度為 20 公尺左右深，因此在模型中將介質插入約 5 公分深度。但就如同前一個討論所提到的，整個模型無論是數十公分或數十公里，都不會影響地樁分布方法所能減震的趨勢。然而質點間的空間間隔會和真實地震波傳遞的波長有關，而地樁的深度和震源位置亦有關，這個部分在設計模擬和震動實驗可以在未來進一步考慮。

## (二) 地樁的數目是否會影響減震結果?

我們嘗試過在數值模擬中，用 4 個、6 個、及 8 個地樁取代本研究的 10 個地樁，以尋找最佳減震組合。他們分別的減震效率如下圖所示：



圖五十一 改變密度的點個數與程式中減震效率關係圖

我們發現，改變的質點更多，減震效率將會更高，直到達到最完美的分布方法(與數量)。這說明嘗試更多的地樁數，可能會更有效減震，這在未來研究可以進一步測試。

## 三、本研究與其他工法比較

### (一) 是否有其他工法無法達到的優勢?

現有的地震工法都只能將範圍侷限在單一建築物內。台灣又有許多的老舊建築並不符合當地應有的標準，也無法即時更新。若使用此種自創工法，將可以在不更新建築的情況下降低地震的災害，進行區域型減震。此種工法也可以與其他工法互相搭配，先利用此種工法減輕地表所遭遇到的振幅，再配合其他工法在減築物內部減低地震的危害。

#### 四、未來改進方向

##### (一) 加強程式運算效率

目前只能在 400 個點中改變十個點的密度，是礙於程式效率的限制。將來可以再試著觀察地樁分布方式的規律，更加簡化運算的次數。將可以讓我們增加地樁數目，找到更加完美的地樁分布方式。

我們在優化程式的效率之後，也可以再嘗試擴大區域範圍。若將一棟大樓當作一個質點的大小，400 個質點大約可以涵蓋數個街區的範圍。未來可以嘗試將規模擴大到整個分區，甚至整個程式。在更大的規模下減震。

##### (二) 根據特定地點設計最佳地樁分布方法

未來可以將程式中的質點與現實中的街道重疊，將程式中的密度資料用當地的土質密度代替。將可以興建大樓的地方作為程式中可以更改資料的質點，此舉不但可以降低程式的運算量，也可以讓建商在規劃時能為該地區訂出該地區最佳的分布方法。

## 柒、 結論

- 一. 本研究利用簡化的力、加速度、和質點位置改變的關係，設計能模擬地面震動情況的球面波傳播程式。利用 400 個質點的空間位置隨時間空間的演化，我們嘗試選取 10 個密度大十倍的地樁，計算約一百二十億組排列組合得到「位置變動最小」的地樁組合。
- 二. 為了驗證數值模擬所得之地樁組合，可以得到最佳的減震效果，我們進一步利用真實的地層模型（地下介質），在震動機台製造不同的搖晃程度（震源），經由手機(感測器)紀錄加速度的表現。經由震動實驗，證實了數值模擬的「最佳」地樁配置，確實能得到最低的平均振幅（最佳減振效果），而數值模擬的「最差」地樁配置，也確實製造了比「未擺設地樁」更大的振幅。
- 三. 當地樁的密度被改變，減震效率有顯著的差異。鋼條對應的減震效率最佳，而木條則最差。而給予的震動幅度越大，減震效率越顯著。
- 四. 經由震動機台實驗，我們方能得出更趨近於真實地動情況的震動表現。利用簡單的地層模型，我們發現地樁的配置確實能減低振幅到 4-12%，這一點證明數值模擬的最佳地樁排列組合，具有參考價值。未來可以利用相同的方法，進一步討論 S 波的減震效果，期待能將地樁設計實際運用在地基構造的設計，以成本最低且效用最高的方式減少地震對建築物的損害。

## 捌、 參考資料

1. 萬永革 (2016) · 地震學導論 · 科學出版社。
2. 岡本舜三 (1998) · 地震工程學 · 國立台灣大學工學院地震工程研究中心。
3. 國家地震中心(2012) · 認識地震工程:有個安全的家 · 國立台灣大學工學院地震工程研究中心。
4. Stroustrup , Bjarne (2013). The C Programming Language. Addison-Wesley Professional.
5. Vanderplas, Jake (2016). Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working With Data. O'Reilly & Associates Inc.
6. Evan Wallance (1986). WebGL Water. Retrieved July 8, 2014, from <http://madebyevan.com/webgl-water/>

## 【評語】 030509

本研究旨在利用地震波在通過介質後的干擾性質，改變建物地基密度分布以減輕地震的地表振幅。研究中分別以自撰程式進行地震波數值模擬，並利用實際地層模型進行震動實驗，驗證此構想的可行性，並找出最佳地基密度分布，雖為簡化模型，作者具有電腦應用特長，對模擬程式熟悉度不錯。不過模型過於簡化，應用尚有困難。可加入考慮場址效應。

# 摘要

本研究旨在利用自行設計的地震波傳遞模擬程式，探討平面波的傳遞。經由密度較大的地樁設計，了解地樁分佈的設置如何影響地表的振幅。實驗發現400取10的地樁設計，可以有效減震達15%。進一步利用實際地層模型進行震動實驗，運用數值模擬所得到的理想之減震地樁分佈，以手機的加速度計測量並記錄振動波形，我們發現振幅減少的程度與數值模擬結果非常一致，證明密度迥異的地樁分佈，可以有效減低地表的振動幅度。

## 壹、研究動機

臺灣以往的地震減災方式，大多針對建築物的耐震結構和地震的即時預警，以降低地震造成的損害。地震波與水波具有相似的干擾性質，在前進時遇到波速差異大的介質會產生折射和反射波，因此我們想到一個創新的方法，如果設計和地層特性差異很大的「地樁」，找出其設置的最佳位置，未來就能以最低的成本改變建築物的地基材質與分佈，做為都會區防震減災的手段。

## 貳、研究目的

- 地震波傳播之數值模擬：哪種地樁分佈下，會有最小的振幅？
  - 自行設計地震波傳播的數值模擬程式，以有效描述平面波的傳遞
  - 利用數值模擬，找出最能有效減震的地樁分佈方法
- 實體模型之震動量測：數值模擬得到之地樁組合，在實體模型中能否達到降低振幅效果？
  - 設計不同材質的地樁，將上述最佳地樁組合實體化
  - 利用國家地震工程中心的地震機台，進行震動實驗，以驗證數值模擬結果

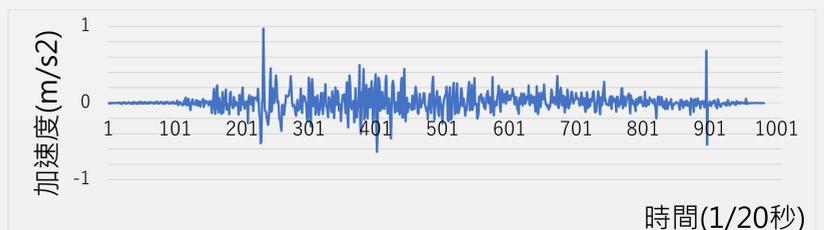
## 參、研究設備與器材

- 分析軟體: Dev-C++、Python 3.6、Excel 試算表、Accelerometer
- 地層模型材料: 礫岩、砂岩、泥岩、標準篩網、木條、鋁條、鋼條
- 地震機台: 用來模擬真實地震的搖晃。地震資料根據地震儀所記錄到的資料中水平方向震動的資料進行震動模擬 (圖一)



圖一 國家地震工程中心的地震機台。

振幅調整鈕(黃色框) 刻度為0~1000  
1000是指原振幅(圖二)的1倍。  
共有數種不同振動方式可供選擇



圖二 手機所記錄到的加速度圖。

- 地層模型: 為了使實驗情形符合台北盆地下方之地層柱，製作了地層模型以進行實驗 (圖三)。在地層模型中置入不同密度的地樁 (圖四)，利用加速度計記錄地層模型所受到的加速度。



圖三 地層模型側視圖。

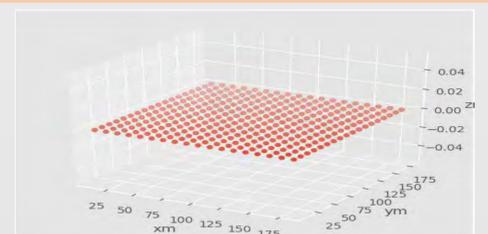


圖四 將地層模型置入地樁之俯視圖。

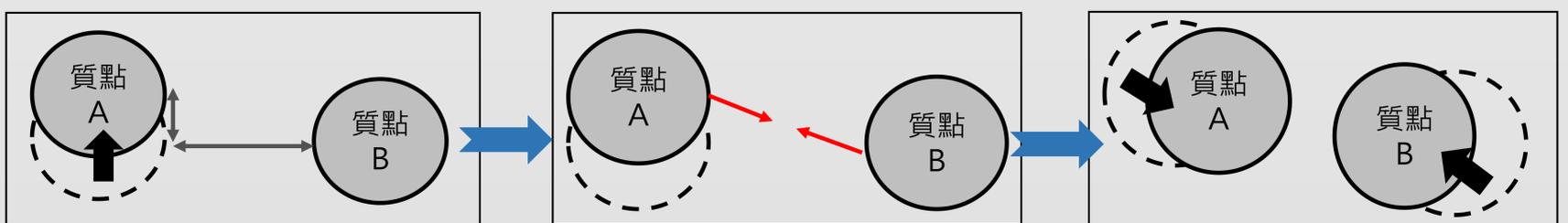
## 肆、研究過程與結果

### 一、1-1 數值模擬: 運算質點運動

- 建立一個20×20共四百格的資料區域，每一格資料對應一個質點(圖五)，而質點間距離為1個單位。質點在不同時間的位置變化由外力F及兩點間的互動決定：



圖五 程式中質點分佈示意圖



圖六 質點運動示意圖。(a) 計算質點間距離 (b) 計算出力並轉換成速度 (c) 將速度轉換為位移。

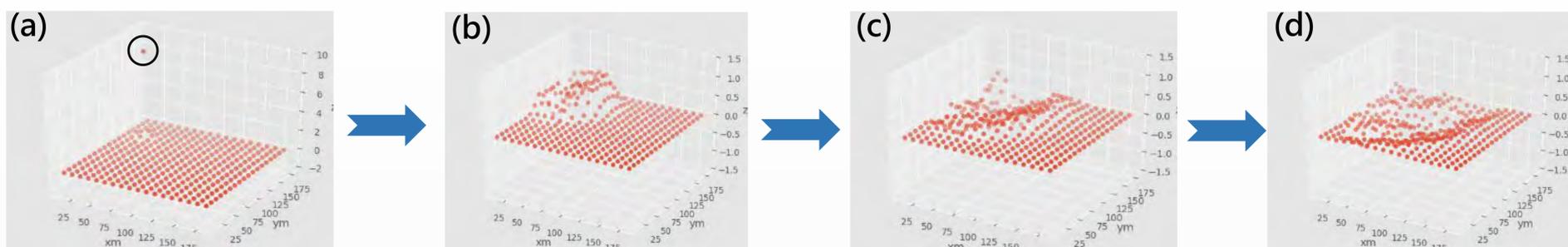
在比較質點距離後以公式  
 $F = (D_T - D_0) \times k \times (1 - \mu)$   
算出力 ( F ) 並將其作用於質點

將a部分中算出的力除以質點質量  
轉換為加速度，再乘以單位時間轉  
換成速度。圖中的箭頭表示利用公  
式算出的力。

將b部分中算出的速度乘上單位  
時間轉換成位移

- 在不同的時間間隔，以上過程會重複進行。

## 1-2 數值模擬: 質點運動3D示意圖

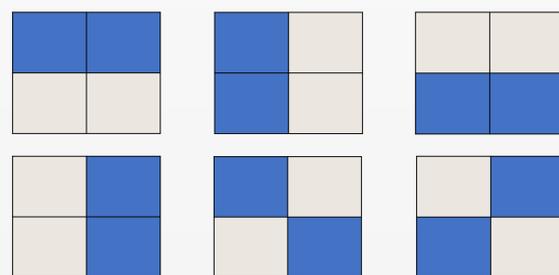


圖七 施予力源下不同時間的質點運動示意圖。

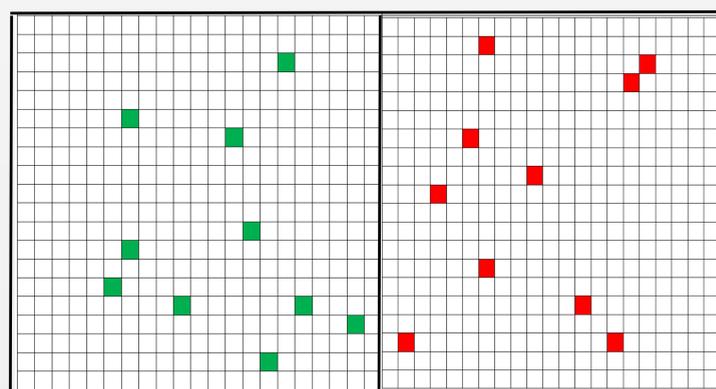
1. 繪製3D圖表以呈現數值模擬結果。
2. 如圖七(a)所示，給定的震源在圓圈標示處，造成此質點的向上位移，拉扯周圍的質點並繼續傳遞能量。
3. 這樣的計算描述了地震波傳播過程中，空間中質點的相對位置如何改變。
4. 可以發現震動會漸漸趨於平緩，代表波的傳播過程中能量的衰減。

## 1-3 數值模擬: 設計地樁分佈

1. 程式的400個質點中，取其中十個質點增加密度（比周圍密度大十倍），以模擬地樁。
2. 計算所有可能的組合方式並刪去重疊或多餘的運算量。
3. 圖八說明在2x2的區域中，改變兩個點的密度會有六種可能的組合，同理在20 x 20的區域中改變十個點有約120億種可能的排列組合。
4. 每一個組合方式分別以來自上、下、左、右四個方向的地震波進行測試。
5. 比較在不同排列組合下，上述四個不同震源位置在400個質點的x,y,z三軸平均振幅。
6. 比較所有結果後，選出平均振幅最低的地樁分佈組合做為「最佳地樁分佈」(圖九); 平均振幅最高者做為「最差地樁分佈」(圖十)。



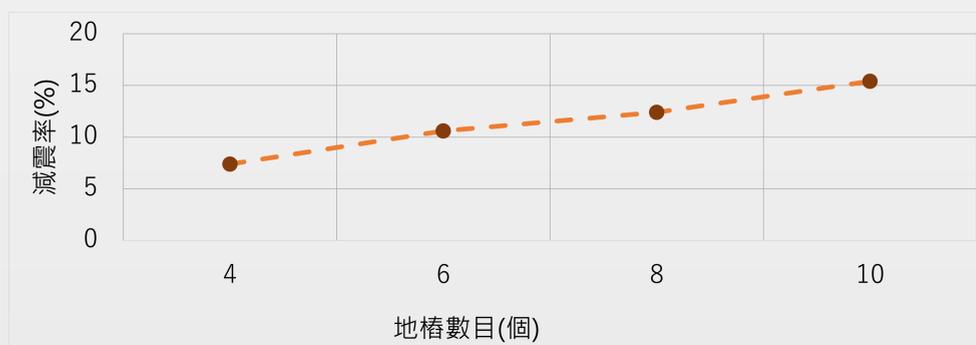
圖八 地樁排列組合示意圖。



圖九 最佳地樁分佈排列。 圖十 最差地樁分佈排列。

## 1-4 數值模擬: 更改地樁數量

1. 為瞭解不同地樁數量的設計與減震效果的關聯，用4個、6個、及8個地樁取代本研究的10個地樁，並尋找最佳減震組合。
2. 圖十一顯示地樁數越多，減震效果愈佳，未來可增加地樁數目（更龐大的運算量）以進一步量化減震效果與地樁數目的具體關係。



圖十一 地樁數目與減震效果之關係圖。

## 二、2-1 震動實驗: 實驗進行方法

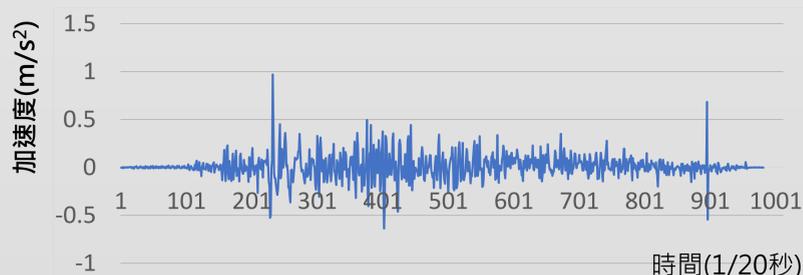
1. 將木、鋁、鋼三種地樁利用數值模擬中的地樁分佈，埋入地層模型中（圖十二），代表數值模擬中改變密度的點，以驗證數值模擬減震效果是否能實際運用
2. 利用震動平台進行震動模擬（圖十三），並在地層模型中埋入加速度計進行震動的量測（圖十四）。
3. 實驗組為埋入地樁後進行實驗所記錄到的加速度。
4. 對照組為未埋入地樁時進行實驗所記錄到的加速度。
5. 減震率的運算方式如下：

$$\text{減震率} = 1 - \frac{\text{實驗組}}{\text{對照組}} \times 100\%$$



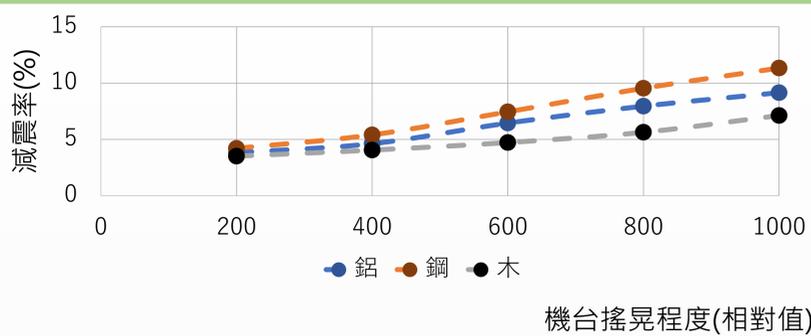
圖十二 埋入介質示意圖。

圖十三 實驗示意圖。

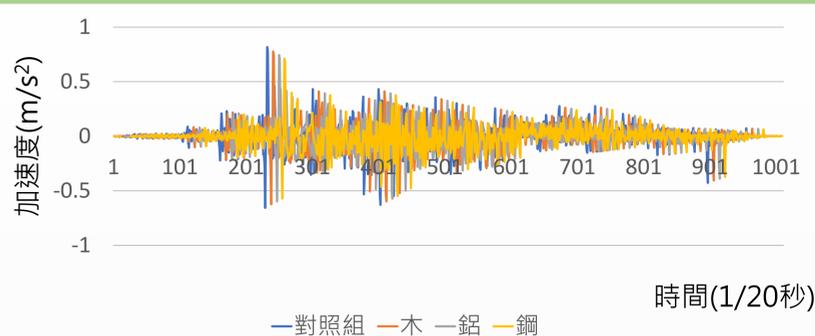


圖十四 對照組加速度資料（空白實驗）。

## 2-2 震動實驗: 改變地樁種類實驗



圖十五 不同地樁種類減震率比較圖。



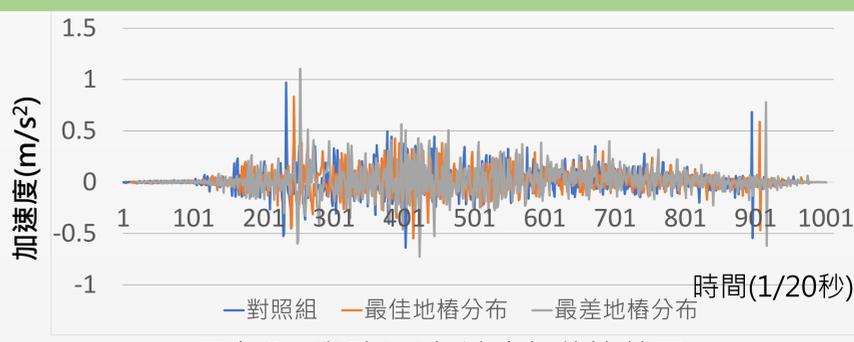
圖十六 實驗2-2加速度記錄比較圖。

1. 將三種不同材質的地樁(木條、鋁條、鋼條)，依數值模擬中最能有效減震的地樁分布擺設在地層模型中，以比較每種材質在最佳地樁分佈時的減震率。
2. 圖十五顯示減震率以鋼條最為顯著，當機台搖晃程度越大時，減震率也越大，在振幅設定為一倍時減震率達12%。
3. 圖十六為實驗所記錄到的加速度經重疊後的比較圖。可以發現實驗組的振幅比對照組小，但振動的頻率與波形並沒有改變。

## 2-3 震動實驗: 改變地樁分佈方法實驗



圖十七 不同地樁分佈方法減震率比較圖。



圖十八 實驗2-3加速度記錄比較圖。

1. 以實驗2-2中減震效果最佳的鋼條依數值模擬中的最佳及最差地樁分佈，設置在地層模型中，以比較減震率。
2. 震動實驗的結果(圖十六)顯示，最佳及最差地樁分佈方法的結果皆符合數值模擬的運算結果。

## 伍、討論

- 一、在數值模擬中需要以離散的方式描述連續的動作。為了使程式達到最高的效率並盡量不影響結果的準確性，我們以0.1秒做為每兩個時間點間隔，這也是一般模擬程式中常見的時間間隔。
- 二、在程式中的密度、距離等係數皆為相對值，沒有實際的單位。這是因為數值模擬的目的並不是要得到準確的數據，而是要找出不同地樁分佈之間減震的優劣與趨勢。而單位雖然會影響程式的模擬數值，但不會影響減震效果的優劣。
- 三、地層模型與真實鑽井資料以比例尺1:400換算。一般建築物地基約為二十公尺深，故在本研究中插入五公分深的地樁。
- 四、現有的抗震工法都只能對單一建築物達到效果，台灣又有許多的老舊建築並不符合當地應有的抗震指數，也無法即時更新。若使用此種自創工法，將可以進行區域性減震，也可以與其他工法互相搭配。

## 陸、結論

- 一、本研究利用簡化的力、加速度和質點位置改變的關係，設計能模擬地表震動情況的平面波傳播程式。
- 二、利用400個質點的空間位置隨時間的演化，我們嘗試增大其中十個質點的密度，計算約一百二十億個排列組合得到「最有效減震」的地樁組合，其減震效果達到15%。
- 三、利用實際地層模型的地樁擺設，在震動實驗的振幅表現與數值模擬預測相符，最有效減震的「最佳地樁分佈」得到最低的振幅表現，「最差地樁分佈」則得到最大的振幅。
- 四、密度最大的鋼條對應的減震效果最佳，而木條則最差。
- 五、此工法可實踐在城市中，與有抗震工法相比，具有可針對大範圍減震的優點。也可與其他抗震工法互相搭配提升減震效果。

## 柒、參考文獻與資料

國家地震中心(2012)•認識地震工程:有個安全的家•國立台灣大學工學院地震工程研究中心

Vanderplas, Jake (2016). Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working With Data. O'Reilly & Associates Inc

Stroustrup, Bjarne (2013). The C Programming Language. Addison-Wesley Professional.

Evan Wallance (1986). WebGL Water. Retrieved July 8, 2014, from <http://madebyevan.com/webgl-water/>