

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

正方型沉埋剛性基礎阻抗矩陣

之有限元素法分析

Dynamic Stiffness Matrix For Embedded  
Square Foundation By Finite Element Method

研究生：孫紀戌

指導教授：劉俊秀 博士

中華民國 九十五年 七月

# 正方型沉埋剛性基礎阻抗矩陣 之有限元素法分析

研究生：孫紀戌

指導教授：劉俊秀 教授

國立交通大學土木工程學系

## 摘 要

在土壤與結構互制效應研究中之次結構法裡，阻抗矩陣之求解就佔了極其重要之地位。故在此論文中將以有限元素程式 ABAQUS 求解正方型沉埋剛性基礎之阻抗矩陣。

因使用方法為有限元素法，故須先以解析解比對，確認模型之正確性；而有限元素法尚有精確度、所需資源等問題需要探討，故論文將以收斂性分析探討，以求得其最佳的解。

之後再以收斂性分析之結果，建立正方型沉埋剛性基礎之模型，探討沉埋對正方型剛性基礎之影響，以期能對後續土壤與結構互制效應之研究作出貢獻，或是作為未來工程設計之參考。

# Dynamic Stiffness Matrix For Embedded Square Foundation By Finite Element Method

Student : Chi-Hsu Sun

Advisor : Prof. Gin-Show Liou

Institute of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

To solve soil-structure interaction problem, finding the foundation impedance is an important part in using sub-structure technique. To find the impedance, finite element method is employed. The commercial program ABAQUS is used for the finite element method.

Firstly, we set up an ideal finite element model and analyzed it to obtain numerical solutions. Then we compared the numerical solutions with the analytical solutions in order to examine the accuracy and convergency of the finite element method.

Finally, extending the result of the convergency analysis to calculate the impedance of embedded square foundation by finite element method.

## 誌謝

打開學術的大門，邁入學術的殿堂，方知什麼才是研究。有詞道：「尋尋覓覓冷冷清清，淒淒慘慘戚戚。」而詞中開頭的兩句話，正好切中我當時的心境。初時，自己就猶如一隻第一次看到大海的井底之蛙，心中一片茫然。尤幸，能遇上恩師 劉俊秀教授，老師就有如一佇立在岸邊的燈塔，逐漸引領著我向前靠岸。而在老師悉心的指導下，終使得我能稍稍一窺研究之全貌，使我不再以管窺天、以蠡測海，而是以有系統的方式、循序漸進且謹慎的探索，走出自己的研究之路，使我獲益良多。在此，學生由衷感謝老師的慈心寬容與諄諄教誨。

同時，感謝瑜隆學長的督促與熱心，在此預祝學長能順利取得博士學位。這裡，亦要感謝柏濤學長的教導、扶持，才使得完全不懂程式的我能漸上軌道；還有治本學長的教誨、熱誠，增廣了我的人生閱歷與見聞，開拓了我的視野；以及博智學長的親切，解答了我遇到的許多困惑。

而與我共同奮鬥的同窗好友，冠杰、百成、俊銘、振峰、加地、永興和學弟信宏等，若不是你們的勉勵，我絕無法堅持至今，到完成學業。不管如何，與你們共度的時光是我感到最珍貴寶物。

在此，特別感謝上蒼賜予我麻衣，妳是我心目中的女神，有著妳的支持與鼓勵，讓我不至感到孤獨與無助，只感覺到自己是世界上最幸福的一名人類。

最後，感謝生下我的父母以及所有認識我的人，因為如果沒有你們，就沒有如今的我，謝謝！

# 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
一、序論.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 研究方法.....	3
1-3 論文內容.....	4
二、基礎阻抗矩陣與正方形表面剛性基礎解析解之介紹.....	5
2-1 基礎阻抗矩陣之介紹.....	5
2-2 正方形表面剛性基礎解析解之介紹.....	7
三、有限元素程式介紹.....	8
3-1 ABAQUS 介紹.....	8
3-2 模型建立.....	9
3-2-1 幾何形狀.....	9



3-2-2 使用元素.....	11
3-2-3 材料參數與土壤阻尼.....	11
3-2-4 受力情況與邊界條件.....	13
<b>四、收斂性分析.....</b>	<b>16</b>
4-1 模型尺寸之探討.....	17
4-2 元素大小之探討.....	21
4-3 所需電腦資源之探討.....	24
<b>五、正方形沉埋剛性基礎阻抗矩陣之有限元素法分析.....</b>	<b>26</b>
5-1 收斂性探討.....	26
5-2 沉埋對正方形剛性基礎之影響.....	29
<b>六、結論與建議.....</b>	<b>31</b>
6-1 結論.....	31
6-2 建議.....	33
<b>參考文獻.....</b>	<b>35</b>
<b>表.....</b>	<b>36</b>
<b>圖.....</b>	<b>43</b>

# 第一章 序論

## 1-1 研究動機

由於台灣位於環太平洋地震帶，地震頻繁。台灣在經歷了 921 地震之後，對於設計規範全面的檢討，為了不再重蹈覆轍，結構物在承受動態力作用後之諸多效應，在設計時必須全面加以考慮，而土壤與結構互制作用 (Soil-Structure Interaction, SSI) 便是其一，值得重視與研究。

目前一般的設計，均假設大地之土壤性質為剛性，實際上結構及其基礎與大地交接並非剛接，其間存在有一定的柔性，且大地也非剛性不可變形，故結構基礎與其座落位置附近的土壤，在受力作用下，存在力與變形的關係。

一般來說，結構物受地震之過程與相應之動態反應歷程相當複雜。地震時，震源釋放之能量將以波之型式經由岩盤與土壤介質向外傳播，當震波來到結構物所在位置時，地盤受力引起結構物振動；同時，結構物部分的振動能量又經由基底散射傳入可變形之土壤支承，造成地震入射波與基底散射波之持續與交互影響作用，形成基底運動與自由場運動不同步之現象，亦即結構物基底與地盤土壤間有相對運動之存在，此交互影響作用稱為動態土壤與結構互制作用。而以往剛

性地盤之設計，皆以自由場的運動作為基礎輸入運動，即認為所有地震波傳送來的能量由結構物單獨承受，無法考慮結構物受地震或其他外力所引起的振動能量由基礎向外擴散出去之行為。

但在許多實際工程案例中，皆顯示土壤與結構互制作用的存在，所以合理的設計應包含此一作用，由於土壤與結構互制作用的影響因子並非獨立，常常是相互關連，且在動力作用下的行為分析更是複雜，以致於一般設計仍然採用剛性地盤分析模式。

而論文中研究之阻抗矩陣，主要是與土壤－結構互制分析之眾多方法中的次結構法(Sub-Structure Method)有關，次結構法之分析程序大致可分為：自由場反應分析、基礎之阻抗矩陣分析及結構動態分析等三部份，而基礎阻抗矩陣之求解為本方法中之核心階段，故本論文特別針對此部分加以討論。而此部分之討論若以有限元素法(Finite Element Method)分析，除可有效的模擬系統之質量、勁度及邊界條件之空間分布外，其對於各種構造複雜，包含任意形狀之剛性基礎、複雜之地質分布或邊界條件等，亦能有效、簡便的分析之。故本研究將以有限元素程式 ABAQUS 【1】，分析沉埋對正方形剛性基礎阻抗矩陣之影響，以利後續土壤與結構互制效應之研究，或是作為未來工程設計之參考。



## 1-2 研究方法

論文中，主要是以基礎之阻抗矩陣作為研究對象。而所謂的基礎阻抗(Foundation Impedance)，係指基礎和其周圍土壤抵抗外來振動之能力，為一剛性基礎在一半無限空間之表面，其承受之載重包括水平方向、垂直方向、翻轉方向以及扭轉方向之簡諧振動力。當基礎上之任一點受到外來振動力，使基礎與其周圍土壤產生振動變形時，所需加諸在基礎上之振動力即為其之阻抗【2】，其詳細之介紹可參考第二章。而現有之理論，除包括圓形剛性基礎在半無限空間表面、方型剛性基礎在半無限空間表面【3、4、5】，以及半球型剛性基礎埋置在均勻半無限空間內有解析解外，至於其他各種形式之基礎等，目前均尚無理論之解析解，所以皆必須利用有限元素法等數值分析方法求解。

而利用有限元素等數值分析方法除前面所提之優點，如可任意改變基礎形狀、有效邊界外，亦有許多缺點存在，如模型之正確性、運算時間、所需資源等問題，而此部分之問題則須先以收斂性分析方法探討之，才能再進行本論文後續正方形沉埋剛性基礎阻抗矩陣之研究，故本論文研究之主要之內容有以下兩點：

- (1)能以有限元素法分析出基礎阻抗矩陣最佳的解。
- (2)探討出沉埋對正方形剛性基礎阻抗矩陣之影響。

### 1-3 論文內容

本論文分成六章。

第一章旨在說明研究動機與研究方法。

第二章為本論文中所用到之理論與解析解介紹，包括：基礎阻抗矩陣與正方形表面剛性基礎阻抗矩陣之解析解等之介紹。

第三章為本論文中所用之 ABAQUS 有限元素程式【1】之介紹，包含其幾何形狀之建立、使用元素、材料參數、受力情況與邊界條件等之介紹。

第四章為收斂性分析，其分析方法為：改變模型大小與元素尺寸，並將分析之結果與解析解比較，以確定所建模型之正確性，除此之外，尚可藉由此方法找出最佳的解。而在此所謂的「最佳」意指為，希望能在有限的資源下，能夠最有效率的分析出最精確的解。

第五章為沉埋對正方形剛性基礎阻抗矩陣之影響。即以第四章收斂性分析之結果，再建立不同深度之正方形沉埋剛性基礎，然後研究沉埋深度對其阻抗矩陣所造成之影響。

第六章結論與建議，即把前述分析之結果作出總結，並建議其他可行之分析方法，以作為後續研究之方向。

## 第二章 基礎阻抗矩陣與正方形表面剛性基礎解析解之介紹

### 2-1 基礎阻抗矩陣之介紹

基礎之阻抗矩陣內之係數，係指基礎及其周圍土壤抵抗外來力量而導致變形的能力，也就是結構學中所稱之勁度。當基礎受外來力量用，基礎及其周圍土壤將產生某種型式之變形，此時所產生一單位變形所需施加於基礎上之力量，即稱為基礎阻抗係數，而其所組成之矩陣，則稱為基礎阻抗矩陣。

而本文所建立之模型為三維之模型，故將有六個方向(即六個自由度)；所以，在六個方向上分別施加一單位力，則可得到其在各個方向上之變形，然後可將其組合成為柔度矩陣，最後再經過一逆矩陣之轉換，則可以得到在各個方向上，一單位變形所需施加於基礎上之力量，此即為在三維情況下之基礎阻抗矩陣。

一般而言，勁度為在時間域中產生一單位位移或變形所需施加之力量，而基礎之阻抗函數，為頻率域中表示為作用於基礎版之力(包括力  $P$  與力矩  $M$ )與其所對應之位移(包括平移  $u$  與旋轉  $\theta$ )的關係，可由下式 2-1 表示之：

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

其中，勁度矩陣為對稱矩陣。

在本文所欲分析之正方形剛性基礎中，只有 $K_{11}$ 、 $K_{16}$ 、 $K_{22}$ 、 $K_{33}$ 、 $K_{34}$ 、 $K_{43}$ 、 $K_{44}$ 、 $K_{55}$ 、 $K_{61}$ 、 $K_{66}$ 有值，其餘皆為零；其中，因為所欲分析對象為正方形之故，故 $K_{11}$ 等於 $K_{33}$ 、 $K_{61}$ 等於 $K_{43}$ ，而 $K_{16}$ 等於 $K_{34}$ 、 $K_{66}$ 等於 $K_{44}$ 。而論文中，基礎之阻抗係數 $K_{11}$ 代表水平方向(Horizontal)之勁度、 $K_{22}$ 代表垂直方向(Vertical)之勁度、 $K_{66}$ 代表翻轉方向(Rocking)之勁度、 $K_{55}$ 代表扭轉方向(Torsional)之勁度、 $K_{16}$ 代表耦合方向(Coupling)之勁度。

而關於基礎阻抗矩陣之研究，早年有學者如：Bycroft(1956)、Gladwell(1956)、Luco et al.(1971)、Veletsos et al.(1971)等，由圓型或方型無質量剛性基礎版置於彈性半無限空間上，研究其力與位移之關係，遂求得基礎阻抗函數之理論解。但其受限於理論解析解只能處理簡單基礎與地盤的例子，故後來的研究多以近似法或數值方法作分析，研究方向也由表面型基礎版延伸至沉埋型基礎版，地盤也由彈性半無限空間延伸至層狀地盤等範疇，如：Pais and Kausel(1985)、Apsel

and Luco(1987)等，並且考慮不同之剛性基礎版型式。而本論文中所採用之正方形剛性基礎在半無限空間表面之解析解，為Liou, Gin-Show(1991)用Fortran程式所寫，詳可參考文獻【3、4、5】，其將在下一節中加以介紹。

## 2-2 正方形表面剛性基礎解析解之介紹

本論文中所採用之方型表面剛性基礎在半無限空間之解析解，為Liou, Gin-Show(1991)用 Fortran 程式所寫，詳可參考文獻【3、4、5】中之介紹。



其解析解所分析之對象，為一置在半無限域中，正方形、表面(無沉埋)且無質量之剛性基礎版，而其文章中皆以無因次化之結果來表示，故在解析解中，橫軸所表示之頻率之值，需乘上剪力波速  $V_s$  再除上正方形剛性基礎版之一半；而其縱軸所表示之勁度之值，依照水平、垂直、翻轉、扭轉與耦合方向勁度之排列，分別需乘上剪力模數  $G$  (Shear module) 與正方形剛性基礎版之一半的一次方、一次方、三次方、三次方與兩次方，才可以化成與本論文中所表示之有因次的橫軸(頻率值)與縱軸(勁度值)單位相同。而後面論文中所指之解析解，即表示為正方形表面剛性基礎阻抗矩陣的理論解。

## 第三章 有限元素程式介紹

### 3-1 ABAQUS 介紹

研究中所採用之分析軟體 ABAQUS【1】，為有限元素分析軟體。該程式是由美國 Hibbit、Karlsson & Sorensen Inc 公司所發展，目前已發展至 6.5 版，即為本次研究所使用之版本。

ABAQUS【1】是套非常強大的工程分析軟體，其基本原理為有限元素法，而應用範圍之廣泛，可包括線性、非線性、靜力、動力等問題。其包含了極為廣泛的元素種類，包括實體元素(Solid element)、樑元素(Beam element)等各式各樣的元素，可模擬接近真實的幾何條件，並包含了各式各樣的材料性質可供一般工程上所常用之材料的模擬，如橡膠(Rubber)、聚合物(Polymer)、複合材料(Composite)、鋼筋混凝土(Reinforced concrete)、土壤、岩石等。ABAQUS【1】除可分析一般應力、應變等問題外，還可以模擬熱傳(Heat transfer analyses)、聲學(Acoustics analyses)、土壤中的孔隙水壓(Coupled pore fluid-stress analyses)等問題。而在此論文中，是利用 ABAQUS【1】將半無限空間正方形剛性基礎之問題，模擬成有限元素模型來進行數值分析，以求得在彈性半無限域中，正方形剛性基礎之阻抗矩陣。

因為有限元素程式具有較大之變化空間，可以任意改變基礎的形

式、深度，以及土壤性質等，而在與特殊條件下之解析解比較後，還可以確定模型之正確性。論文中，將依此特性修改模型以作收斂性分析，然後決定出最適合之模型尺寸與元素大小；之後，再根據分析出來之結果，建立不同深度之正方形沉埋剛性基礎，以研究其土壤阻抗矩陣之變化。

以 ABAQUS【1】分析問題，必須先將問題簡化後才能進行模型的建立。其中，必須先知道包含幾何形狀、材料性質、邊界條件、受力情況等資料，然後才可以決定分析過程與方法。而建立一個輸入檔須先由定義幾何形狀開始，再分別建立元素網格大小和定義元素之種類，之後需描述幾何的邊界條件、定義受力的大小、方向、以及位置，最後再給定分析的方法，整個輸入檔的建立才算完成。此部份將在後面章節一一加以介紹。

## 3-2 模型建立

### 3-2-1 幾何形狀

論文在第四章收斂性分析中所欲分析之對象為，正方形(100m\*100m)表面剛性基礎，而其在半無限空間的土壤深度部分，為一層之土壤且材料性質均相同，如圖 3-1 所示；而在第五章中，欲分析正方形沉埋剛性基礎之幾何形狀，則如圖 3-2 所示。而 ABAQUS

程式【1】內部之座標系統說明，可參考圖 3-3 所示。

在論文中，因為欲分析土壤受動態擾動下之行為，故須考慮 1-10Hz 之頻率變化。在此，為方便討論，故先將頻率區分為：1-3Hz(低頻)、3-5Hz(中低頻)、5-7Hz(中高頻)、7-10Hz(高頻)。

另外，在分析時，為了節省資源，所以建立之模型皆以 X 軸(1 軸)對稱、Z 軸(3 軸)對稱之雙軸對稱下，以四分之一模型分析之，其模型在 ABAQUS【1】中，如圖 3-4 所示。圖 3-4 內所表示之模型為 200/50 之模型，受水平力在 1Hz 下分析所得之結果。而 200/50 之模型指對應於 X、Y、Z 三軸為 100\*200\*100 單位為公尺之模型，此為已取雙軸對稱 1/4 之模型，亦為實際在 ABAQUS 程式【1】中所建立之模型，其將在後面部分詳細介紹。

而論文在第五章沉埋剛性基礎分析中之模型基本同上，可參考圖 3-2 所示，不同的部分只是以深度和剛性基礎半寬之比(d/b)，來決定其沉埋之深度，其深寬比分別為 0.25、0.5、0.75、1，即表示沉埋深度分別為 12.5、25、37.5、50 公尺，如圖 3-2(b)所示。

至於無質量剛性基礎之建立，因其無質量且為剛性，故採用將剛性基礎範圍內所包含之節點全部鎖住之方式，並令其上各點之位移相同以模擬之。



### 3-2-2 使用元素

在 ABAQUS【1】中，論文近域的分析範圍內，均採用三維二十節點之實體元素 C3D20R(Quadratic element)，如圖 3-5(a)所示。

而土壤的波傳實屬無限域的問題，茲受限於無法真實模擬無限域的空間，故在遠域的土壤則採用無限元素(Infinite element)分析，如圖 3-5(b)所示，以模擬無限域空間，即當波傳遞至此時，使波不會反射或折射而再傳回至近域模擬土壤中之元素。

### 3-2-3 材料參數與土壤阻尼



(1)材料參數：

在 ABAQUS【1】中，輸入的材料參數如下：

論文中欲分析之對象剪力波速  $V_s$  設為 300m/s，密度  $\rho$  設為 2000kg/m<sup>3</sup>，包松比  $\nu$ (Poisson ratio)設為 0.33，阻尼比  $\xi$ (Damping ratio)設為 0.05。

然後可依照波傳理論之公式  $v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ ，計算出剪力模數  $G$ (Shear module)為  $1.8 \times 10^8$ Pa，再來可依照材料力學之公式，求得土壤的楊氏模數  $E_s$ (Young's Module)為  $4.788 \times 10^8$ Pa；而壓力波速  $V_p$  則同樣可依

照波傳理論之公式  $v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$  計算，為 596m/s。

另再根據 Richart(1962)【6】與文獻【7】中，如圖 3-6 所示，可知包松比  $\nu$  與壓力波速  $V_p$ 、剪力波速  $V_s$ 、雷利波速  $V_R$  間的關係。所以，已知剪力波速  $V_s$  為 300m/s、 $\nu$  為 0.33，查圖可得知雷利波速與剪力波速之比例關係， $V_R/V_s$  約為 0.933，故  $V_R$  約為 279.9m/s。

## (2)土壤阻尼：

對於動力反應分析問題，若欲正確地分析出能量在土壤中之消耗，必須在此加入適當之阻尼，才能有效地模擬出系統的動態行為。而在 ABAQUS【1】中，所採用的阻尼形式為雷利阻尼(Rayleigh Damping)，其阻尼形式是由質量矩陣與勁度矩陣線性疊加而成【8】，即：

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K]$$

其中， $\alpha$  為質量比例阻尼係數， $\beta$  為勁度比例阻尼係數。雷利阻尼屬於黏滯性阻尼(viscous damping)，而土壤的行為與遲滯性阻尼(hysteretic damping)較為接近，其阻尼力與位移成正比；所以，為了將雷利阻尼表為遲滯性阻尼，將推導方程式如下。

由於在頻率域求取阻抗矩陣(Impedance matrix)，因此可利用 ABAQUS 程式【1】以頻率域求解穩態解的分析方法，若土壤結構系

統受一頻率為  $\omega$  之簡諧外力作用時，則系統的反應可寫成：

$$u(t) = Ue^{i\omega t} \quad (3-1)$$

將  $u(t)$  分別對時間微分一次、二次，可得到速度、加速度反應：

$$\dot{u}(t) = i\omega Ue^{i\omega t} = i\omega \times u(t) \quad (3-2)$$

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 Ue^{i\omega t} = -\omega^2 \times u(t) \quad (3-3)$$

將(3-1)、(3-2)、(3-3)代入運動方程式可表為下式：

$$-\omega^2 Mu(t) + i\omega Cu(t) + Ku(t) = P(t) \quad (3-4)$$

令  $\alpha=0$ ，可得阻尼力  $C=\beta^K$  為純勁度阻尼，代入(3-4)，得：

$$-\omega^2 Mu(t) + (1 + i\omega\beta)Ku(t) = P(t) \quad (3-5)$$

而遲滯性阻尼的運動方程式為：

$$-\omega^2 Mu(t) + (1 + 2i\xi)Ku(t) = P(t) \quad (3-6)$$

故令  $\omega\beta = 2\xi$  即可得  $\beta = \frac{2\xi}{\omega} = \frac{\xi}{\pi f}$ ，就可以得到模擬具遲滯性阻尼時

之運動方程式。所以，論文在 ABAQUS【1】的分析中，均假設  $\alpha=0$ ，

$\beta = \frac{\xi}{\pi f}$  以模擬土壤其遲滯性阻尼之行為。

### 3-2-4 受力情況與邊界條件

(1) 受力情況：

在剛性基礎版中央施加一單位簡諧載重，可求得其相對應自由度

下的位移反應，而在各個自由度下分別施加一單位簡諧載重，則可得到此剛性基礎版之柔度矩陣(Compliance matrix)，再經逆轉換後，即可得到此剛性基礎版之阻抗矩陣。

因本次分析所使用之單位為牛頓(N)，故將在剛性基礎版中央所施加之一單位簡諧載重為 $1 \times e^{i\omega t}$  N 的力。

而因模型是取 1/4 模型分析，所以在收斂性分析中所分析之模型(此處指正方型表面剛性基礎之模型)，此一單位簡諧力所施加之位置為正方型表面剛性基礎上之原點(0,0,0)處；而在正方型沉埋剛性基礎之模型中，單位簡諧力施加之位置為沉埋剛性基礎底面之中央上，分別對應沉埋深度 12.5、25、37.5、50 公尺，在模型內所表示之座標位置點為(0,-12.5,0)、(0,-25,0)、(0,-37.5,0)以及(0,-50,0)處。

(2)邊界條件：

因模擬彈性半無限域空間，所以邊界條件在土壤無限遠的地方位移必須等於零，亦即使用之前所介紹的無限元素模擬之。

另外，因取四分之一模型分析，故在水平(Horizontal)方向上與翻轉(Rocking)方向上施加一單位簡諧力時，X 軸為對稱軸，Z 軸為反對稱軸；在垂直(Vertical)方向上施加一單位簡諧力時，X、Z 軸皆為對稱軸；而在扭轉(Torsion)方向上施加一單位簡諧力時，X、Z 軸則皆

為反對稱軸。

而使用有限元素法模擬無質量剛性基礎版受動力載重之問題，有兩個重要的問題值得探討。第一個問題是關於所取元素之大小。因為 ABAQUS【1】無法先行預知求解阻抗矩陣的精確度，所以必須在電腦資源容許的範圍下，找到最為適合的元素大小，來求得最精確之穩態解(Steady state)；而第二個問題則是有關所取分析區域的大小，即論文中所指的模型尺寸，茲因電腦資源的有限，故不可能將分析的範圍無限延伸，所以同樣的，這也必須將其在電腦資源容許的範圍下，定出一個合理的分析範圍。基於此，所以論文將在第四章中，以收斂性分析來探討這兩個問題，求出在有限資源下的合理分析範圍；並可討論其結果，以找出其最佳的解。

#### 第四章 收斂性分析

於收斂性分析中，論文一開始先將模型尺寸分為 200、300、400(單位皆為公尺)，元素大小分為 50、25、12.5(單位皆為公尺)作探討。因為欲分析對象具有對稱性，所以模型尺寸僅以四分之一模型分析之，即以 100\*200\*100、150\*300\*150 與 200\*400\*200 之模型分析(單位皆為公尺)，其後論文中所述之模型皆以此類推。如模型尺寸 500，即為 250\*500\*250 之大小，單位皆為公尺，而在深度部份(Y 方向)因模型為往下建立，所以 Y 座標中應加負號以表示之，但文中為簡化表示，故省略其負號。

另外，在圖中之表示，如線段 1000/25，在分號之前表示為所取之模型尺寸大小，單位為公尺；分號之後表示為所分割之元素大小，單位為公尺。因原欲分析之模型為正方形，三方向長度均相同，所以分析模型尺寸可僅以一個數字代表，但在真正所建立之模型中，為節省資源所取 X、Z 軸對稱之 1/4 模型，故在 X 與 Z 軸上真正之長度，將變為原欲分析模型 X、Z 軸上之長度的一半，只有 Y 軸將與原分析模型上之 Y 軸長度相等，所以在線段 1000/25 中，真正的模型將為 500\*1000\*500；而在真正建立之模型中所取之元素亦為正方形，所以亦可只以一個數字表示，故在線段 1000/25 中，所取之元素大小即為 25\*25\*25，單位為公尺。

但在作收斂性分析之前，根據有限元素理論可知，元素大小對結果之正確性具有很大之影響，應對應於壓力波速、剪力波速之變小而變小，與對應於外力頻率之變大而變小。在論文中，剪力波速為 300m/s，而分析之外力頻率最大至 10Hz，故可預知元素大小大概至少需要小於 30m 才可以得到較為可信的解；另外，模型尺寸應與波長相應，若剪力波速為 300m/s，則模型尺寸至少得能完整的描述一個波，即若在 1Hz 時，模型尺寸至少需為取到 300m 才可以得到較為可信的解，而此部分將在其後作收斂性分析的時候驗證。

而根據結果顯示，不論元素大小，模型尺寸在不足 300m 時，於低頻中 1-2Hz 才会有較大之誤差出現，但對中低、中、高頻之分析影響甚微；但若不論模型尺寸，僅只考慮元素大小的話，在低頻時元素大小影響雖然較小，但在中高頻與高頻分析時影響則甚大，所以可知道分析結果之精度是以元素大小控制，模型尺寸較不重要，僅需在低頻時考慮。

後面，論文將依模型尺寸、元素大小與所需電腦資源一一探討之。

#### 4-1 模型尺寸之探討

如前所述，故在此先將元素大小定為 12.5(12.5\*12.5\*12.5m)，然後視其阻抗矩陣在不同模型尺寸之變化，分別依水平方向

(Horizontal)、垂直方向(Vertical)、翻轉方向(Rocking)、扭轉方向(Torsional)與耦合方向(Coupling)之順序討論。而論文中，阻抗矩陣將以複數型式表示，其實數部分表示土壤勁度，虛數部分表示為阻尼，故論文後續部份之討論，又分成實數部份與虛數部分兩部分。

實數部分，在水平方向，1Hz 下，模型尺寸為 200(100\*200\*100m)時，與解析解之誤差為 19.0%，在 300(150\*300\*150m)時為 8.7%，400(200\*400\*200m)時為 0.4%；而模型尺寸為 200(100\*200\*100m)在低頻時(即 1-3Hz)之平均誤差為 11.3%，300(150\*300\*150m)時為 4.7%，400(200\*400\*200m)時為 2.8%，如圖 4-1(a)所示。

在垂直方向，1Hz 下，模型尺寸為 200(100\*200\*100m)時，與解析解之誤差為 0.5%，在 300(150\*300\*150m)時為 11.1%，400(200\*400\*200m)時為 1.6%；而模型尺寸為 200(100\*200\*100m)在低頻時(即 1-3Hz)之平均誤差為 9.8%，300(150\*300\*150m)時為 9.1%，400(200\*400\*200m)時為 4.3%，如圖 4-2(a)所示。

在翻轉方向，1Hz 下，模型尺寸為 200(100\*200\*100m)時，與解析解之誤差為 10.6%，在 300(150\*300\*150m)時為 6.1%，400(200\*400\*200m)時為 10.7%；而模型尺寸為 200(100\*200\*100m)在低頻時(即 1-3Hz)之平均誤差為 12.1%，300(150\*300\*150m)時為 7.4%，400(200\*400\*200m)時為 10%，如圖 4-3(a)所示。



在扭轉方向，1Hz 下，模型尺寸為 200(100\*200\*100m)時，與解析解之誤差為 17.1%，在 300(150\*300\*150m)時為 9.0%，400(200\*400\*200m)時為 8.0%；而模型尺寸為 200(100\*200\*100m)在低頻時(即 1-3Hz)之平均誤差為 11.2%，300(150\*300\*150m)時為 8.6%，400(200\*400\*200m)時為 8.5%，如圖 4-4(a)所示。

在耦合方向，1Hz 下，模型尺寸為 200(100\*200\*100m)時，與解析解之誤差為 40.9%，在 300(150\*300\*150m)時為 8.0%，400(200\*400\*200m)時為 4.5%；而模型尺寸為 200(100\*200\*100m)在低頻時(即 1-3Hz)之平均誤差為 29.1%，300(150\*300\*150m)時為 22.0%，400(200\*400\*200m)時為 18.3%，如圖 4-5(a)所示。

由數據顯示，模型尺寸取 400(200\*400\*200m)時可以得到很精確的解，低頻時各方向之總平均誤差約為 8.8%左右；而模型尺寸 300 時與模型尺寸 400(200\*400\*200m)時相差不大，低頻時各方向之總平均誤差約為 10.4%左右；只有模型尺寸為 200(100\*200\*100m)時，低頻時各方向之總平均誤差約為 14.7%左右，但其在 1Hz 時之平均誤差就已為 17.6%，即可看出其在 1Hz 時誤差最大，而在 2Hz、3Hz 時之誤差較小，這亦可證明在 1Hz 時，模型尺寸最少也要取到 300(150\*300\*150m)才可以得到較為合理的解，所以可知低頻時模型尺寸所造成之影響。

另外，從結果還可看出在耦合方向上，其誤差會較大，此部分將留待在後面部份討論。但不論如何，用 ABAQUS【1】分析之結果，其趨勢皆與解析解相同。

而論文中在低頻之部分，為確定分析出來之結果是否以達收斂，遂又建立了模型尺寸 500(250\*500\*250m)之模型，其元素大小為 25(單位為公尺)與 12.5(單位為公尺)；和模型尺寸 1000(500\*1000\*500m)，元素大小為 50 與 25 之模型，其分析出來之結果可參考表 4-1 至 4-5 所示。而根據結果顯示，在 1Hz 時，500/12.5 之模型，在各方向與解析解之平均誤差約 5% 左右；即使元素大小為 25(單位為公尺)，在各方向與解析解之平均誤差也可以維持在約 10% 以內。而 1000/25 之模型，在各方向與解析解之平均誤差約為 9%，故可知道在低頻時，模型尺寸取在 400(200\*400\*200m)下已將近收斂，因與模型尺寸取 500(250\*500\*250m)和 1000(500\*1000\*500m)下所得之分析結果已相差甚微。

上述皆為實數部份之探討，至於虛部部分之探討除耦合部分外，其餘各方向皆與解析解相近，誤差皆可保持在 10% 以內，如圖 4-1 至 4-4 之(b)所示；而虛部耦合之部份趨勢亦與解析解相同，僅求解出來之值與解析解相比後，其誤差甚大，如圖 4-5(b)所示，而此部分將在後面部分探討，故在此則不加以詳述。

## 4-2 元素大小之探討

此部分討論須先將模型尺寸固定，依前面所討論出來之結果，故將模型尺寸定為 400(200\*400\*200m)，然後改變元素大小，其分別為 50(50\*50\*50m)、25(25\*25\*25m)、12.5(12.5\*12.5\*12.5m)，如圖 4-6 至 4-10 所示。

後因資源問題，若欲使用更小之元素，如 6.25(6.25\*6.25\*6.25m)、3.125(3.125\*3.125\*3.125m)之元素大小，則便無法以模型尺寸 400(200\*400\*200m)之大小分析，故最大模型尺寸只能取至 300(150\*300\*150m)，所以在後面高頻部份，為了求出更精確的解，遂多建立了 200/6.25、200/3.125 與 300/6.25、300/3.125 之模型與解析解比較，如圖 4-11 至 4-15 與圖 4-16 至 4-20 所示。而其他模型，如：200/50、200/25、200/12.5 與 300/50、300/25、300/12.5 等模型結果之討論，因與 400/50、400/25、400/12.5 所得之討論結果相同，故論文中不予以多述，其分析之結果可參考圖 4-11 至 4-15 與圖 4-16 至 4-20 所示。

而與此部分相關之圖，若是因元素大小切割的不夠細，所造成分析結果誤差過大之情形，其值將不標示在圖上，以避免其影響在圖上之判斷，而其詳細之值可參考表 4-1 至 4-5 中所示。

以模型尺寸 400(200\*400\*200m)，元素大小為 50(50\*50\*50m)與

解析解相比，其結果產生跳躍，誤差甚大，趨勢也不相符，約只能在 1、2Hz 下其值才能較為接近解析解，但各方向誤差平均約為 30% 左右；若元素大小取到 25(25\*25\*25m)時，則約在 5Hz 以下其值才能較為接近解析解，各方向誤差也較小，平均約為 20% 左右，但若元素大小取到 12.5(12.5\*12.5\*12.5m)之時，其趨勢則可與解析解相當吻合，而各方向誤差平均約為 10% 左右，故可知道元素大小對頻率之影響。因此得知，越接近高頻，所取之元素則須越小。

若以 400/12.5 之模型來看，在水平方向，低頻時與解析解之平均誤差為 2.8%；中低頻時為 1.7%；中高頻時為 2.2%；高頻時為 18.0%，如圖 4-6(a)所示。



在垂直方向，低頻時與解析解之平均誤差為 4.3%；中低頻時為 5.2%；中高頻時為 5.9%；高頻時為 30.8%，如圖 4-7(a)所示。

在翻轉方向，低頻時與解析解之平均誤差為 10.8%；中低頻時為 9.8%；中高頻時為 13.0%；高頻時為 22.1%，如圖 4-8(a)所示。

在扭轉方向，低頻時與解析解之平均誤差為 8.5%；中低頻時為 9.0%；中高頻時為 8.9%；高頻時為 17.0%，如圖 4-9(a)所示。

在耦合方向，低頻時與解析解之平均誤差為 18.3%；中低頻時為 54.4%；中高頻時為 57.1%，如圖 4-10(a)所示；而在高頻時則因誤差太大，故須切割至更細的元素大小來看，但其誤差僅在值之大小上

面，分析結果之趨勢仍保持與解析解一致。

由數據結果顯示，水平與垂直方向之誤差皆集中在高頻的 8、9、10Hz 上，越高頻誤差越大，但在 7Hz 以下之誤差則能保持在 10% 左右；而翻轉方向與扭轉方向之誤差則較平均，翻轉方向在低、中低、中高頻時誤差保持在 10% 左右，而高頻時誤差雖較大，但也能控制在 25% 以內，至於扭轉方向，則在低、中低、中高頻時誤差可保持在 9% 左右，高頻時誤差則可控制在 20% 以下，由此可知，在此種模型下分析出來之結果是水平方向優於垂直方向、扭轉方向優於翻轉方向。

再根據 200/6.25、200/3.125 與 300/6.25、300/3.125 之模型，如圖 4-11 至 4-15 與 4-16 至 4-20 所示，可看出在耦合方向上之誤差是由元素大小造成，若元素大小切割得更細，則可以得到更好之結果。在 400/12.5 之模型，10Hz 下，其耦合方向之誤差為 400% 左右，但用元素大小到 6.25(6.25\*6.25\*6.25m) 時，其誤差立即降至 73% 左右，但趨勢會有向前移之現象，而此現象在元素大小為 3.125(3.125\*3.125\*3.125m) 時亦會出現，其原因可能為有限元素程式內部所乘之形狀函數的關係，但其真正之原因仍需探究。而在元素大小為 3.125(3.125\*3.125\*3.125m) 時，其與解析解之誤差為 45%，可知耦合方向分析之結果，將隨元素切割得更細而趨於收斂，但礙於資源問題，所以已無法繼續再將元素大小切割得更細。

但在其他各方向上(除耦合方向),取元素大小為 6.25(單位為公尺)時,平均之誤差已可控制在 2%左右,而在元素大小為 3.125(單位為公尺)時,平均之誤差約控制在 1%左右,可看出所取元素大小在 6.25(單位為公尺)時已將近收斂,其後,就算元素切割的更細也無法再提高多少精度;所以,礙於所需資源的問題,實無必要取到 3.125(單位為公尺)之元素大小分析,而此部分將在下一節所需資源中探討。

而虛數之部分,亦是除了耦合方向在高頻時其值之誤差較大,但其結果皆與之前的討論相同,故不再贅述,詳可參考圖 4-1 至 4-20 之(b)所示。但經過上述部份之探討,可得知虛數部份在各方向上之分析皆可以得到良好之結果,除耦合方向外,只要所取模型尺寸(大於 300m)與元素大小(小於 12.5m)適當的話,其誤差皆可以維持在 10% 以內,而耦合方向可保持與解析解趨勢相同;其原因可能是因為虛數部分表示土壤阻尼,而阻尼部分在 ABAQUS 程式【1】中之輸入,為每一 Hz 下自行以  $\alpha=0, \beta=\frac{\xi}{\pi f}$  輸入而得,故才能維持如此良好之分析結果。

#### 4-3 所需電腦資源之探討

各模型元素(Elements)與節點(Nodes)數如表 4-6 所示,其所需資源與運算時間則如表 4-7 所示,而各硬體設備說明如表 4-8 所示。由

此可知，個人電腦最多只能計算到 80000 節點，節點再多的話則需要尋求更高的運算資源，如高速電腦中心之電腦，而其運算所需之時間約為兩個小時；但若節點增至 100000 的話，不僅需求助於高速電腦中心之電腦，連運算所需之時間亦會暴增至十二個小時以上，而節點數若增至 900000 時(如 300/3.125 之模型)，運算所需時間則至少需要六天以上，但結果除耦合方向最大誤差可從 80% 減少至 45% 外，其餘各方向上之誤差並沒有好多少，故可知其效率並不經濟。

所以，若在經濟與精確性兼顧的前提下，只有 400/12.5 之模型較能符合之，惟其在高頻時所分析出來之值會有變大之趨勢，故後又另以 6.25(6.25\*6.25\*6.25m) 之元素大小分析比較，但此時已不建議採用 3.125(3.125\*3.125\*3.125m) 之元素大小，其原因為使用 6.25(6.25\*6.25\*6.25m) 元素大小之結果已夠精確，各方向(除耦合方向外)與解析解比較，在高頻時誤差已可維持在 2%、3% 左右；另為，亦為使用 3.125(3.125\*3.125\*3.125m) 元素大小其分析所需之時間太長，較不經濟之故，而其在各方向(除耦合方向外)所得之結果，在高頻時誤差約為 1%，精度也並沒有比使用 6.25(6.25\*6.25\*6.25m) 之元素大小提高多少，所以並不建議採用。

## 第五章 正方型沉埋剛性基礎阻抗矩陣之有限元素法分析

根據前章收斂性分析之結果，在第五章中，模型將以 400/12.5 為基準來討論正方型沉埋對剛性基礎阻抗矩陣之影響。因此部份並無解析解可以比對，故對值之收斂需要特別注意。另外，由於前章中已建立大量的模型與解析解比對，而分析之結果亦有相當之精度，故才可假設後續部份(即正方型沉埋剛性基礎)之模型為正確、可信的，才能再作此後續部份之分析與討論。

另外，由於耦合方向之反應複雜，且在物理上難以解釋，而在前章收斂性分析時所得之結果僅只有趨勢相同，值的精確度並不高，誤差較大，故論文在此部分並不予以討論耦合方向之值。

以下將分成兩小節以作討論，第一部分先討論其收斂性，第二部分才討論沉埋對剛性基礎之影響。

### 5-1 收斂性探討

為探討值的收斂性，故論文在此部分將 5Hz 處定為分界，然後在 1-5Hz 的部分，以 400/12.5 的模型跟 500/12.5 模型的結果比較；而在 5-10Hz 的部份，則以 300/6.25 的模型跟 400/12.5 與 200/6.25 模型的結果比較，以此作出收斂性之探討。而在圖中線段之表示說明如下，400/12.5 之模型為一條線，Model-1 則是由 1-5Hz 時為 500/12.5



之模型與 5-10Hz 時為 300/6.25 之模型所組成之一條線，200/6.25 之模型為第三條線，其只有 5-10Hz 之數值。如圖 5-1 至 5-15 中之線段。

而根據結果顯示，雖然在前章中提到，分析結果之精確度是以元素大小控制，模型尺寸較不重要，僅需要在低頻時考慮的內容，可是在有沉埋的模型中，可清楚的看出模型尺寸對高頻的分析佔有不可忽略之影響。所以，即使是在高頻，亦不可選擇使用太小之模型尺寸，在此案例中至少須取到 300m，即在前章收斂性分析中，低頻分析時所須選取的最小合理模型尺寸，亦是案例開始時所假設剪力波速後得到之最大波長。

在 1-5Hz 時，400/12.5 模型與 Model-1 模型比較，其結果相當吻合，其差值皆可在 10% 以內，故可知分析結果在低頻時已達收斂。

而在 5Hz 處的收斂性探討中可看出，扭轉方向所得到之結果最好，若不考慮模型尺寸 200/6.25 較不可信之值外，平均之差值只有約 1%，如圖 5-4、5-9、5-14、5-19 中之(a)所示。此部分可能是因為剛性基礎為正方形，兩邊對稱之緣故，所以在扭轉方向上之收斂性才能得到如此良好之結果。

但在垂直方向上之收斂性最差，以模型為 200/6.25 時來看，其差值在沉埋 12.5m 時為 16%，如圖 5-2(a)；25m 時 24%，如圖 5-7(a)；37.5m 時為 48%，如圖 5-12(a)；50m 時為 43%，如圖 5-17(a)；比起

扭轉方向同樣在 200/6.25 模型時，沉埋 12.5m 時僅為 2%，如圖 5-4(a)；25m 時 9%，如圖 5-9(a)；37.5m 時為 16%，如圖 5-14(a)；50m 時為 23% 之值，如圖 5-19(a) 所示，還要高出許多。而其水平方向在 200/6.25 模型時，沉埋 12.5m 時僅為 3%，如圖 5-1(a)；25m 時 22%，如圖 5-6(a)；37.5m 時為 38%，如圖 5-11(a)；50m 時為 2%，如圖 5-16(a)。而翻轉方向在 200/6.25 模型時，沉埋 12.5m 時僅為 2%，如圖 5-3(a)；25m 時 14%，如圖 5-8(a)；37.5m 時為 17%，如圖 5-13(a)；50m 時為 20%，如圖 5-18(a)。

前為 200/6.25 模型與 Model-1 中之 300/6.25 之模型比較；但若以 400/12.5 之模型與 200/6.25 和 Model-1 中之 300/6.25 比較的話，選取較大之模型尺寸分析所得之結果，如模型尺寸為 300(150\*300\*150m) 來分析，則因模型尺寸不足(模型尺寸為 100\*200\*100m 時)，在不同沉埋深度時所造成之誤差，若以垂直方向為例，其平均之差值為 42%，但在模型尺寸為 300(150\*300\*150m) 時，則可立刻降至 20% 至 30% 之間。由此可知，模型尺寸對其分析結果之影響甚巨，不容忽視。

由上述結果可知，分析模型所取之模型尺寸對沉埋剛性基礎有所影響，如取太小的話(100\*200\*100m 之模型尺寸)，對分析出來之結果會有上下跳躍之影響，收斂性較差；但模型尺寸若取得較為合理之時(如 150\*300\*150m 之模型尺寸)，則此影響程度將會銳減。但其原

因除可能是模型尺寸選取的不適當外，亦可能是此有限元素程式內部的問題，但真正的原因為何，則需要透過此程式來分析更多、各種的其他案例，或是透過更強的資源，作更詳細的收斂性分析才能得知。

至於虛部的部分，因其結果與前章所討論出來之結論相同，在 5Hz 時之平均差值皆可維持在 10% 以內，如圖 5-1 至 5-20 之(b)所示，故在此並不特別加以說明。

## 5-2 沉埋對正方形剛性基礎之影響

在此部分，將以 400/12.5 之模型來看，其在高頻部分之值，與前章之討論結果相同，亦有變大之趨勢，此原因為元素大小切割得不夠細之故，故可以 300/6.25 之模型作更精確之分析，得到較為可信之結果。而比較兩者之結果，其討論如下。

從沉埋 12.5、25、37.5、50m 的結果，可看出沉埋對剛性基礎阻抗矩陣之影響，在低頻時，沉埋深皆能有效的提高勁度，以扭力方向提高最多，在 1Hz 時，依沉埋 12.5、25、37.5、50m 的順序，其勁度分別提高了 1.76、2.27、2.75、3.2 倍，如圖 5-24；翻轉方向次之，其勁度分別提高了 1.47、1.91、2.48、3.17 倍，如圖 5-23；水平方向再次之，其勁度分別提高了 1.35、1.57、1.74、1.87 倍，如圖 5-21；而垂直方向較少，其勁度只分別提高了 1.15、1.26、1.36、1.47 倍，如

圖 5-22；耦合部分可參考圖 5-25 所示。

但結果亦顯示出，在水平方向時，沉埋的越深，其所提供之勁度也有消減越快之現象，在高頻時，甚至有可能出現負值，反而減少結構之勁度。

最後，可取模型 400/12.5 的 1-5Hz 之值，與 Model-1 中之 300/6.25 模型的 5-10Hz 之值相連，以得到用有限元素程式 ABAQUS【1】所建立之正方型沉埋剛性基礎，在各沉埋深度下(12.5、25、37.5、50m)所求得之阻抗矩陣的解。



## 第六章 結論與建議

本論文以 ABAQUS 有限元素法之套裝程式【1】，模擬土壤與基礎間之關係，並將模擬分析所得之結果與解析解進行比對，以檢驗 ABAQUS 程式【1】對於波傳的適用性，並再以收斂性分析所得之結果，進一步對正方形沉埋剛性基礎分析，探討沉埋深度對正方形剛性基礎阻抗矩陣所造成之影響。

而以下將對本論文分析所得之數據作一總結，以及其未來可發展方向。

### 6-1 結論



- (1)以 ABAQUS【1】求解土壤與基礎間阻抗矩陣之問題，根據結果顯示，只要分析模型適當的話，則可與解析解相吻合，故可知 ABAQUS 程式【1】在求解波傳問題上之適用性。
- (2)根據收斂性分析之結果得知，低頻分析時以模型尺寸控制，高頻分析時則以元素大小控制，即在低頻分析時需要較大之模型尺寸，而元素可以不用分割的太細；但在高頻分析時則需要分割成較細之元素，但模型尺寸可以不用取得太大。

(3)以 ABAQUS 程式【1】分析，在此種模型下，根據分析出來之結果顯示，在低頻的時候，模型尺寸若取為能完整描述一個剪力波之大小，而元素大小為其 1/20 的話，約可以得到誤差控制在 30% 以內的分析結果；若此時模型尺寸再加大 1/3 的話，而所取元素大小不變，則應可得到誤差控制在 10% 以內的分析結果(除耦合方向外)。但在高頻時，模型尺寸最小皆應取到能完整描述一個剪力波之大小，尤其是在具有沉埋之情況；而此時，若元素大小能取為一個完整的剪力波，除以所欲分析之最大 Hz 數再除以 2 的話，約可得到誤差控制在 30% 以內的分析結果；而若取為一個完整的剪力波，除以所欲分析之最大 Hz 數再除以 4 的話，則應可得到誤差控制在 10% 以內的分析結果(除耦合方向外)。

(4)根據結果顯示，ABAQUS【1】在低、中低、中高頻時所分析出來之結果相當精確，僅在高頻時之結果較為不精確，但其趨勢仍能保持與解析解吻合，惟此部份需要特別注意。

(5)在沉埋剛性基礎之分析時，需特別注意所取模型尺寸之大小，應至少能完整的描述出一個波的波長，即至少等於一秒內剪力波速所能傳遞之距離，才能在有沉埋的情況下得到較為可信之結果。

(6)沉埋對剛性基礎阻抗矩陣之影響，在正方形沉埋基礎的情況下，低頻時，沉埋深皆能有效的提高各方向之勁度，以扭力方向提高最多，翻轉方向次之，水平方向再次之，垂直方向較少；但須注意的是在水平方向時，沉埋越深其勁度也會有消滅的越快的現象，到高頻時，亦有出現負值之可能。

## 6-2 建議

以有限元素法求解阻抗矩陣之缺點，除了可信度、所需資源外，即為分析所需之時間。如：分析之結果，其可信度將在越高頻的時候變得越難以信任；個人電腦只能運算到約 80000 節點之模型，若節點數超過 80000 的話，則可能需要尋找更高的外界資源，如國家高速電腦中心之高速電腦，其使用資源之說明如表 4-8 所示；或是當節點數目接近 100000 點時，運算單一個外力頻率所需之時間，就需要超過十二個小時以上等，仍有以上許多問題需要解決，故提出建議如下：

(1)希望能有更好的電腦資源可供利用，以作更詳盡之收斂性分析，增加有限元素程式 ABAQUS【1】分析結果之可信度。

- (2)能以其他有限元素程式結果比對，相互印證；或是能有更快、更有效率的解析解程式發展，並與之比對，以確認有限元素程式 ABAQUS【1】在波傳問題方面之適用性以及精確度。
- (3)分析更多不同種類與極端的案例，如圓型沉埋基礎、層狀土壤、底為剛性岩盤等，以討論其結果之合理，來確認有限元素程式 ABAQUS【1】之可行以及可信程度，或是作為未來工程上之參考依據。





## 參考文獻

1. Computer program ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, 2002.
2. 楊樹華, “土壤－結構互制作用對結構物動力反應的影響”, 國立台灣大學, 碩士論文, 民國八十九年。
3. Liou, Gin-Show, “Analytic Solution For Dynamic Loading On Half-Space Medium”, Journal of the Engineering Mechanics, v117, n7, July, 1991, p1485-1494.
4. Liou, Gin-Show, “Impedance for Rigid Square Foundation on Layered Medium”, Structural Engineering/Earthquake Engineering, v10, n2, July 1994, p47-57.
5. Liou, Gin-Show, “Vibration of Surface Foundation of Arbitrary Shapes”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v 20, n 12, Dec, 1991, p1115-1125.
6. Richard, F.E., Jr., Hall, J.R., Jr., and Woods, R.D., “Vibration of soils and foundations”, Prentice-Hall, New Jersey, 1970.
7. 盧堅, “實用動力基礎分析與設計”, 臺灣商務印書館, 大學叢書, 民國七十三年。
8. 羅博智, “次結構分析土壤－結構互制行為”, 國立交通大學, 碩士論文, 民國九十三年。

表 4-1 各模型分析之結果與解析解之比較(水平方向之勁度)

(a)實部部份

Horizontal		實部																			
解析解		數值解	模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小
			1000		500		400		300		200		200		200		200		200		200
			元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小
w(rad/s)	k(N/m)	w(rad/s)	50	25	25	12.5	50	25	12.5	50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)	
6.283	4.69E+10	6.283	5.24E+10	4.98E+10	4.83E+10	4.71E+10	5.08E+10	4.81E+10	4.67E+10	5.61E+10	5.27E+10	5.10E+10			6.00E+10	5.76E+10	5.61E+10	5.54E+10		1Hz	
12.565	4.43E+10	12.566			4.57E+10	4.47E+10	5.09E+10	4.77E+10	4.65E+10	4.68E+10	4.44E+10	4.37E+10			5.42E+10	4.99E+10	4.81E+10	4.72E+10		2Hz	
18.848	4.31E+10	18.850			4.49E+10	4.40E+10	6.85E+10	4.52E+10	4.44E+10	7.08E+10	4.61E+10	4.50E+10	4.45E+10		6.22E+10	4.21E+10	4.09E+10	4.04E+10		3Hz	
25.130	4.02E+10	25.133				4.07E+10	2.84E+10	4.22E+10	4.06E+10	3.08E+10	4.18E+10	4.01E+10	3.99E+10		2.29E+10	4.18E+10	4.05E+10	4.04E+10		4Hz	
31.413	3.74E+10	31.416				3.79E+10	1.58E+10	4.55E+10	3.78E+10	1.68E+10	4.64E+10	3.84E+10	3.80E+10		5.50E+09	4.52E+10	3.78E+10	3.77E+10		5Hz	
37.695	3.61E+10	37.699					-1.20E+10	1.07E+11	3.69E+10	-9.86E+09	1.07E+11	3.67E+10	3.64E+10		1.12E+09	1.13E+11	3.81E+10	3.76E+10		6Hz	
43.978	3.48E+10	43.982					-4.03E+10	5.96E+10	3.60E+10	-4.56E+10	5.85E+10	3.58E+10	3.48E+10		-3.76E+10	5.77E+10	3.60E+10	3.46E+10	3.44E+10	7Hz	
50.260	3.29E+10	50.265					-1.43E+11	2.62E+10	3.50E+10	-1.43E+11	2.67E+10	3.50E+10	3.30E+10	3.31E+10	-1.46E+10	2.32E+10	3.35E+10	3.15E+10	3.17E+10	8Hz	
56.543	3.08E+10	56.549					-2.76E+11	1.86E+10	3.58E+10	-2.74E+11	1.70E+10	3.59E+10	3.06E+10	3.06E+10	-2.77E+11	1.87E+10	3.56E+10	3.11E+10	3.13E+10	9Hz	
62.826	2.85E+10	62.832					-4.11E+11	3.78E+08	4.15E+10	-4.20E+11	-6.92E+07	4.15E+10	2.85E+10	2.86E+10	-4.05E+11	9.57E+09	4.25E+10	2.91E+10	2.90E+10	10Hz	
69.108	2.65E+10																				
75.391	2.48E+10																				



(b)虛部部份

Horizontal		虛部																			
解析解		數值解	模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小
			1000		500		400		300		200		200		200		200		200		200
			元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小
w(rad/s)	k(N/m)	w(rad/s)	50	25	25	12.5	50	25	12.5	50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)	
6.283	4.10E+10	6.283	5.31E+10	4.69E+10	4.77E+10	4.49E+10	4.96E+10	4.40E+10	4.14E+10	4.94E+10	4.33E+10	4.04E+10			6.09E+10	5.33E+10	4.96E+10	4.78E+10		1Hz	
12.565	7.95E+10	12.566			9.11E+10	8.55E+10	1.02E+11	9.02E+10	8.44E+10	1.03E+11	9.25E+10	8.70E+10			9.71E+10	8.60E+10	8.02E+10	7.75E+10		2Hz	
18.848	1.17E+11	18.850			1.33E+11	1.25E+11	1.48E+11	1.34E+11	1.25E+11	1.47E+11	1.33E+11	1.25E+11	1.21E+11		1.40E+11	1.31E+11	1.24E+11	1.20E+11		3Hz	
25.130	1.53E+11	25.133				1.65E+11	1.44E+11	1.77E+11	1.65E+11	1.49E+11	1.77E+11	1.65E+11	1.60E+11		1.39E+11	1.77E+11	1.66E+11	1.61E+11		4Hz	
31.413	1.92E+11	31.416				2.06E+11	1.70E+11	2.26E+11	2.06E+11	1.67E+11	2.27E+11	2.06E+11	1.99E+11		1.59E+11	2.27E+11	2.07E+11	2.00E+11		5Hz	
37.695	2.30E+11	37.699				1.74E+11	2.86E+11	2.48E+11	1.68E+11	2.86E+11	2.48E+11	2.39E+11			1.70E+11	2.87E+11	2.48E+11	2.39E+11		6Hz	
43.978	2.68E+11	43.982				1.44E+11	1.93E+11	2.89E+11	1.42E+11	1.93E+11	2.89E+11	2.78E+11			1.66E+11	1.86E+11	2.87E+11	2.76E+11	2.72E+11	7Hz	
50.260	3.05E+11	50.265				8.57E+10	2.46E+11	3.31E+11	8.92E+10	2.46E+11	3.31E+11	3.17E+11	3.12E+11		8.58E+10	2.40E+11	3.31E+11	3.17E+11	3.12E+11	8Hz	
56.543	3.42E+11	56.549				7.43E+10	2.71E+11	3.77E+11	6.72E+10	2.70E+11	3.77E+11	3.55E+11	3.49E+11		8.42E+10	2.65E+11	3.78E+11	3.57E+11	3.50E+11	9Hz	
62.826	3.80E+11	62.832				7.13E+10	2.84E+11	4.30E+11	6.65E+10	2.87E+11	4.31E+11	3.95E+11	3.88E+11		8.34E+10	2.82E+11	4.30E+11	3.95E+11	3.88E+11	10Hz	
69.108	4.18E+11																				
75.391	4.55E+11																				

表 4-2 各模型分析之結果與解析解之比較(垂直方向之勁度)

(a)實部部份

Vertical	實部																				
解析解	數值解	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	
		1000	500	400	300	200															
		元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小
w(rad/s)	k(N/m)	w(rad/s)	50	25	25	12.5	50	25	12.5	50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)	
6.283	5.31E+10	6.283	5.81E+10	5.56E+10	5.24E+10	5.15E+10	5.85E+10	5.54E+10	5.40E+10	6.23E+10	6.02E+10	5.90E+10			5.69E+10	5.41E+10	5.28E+10	5.21E+10		1Hz	
12.565	3.71E+10	12.566			3.98E+10	3.90E+10	4.53E+10	4.04E+10	3.88E+10	3.58E+10	3.36E+10	3.31E+10			4.72E+10	4.69E+10	4.61E+10	4.57E+10		2Hz	
18.848	3.13E+10	18.850			3.53E+10	3.29E+10	3.21E+10	3.64E+10	3.35E+10	3.62E+10	3.68E+10	3.30E+10	3.19E+10		3.62E+10	3.38E+10	2.99E+10	2.87E+10		3Hz	
25.130	3.23E+10	25.133				3.49E+10	3.59E+10	3.83E+10	3.42E+10	3.31E+10	3.85E+10	3.66E+10	3.57E+10		2.87E+10	3.07E+10	2.85E+10	2.84E+10		4Hz	
31.413	3.23E+10	31.416				3.45E+10	2.60E+10	3.72E+10	3.32E+10	2.50E+10	3.81E+10	3.39E+10	3.28E+10		2.54E+10	4.09E+10	4.14E+10	4.05E+10		5Hz	
37.695	2.79E+10	37.699					-1.63E+10	2.09E+10	2.90E+10	5.33E+09	2.20E+10	3.05E+10	2.89E+10		4.13E+09	2.98E+10	3.21E+10	2.89E+10		6Hz	
43.978	2.03E+10	43.982					8.65E+10	7.89E+09	2.25E+10	9.07E+10	4.86E+09	2.34E+10	2.06E+10		1.30E+11	-1.84E+08	1.50E+10	1.39E+10	1.41E+10	7Hz	
50.260	1.45E+10	50.265					-3.78E+10	2.43E+10	1.82E+10	-3.26E+10	3.08E+10	1.95E+10	1.76E+10	1.72E+10	-6.06E+10	1.67E+10	1.99E+10	1.88E+10	1.85E+10	8Hz	
56.543	1.22E+10	56.549					-1.30E+11	7.10E+10	1.71E+10	-1.55E+11	6.81E+10	1.66E+10	1.30E+10	1.25E+10	-7.99E+10	7.58E+10	2.18E+10	1.61E+10	1.49E+10	9Hz	
62.826	1.06E+10	62.832					-1.93E+11	1.75E+10	1.55E+10	-1.87E+11	1.69E+10	1.64E+10	1.29E+10	1.18E+10	-2.12E+11	7.91E+09	1.29E+10	8.93E+09	8.40E+09	10Hz	
69.108	7.25E+09																				
75.391	2.18E+09																				



(b)虛部部份

Vertical	虛部																				
解析解	數值解	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	模型大小	
		1000	500	400	300	200															
		元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小	元素大小
w(rad/s)	k(N/m)	w(rad/s)	50	25	25	12.5	50	25	12.5	50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)	
6.283	6.87E+10	6.283	8.39E+10	7.59E+10	7.91E+10	7.53E+10	7.86E+10	7.10E+10	6.75E+10	8.98E+10	8.07E+10	7.64E+10			8.12E+10	7.43E+10	7.08E+10	6.90E+10		1Hz	
12.565	1.45E+11	12.566			1.63E+11	1.54E+11	1.73E+11	1.58E+11	1.50E+11	1.76E+11	1.64E+11	1.56E+11			1.79E+11	1.64E+11	1.54E+11	1.50E+11		2Hz	
18.848	2.28E+11	18.850			2.53E+11	2.41E+11	2.68E+11	2.52E+11	2.40E+11	2.66E+11	2.49E+11	2.37E+11	2.31E+11		2.65E+11	2.46E+11	2.34E+11	2.28E+11		3Hz	
25.130	3.06E+11	25.133				3.24E+11	3.67E+11	3.36E+11	3.23E+11	3.65E+11	3.41E+11	3.27E+11	3.18E+11		3.50E+11	3.38E+11	3.27E+11	3.20E+11		4Hz	
31.413	3.78E+11	31.416				3.99E+11	3.98E+11	4.10E+11	4.00E+11	4.08E+11	4.09E+11	4.00E+11	3.91E+11		4.18E+11	4.14E+11	4.01E+11	3.90E+11		5Hz	
37.695	4.49E+11	37.699					5.90E+11	4.77E+11	4.74E+11	5.62E+11	4.81E+11	4.74E+11	4.63E+11		5.67E+11	4.83E+11	4.71E+11	4.60E+11		6Hz	
43.978	5.22E+11	43.982					4.48E+11	5.92E+11	5.51E+11	4.48E+11	5.87E+11	5.51E+11	5.38E+11		4.68E+11	5.74E+11	5.51E+11	5.41E+11	5.34E+11	7Hz	
50.260	6.00E+11	50.265					4.84E+11	6.79E+11	6.32E+11	4.96E+11	6.81E+11	6.32E+11	6.20E+11	6.12E+11	4.82E+11	6.82E+11	6.33E+11	6.19E+11	6.11E+11	8Hz	
56.543	6.77E+11	56.549					5.41E+11	7.29E+11	7.11E+11	5.51E+11	7.29E+11	7.09E+11	6.99E+11	6.90E+11	5.65E+11	7.35E+11	7.11E+11	6.98E+11	6.89E+11	9Hz	
62.826	7.51E+11	62.832					6.33E+11	7.60E+11	7.85E+11	6.08E+11	7.61E+11	7.87E+11	7.74E+11	7.65E+11	5.87E+11	7.74E+11	7.83E+11	7.75E+11	7.66E+11	10Hz	
69.108	8.24E+11																				
75.391	8.97E+11																				



表 4-4 各模型分析之結果與解析解之比較(扭轉方向之勁度)

(a)實部部份

Torsion		實部																						
解析解	數值解	模型大小 1000				模型大小 500				模型大小 400				模型大小 300				模型大小 200						
		元素大小 50		25	25	元素大小 12.5		50	25	12.5	元素大小 50		25	12.5	元素大小 6.25		3.125	元素大小 50		25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)
6.283	1.61E+14	6.283	2.21E+14	1.89E+14	1.90E+14	1.76E+14	2.19E+14	1.88E+14	1.73E+14	2.22E+14	1.90E+14	1.75E+14						2.37E+14	2.04E+14	1.88E+14	1.80E+14			1Hz
12.565	1.31E+14	12.566			1.54E+14	1.42E+14	1.86E+14	1.54E+14	1.42E+14	1.86E+14	1.54E+14	1.43E+14						1.86E+14	1.54E+14	1.41E+14	1.36E+14			2Hz
18.848	1.20E+14	18.850			1.43E+14	1.31E+14	1.88E+14	1.43E+14	1.31E+14	1.88E+14	1.42E+14	1.30E+14						1.86E+14	1.43E+14	1.31E+14	1.25E+14			3Hz
25.130	1.22E+14	25.133				1.33E+14	1.20E+14	1.49E+14	1.33E+14	1.28E+14	1.49E+14	1.34E+14						1.24E+14	1.47E+14	1.32E+14	1.27E+14			4Hz
31.413	1.23E+14	31.416				1.34E+14	2.19E+13	1.59E+14	1.34E+14	2.68E+13	1.59E+14	1.35E+14						1.64E+13	1.59E+14	1.34E+14	1.29E+14			5Hz
37.695	1.21E+14	37.699					-6.46E+13	2.11E+14	1.31E+14	-4.99E+13	2.10E+14	1.31E+14						-3.74E+13	2.10E+14	1.31E+14	1.25E+14			6Hz
43.978	1.18E+14	43.982					-9.45E+13	1.90E+14	1.29E+14	-9.74E+13	1.90E+14	1.29E+14						-1.08E+14	1.92E+14	1.31E+14	1.24E+14	1.22E+14		7Hz
50.260	1.14E+14	50.265					-2.81E+14	9.33E+13	1.28E+14	-2.83E+14	9.25E+13	1.27E+14						-3.00E+14	9.36E+13	1.27E+14	1.17E+14	1.15E+14		8Hz
56.543	1.10E+14	56.549					-5.83E+14	5.62E+13	1.29E+14	-5.83E+14	5.70E+13	1.29E+14						-5.85E+14	5.26E+13	1.27E+14	1.14E+14	1.12E+14		9Hz
62.826	1.07E+14	62.832					-8.95E+14	6.22E+12	1.39E+14	-9.00E+14	2.64E+12	1.38E+14						-8.66E+14	1.73E+13	1.40E+14	1.12E+14	1.10E+14		10Hz
69.108	1.04E+14																							
75.391	1.01E+14																							



(b)虛部部份

Torsion		虛部																						
解析解	數值解	模型大小 1000				模型大小 500				模型大小 400				模型大小 300				模型大小 200						
		元素大小 50		25	25	元素大小 12.5		50	25	12.5	元素大小 50		25	12.5	元素大小 6.25		3.125	元素大小 50		25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)
6.283	4.55E+13	6.283	7.44E+13	5.87E+13	5.90E+13	5.21E+13	7.59E+13	6.00E+13	5.30E+13	6.83E+13	5.39E+13	4.77E+13						8.79E+13	6.75E+13	5.85E+13	5.44E+13			1Hz
12.565	1.14E+14	12.566			1.46E+14	1.29E+14	1.80E+14	1.47E+14	1.30E+14	1.79E+14	1.46E+14	1.29E+14						1.73E+14	1.43E+14	1.26E+14	1.19E+14			2Hz
18.848	1.91E+14	18.850			2.44E+14	2.17E+14	2.52E+14	2.44E+14	2.18E+14	2.54E+14	2.43E+14	2.17E+14						2.53E+14	2.40E+14	2.15E+14	2.02E+14			3Hz
25.130	2.63E+14	25.133				2.97E+14	2.71E+14	3.29E+14	2.97E+14	2.69E+14	3.29E+14	2.97E+14						2.47E+14	3.30E+14	2.98E+14	2.82E+14			4Hz
31.413	3.25E+14	31.416				3.67E+14	2.96E+14	4.05E+14	3.67E+14	3.09E+14	4.06E+14	3.67E+14						2.94E+14	4.04E+14	3.66E+14	3.46E+14			5Hz
37.695	3.86E+14	37.699					3.74E+14	4.80E+14	4.37E+14	3.70E+14	4.80E+14	4.37E+14						3.98E+14	4.87E+14	4.38E+14	4.14E+14			6Hz
43.978	4.49E+14	43.982					3.57E+14	3.58E+14	5.08E+14	3.51E+14	3.57E+14	5.08E+14						3.91E+14	3.52E+14	5.07E+14	4.78E+14	4.64E+14		7Hz
50.260	5.10E+14	50.265					2.08E+14	4.37E+14	5.79E+14	2.07E+14	4.38E+14	5.78E+14						5.30E+14	2.12E+14	4.28E+14	5.78E+14	5.44E+14	5.29E+14	8Hz
56.543	5.73E+14	56.549					1.55E+14	4.82E+14	6.56E+14	1.54E+14	4.77E+14	6.55E+14						2.05E+14	4.78E+14	6.57E+14	6.14E+14	5.96E+14		9Hz
62.826	6.36E+14	62.832					1.48E+14	5.11E+14	7.40E+14	1.42E+14	5.14E+14	7.38E+14						6.61E+14	2.01E+14	5.21E+14	7.41E+14	6.80E+14	6.61E+14	10Hz
69.108	6.99E+14																							
75.391	7.61E+14																							

表 4-5 各模型分析之結果與解析解之比較(耦合方向之勁度)

(a)實部份

Coupling		實部																							
解析解		數值解		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小	
				1000		500		400		300						200									
				元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小	
w(rad/s)	k(N*m/m)	w(rad/s)	50	25	25	12.5	50	25	12.5	50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)					
6.283	3.17E+11	6.283	3.36E+11	3.20E+11	3.43E+11	3.35E+11	3.61E+11	3.40E+11	3.32E+11	2.96E+11	2.92E+11	2.92E+11			1.79E+11	1.82E+11	1.87E+11	1.91E+11		1Hz					
12.565	2.86E+11	12.566			2.80E+11	2.81E+11	2.27E+11	2.48E+11	2.57E+11	2.88E+11	3.03E+11	3.05E+11			1.57E+11	2.15E+11	2.35E+11	2.45E+11		2Hz					
18.848	1.12E+11	18.850			3.21E+10	6.40E+10	-3.54E+10	3.27E+10	6.68E+10	-3.71E+10	1.69E+10	5.47E+10	7.29E+10		1.47E+11	1.26E+11	1.44E+11	1.55E+11		3Hz					
25.130	-4.96E+10	25.133				-8.52E+10	2.92E+11	-1.42E+11	-1.02E+11	2.65E+11	-9.26E+10	-7.29E+10	-6.56E+10		3.56E+11	-1.18E+11	-7.15E+10	-5.83E+10		4Hz					
31.413	-7.62E+10	31.416				-1.01E+11	-5.79E+10	-1.69E+11	-8.97E+10	-1.00E+11	-2.02E+11	-7.65E+10	-6.60E+10		-1.80E+11	-2.15E+11	-1.30E+11	-1.31E+11		5Hz					
37.695	-1.55E+10	37.699					-8.34E+11	-3.56E+11	-2.49E+10	-7.94E+11	-3.26E+11	-5.29E+10	-4.03E+10		4.46E+11	-3.37E+11	-7.41E+10	4.99E+10		6Hz					
43.978	3.45E+10	43.982					-5.07E+11	4.07E+11	2.54E+09	-5.24E+11	3.79E+11	1.61E+10	3.36E+10		-5.08E+11	2.96E+11	4.88E+10	8.15E+10	8.55E+10	7Hz					
50.260	3.43E+10	50.265					1.52E+11	6.26E+11	-2.86E+10	8.22E+10	6.63E+11	-3.15E+10	6.52E+09	1.18E+10	3.04E+11	6.73E+11	-5.05E+08	1.35E+10	1.23E+10	8Hz					
56.543	-4.74E+09	56.549					2.48E+11	4.18E+11	-1.03E+11	3.96E+11	4.08E+11	-9.98E+10	-1.37E+10	-3.22E+09	6.02E+11	5.55E+11	-1.30E+11	-5.47E+10	-3.90E+10	9Hz					
62.826	-3.83E+10	62.832					7.91E+11	-1.01E+11	-1.91E+11	6.24E+11	-8.65E+10	-1.93E+11	-6.64E+10	-5.57E+10	4.69E+11	-2.71E+11	-2.02E+11	-2.88E+10	-1.72E+10	10Hz					
69.108	-3.59E+10																								
75.391	-1.27E+10																								



(b)虛部份

Coupling		虛部																							
解析解		數值解		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小		模型大小	
				1000		500		400		300						200									
				元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小		元素大小	
w(rad/s)	k(N*m/m)	w(rad/s)	50	25	25	12.5	50	25	12.5	50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	6.25	3.125	赫茲(f)					
6.283	-3.40E+10	6.283	-1.32E+11	-7.71E+10	-7.87E+10	-5.62E+10	-1.02E+11	-5.68E+10	-3.75E+10	-8.28E+10	-4.04E+10	-2.28E+10			-3.24E+11	-2.31E+11	-1.84E+11	-1.62E+11		1Hz					
12.565	-1.99E+11	12.566			-3.31E+11	-2.74E+11	-4.36E+11	-3.02E+11	-2.43E+11	-4.49E+11	-3.29E+11	-2.72E+11			-2.04E+11	-1.66E+11	-1.26E+11	-1.08E+11		2Hz					
18.848	-2.91E+11	18.850			-4.25E+11	-3.52E+11	-4.92E+11	-4.19E+11	-3.43E+11	-4.79E+11	-4.14E+11	-3.36E+11	-3.05E+11		-3.94E+11	-4.16E+11	-3.55E+11	-3.27E+11		3Hz					
25.130	-2.17E+11	25.133				-2.81E+11	-5.72E+11	-3.51E+11	-2.67E+11	-4.38E+11	-3.56E+11	-3.00E+11	-2.72E+11		-7.06E+11	-3.76E+11	-3.02E+11	-2.78E+11		4Hz					
31.413	-8.49E+10	31.416				-1.54E+11	-1.07E+12	-2.44E+11	-1.56E+11	-1.09E+12	-2.28E+11	-1.39E+11	-1.12E+11		-8.00E+11	-2.56E+11	-1.87E+11	-1.48E+11		5Hz					
37.695	-2.42E+10	37.699					-9.36E+11	6.63E+10	-1.05E+11	-7.51E+11	3.38E+10	-1.17E+11	-6.01E+10		4.46E+11	6.24E+10	-7.83E+10	-1.58E+10		6Hz					
43.978	-4.05E+10	43.982					1.26E+11	9.94E+10	-1.55E+11	4.45E+10	1.17E+11	-1.63E+11	-9.85E+10		-1.18E+11	8.52E+10	-1.21E+11	-7.88E+10	-6.05E+10	7Hz					
50.260	-8.15E+10	50.265					-1.06E+11	-2.26E+11	-2.17E+11	-1.48E+11	-2.65E+11	-2.29E+11	-1.57E+11	-1.24E+11	-2.07E+11	-7.97E+10	-2.48E+11	-1.83E+11	-1.49E+11	8Hz					
56.543	-9.72E+10	56.549					-5.49E+11	-1.20E+12	-2.45E+11	-5.17E+11	-1.14E+12	-2.29E+11	-1.55E+11	-1.26E+11	-7.02E+11	-1.17E+12	-2.62E+11	-1.48E+11	-1.10E+11	9Hz					
62.826	-7.16E+10	62.832					-1.08E+12	-8.41E+11	-2.12E+11	-1.18E+12	-9.08E+11	-2.23E+11	-1.40E+11	-1.02E+11	-1.31E+12	-9.72E+11	-1.99E+11	-1.30E+11	-1.04E+11	10Hz					
69.108	-3.54E+10																								
75.391	-2.28E+10																								

表 4-6 各模型元素(Elements)與節點(Nodes)數

		元素大小									
		50		25		12.5		6.25		3.125	
		Elements	Nodes	Elements	Nodes	Elements	Nodes	Elements	Nodes	Elements	Nodes
模型尺寸	200	37	181	212	904	1360	5524	9536	38212	70912	283396
	300	100	449	616	2552	4192	16916	30592	122564	232960	931844
	400	209	901	1348	5512	9488	38164				
	500			2504	10168	18016	72340				
	1000	2501	10165	18004	72328						

表 4-7 各模型所需資源與運算時間

模型尺寸		所需時間(sec)																
		200					300					400			500		1000	
		50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	6.25	3.125	50	25	12.5	25	12.5	50	25
硬體設備	個人 PC	1	2	98	*	*	1	10	660	*	*	2	102	3482	150	*	85	6131
	高速 A	-	-	-	1172	44966	-	-	-	10045	3.8E+05	-	-	2497	-	5035	-	-
	高速 B	-	-	-	-	233866	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-	-
	高速 C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-	-

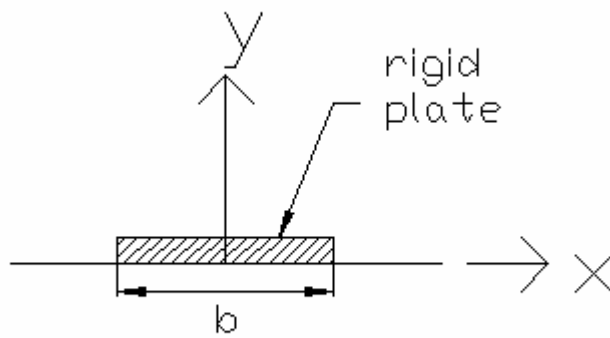
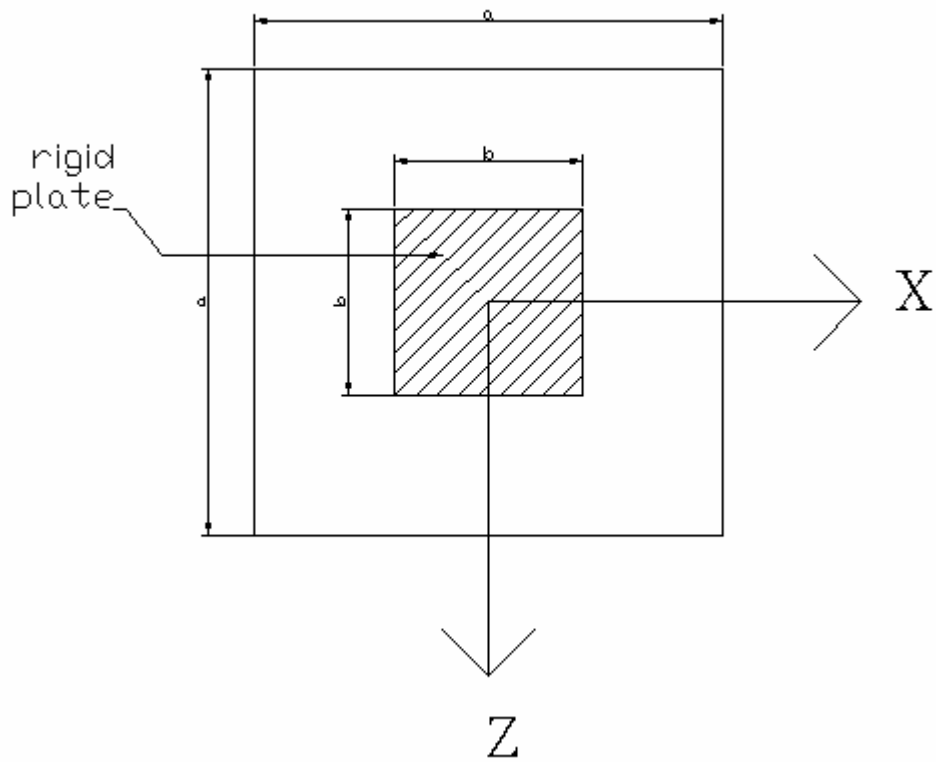
註：\*表資源不足  
-表未經測試

表 4-8 硬體設備說明

電腦分類	個人 PC	國家高速電腦 A	國家高速電腦 B	國家高速電腦 C
名稱	學校電腦	IBM P690 Regatta (Power 4 Dual Core Chip)	HP Superdome (Hermes)	SGI Origin 3800 (scorpio)
CPU 規格	Pentium(R) 4 CPU 3.41GHz (1 CPU)	Rmax : 415.2 GFLOPS (96 CPUs) Rpeak : 729.6 GFLOPS (96 CPUs)	Intel Itanium 2 CPU 1.5GHz (128 CPUs)	MIPS R12000 超純量 CPU 400MHz (48 CPUs)
記憶體大小	2GB	約 192GB	256GB	48GB

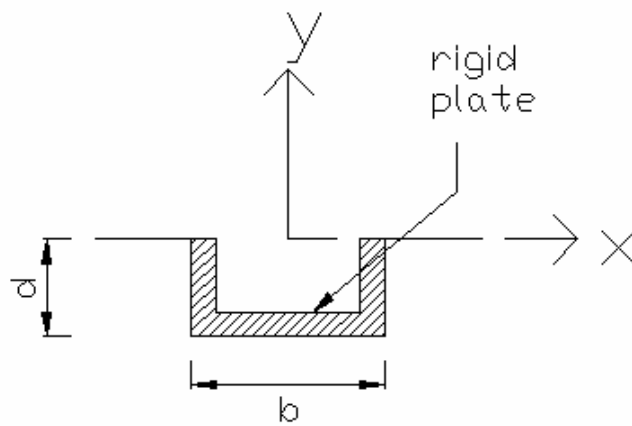
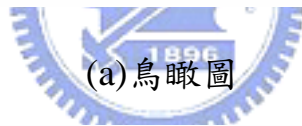
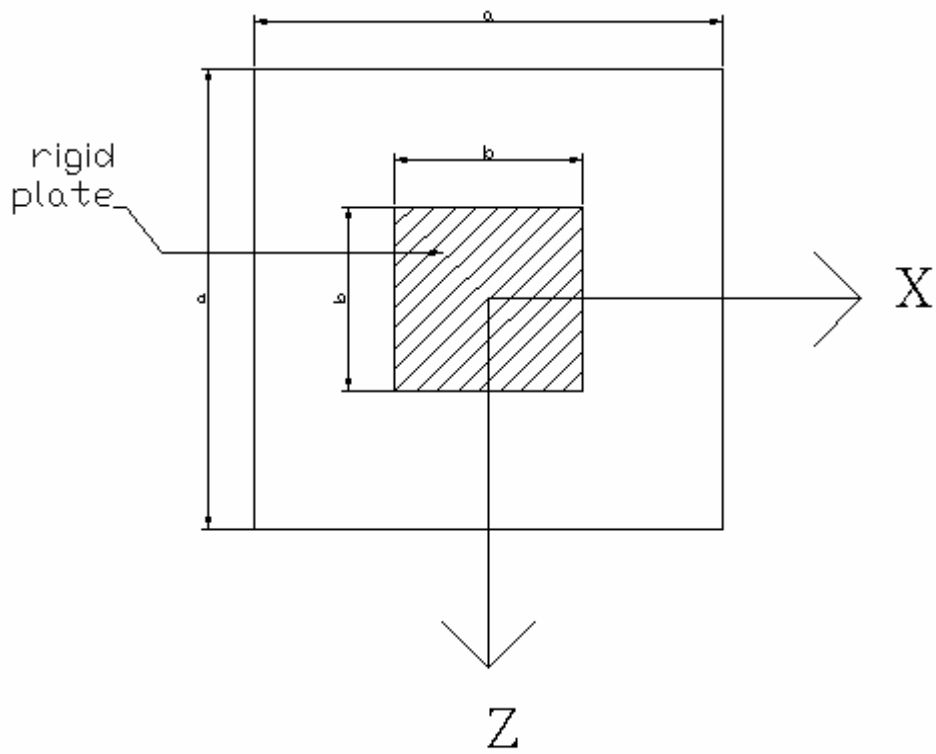
註：詳細資料請參考國家高速網路與計算中心(網址：<http://www.nchc.org.tw/>)





(b) 側視圖

圖 3-1 表面剛性基礎之幾何形狀



(b) 側視圖

圖 3-2 沉埋剛性基礎之幾何形狀

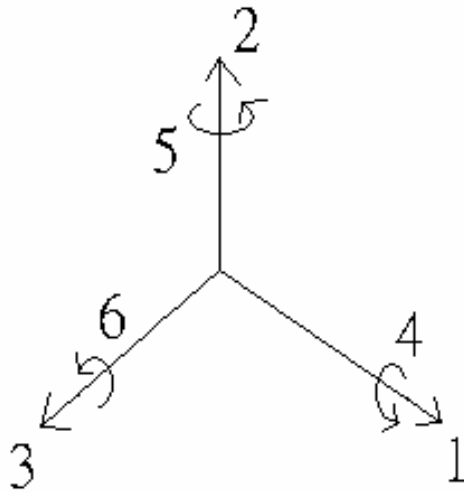
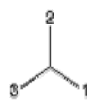
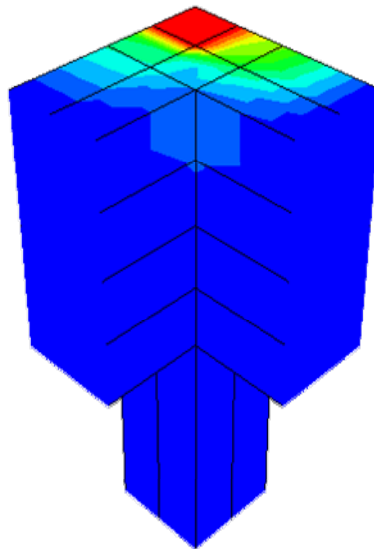
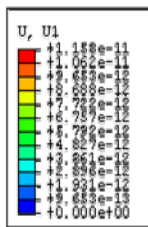


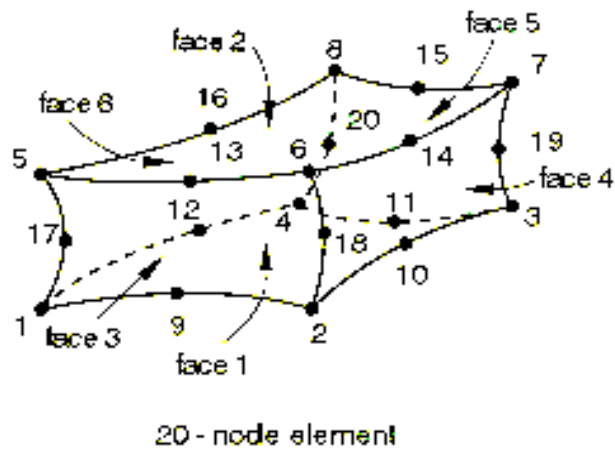
圖 3-3 ABAQUS 座標系統之表示

(參考文獻【1】)



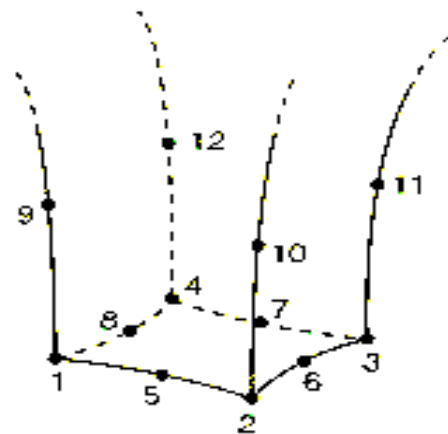
ODB: H,200,50,0.05,1.odb ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1 Tue Nov 08 21:16:48 GMT+08:00 2005  
 Step: Step-1  
 Increment: 1: Frequency = 1.000  
 Primary Var: U, U1 Complex: Magnitude  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e-09

圖 3-4 ABAQUS 四分之一模型示意圖



20 - node element

(a)三維實體元素(Quadratic element)



CIN3D12R

(b)三維實體無限元素(Infinite element)

圖 3-5 使用元素示意圖

(參考文獻【1】)

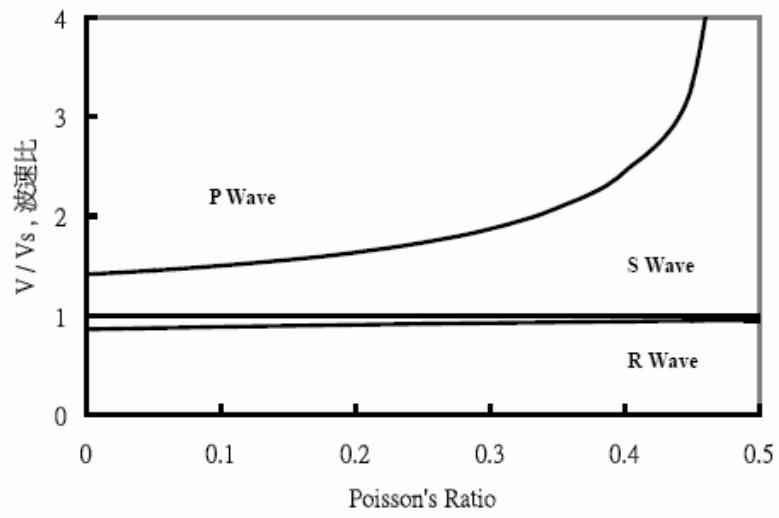
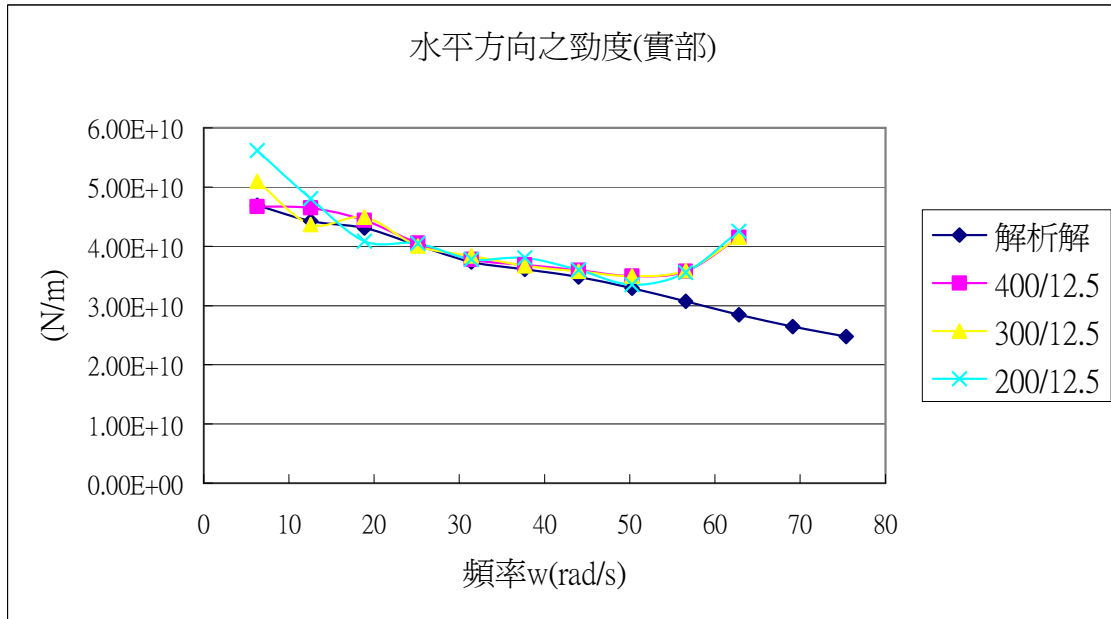


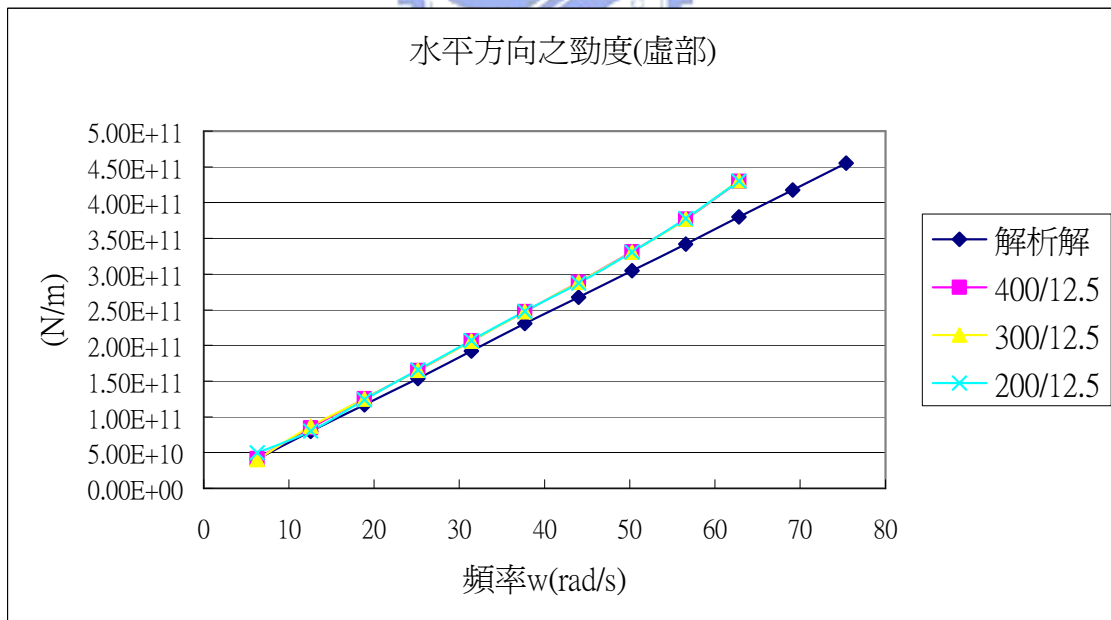
圖 3-6 各彈性波與柏松比所對應之比例關係

(參考文獻【6、7】)



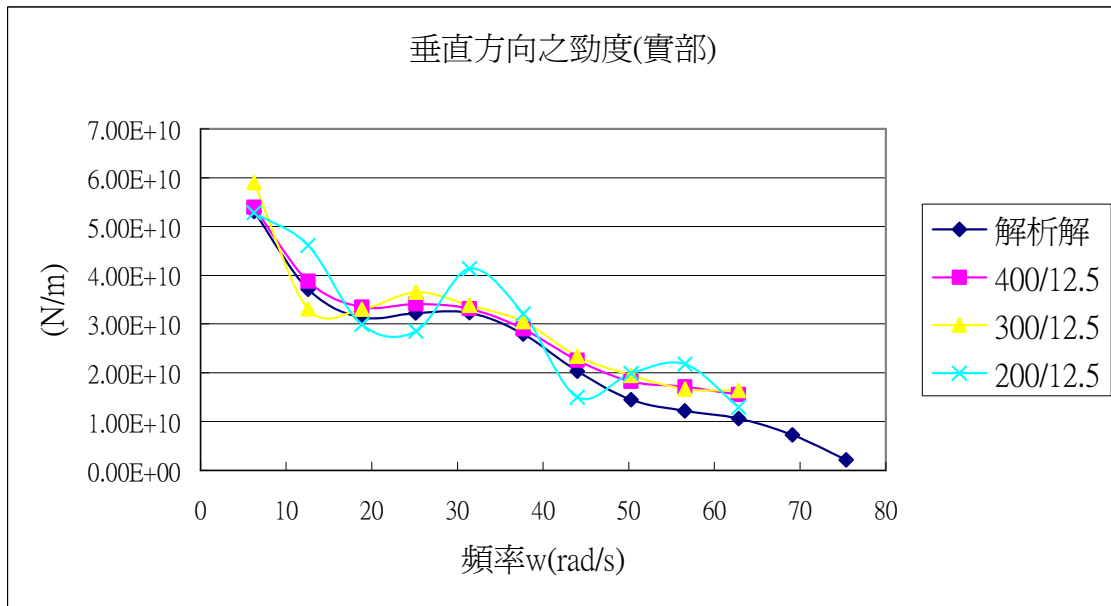


(a) 實部部份

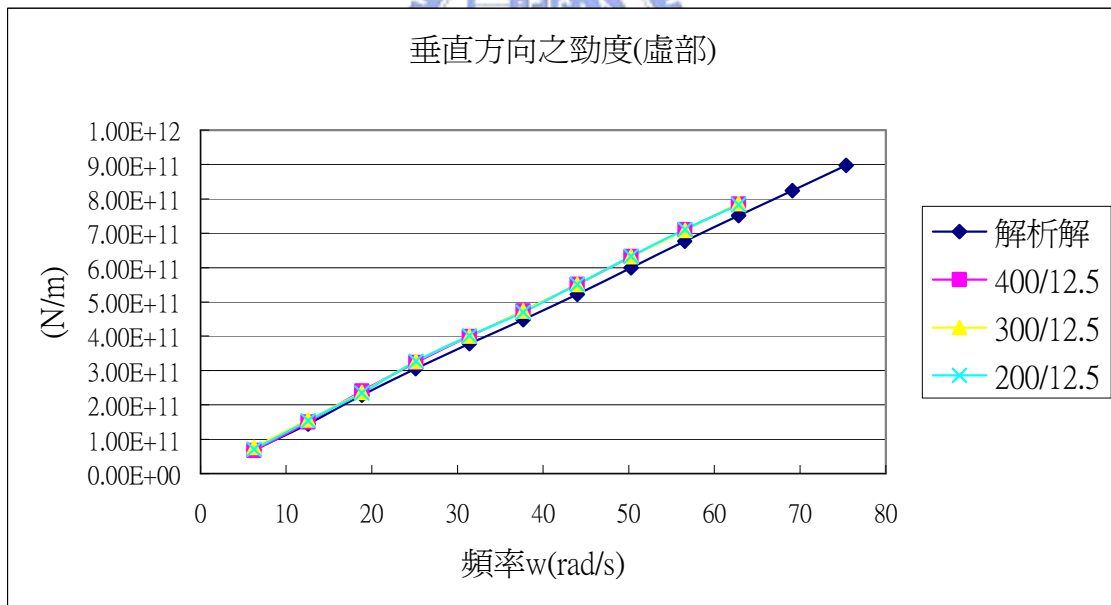


(b) 虛部部份

圖 4-1 模型尺寸之收斂性分析(水平方向之勁度)

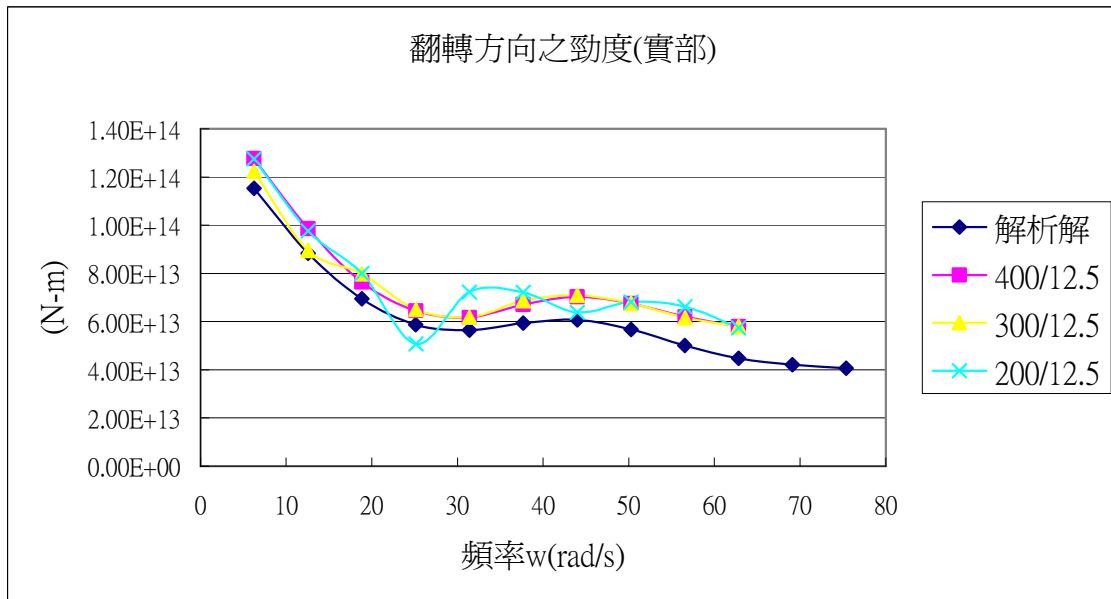


(a)實部份

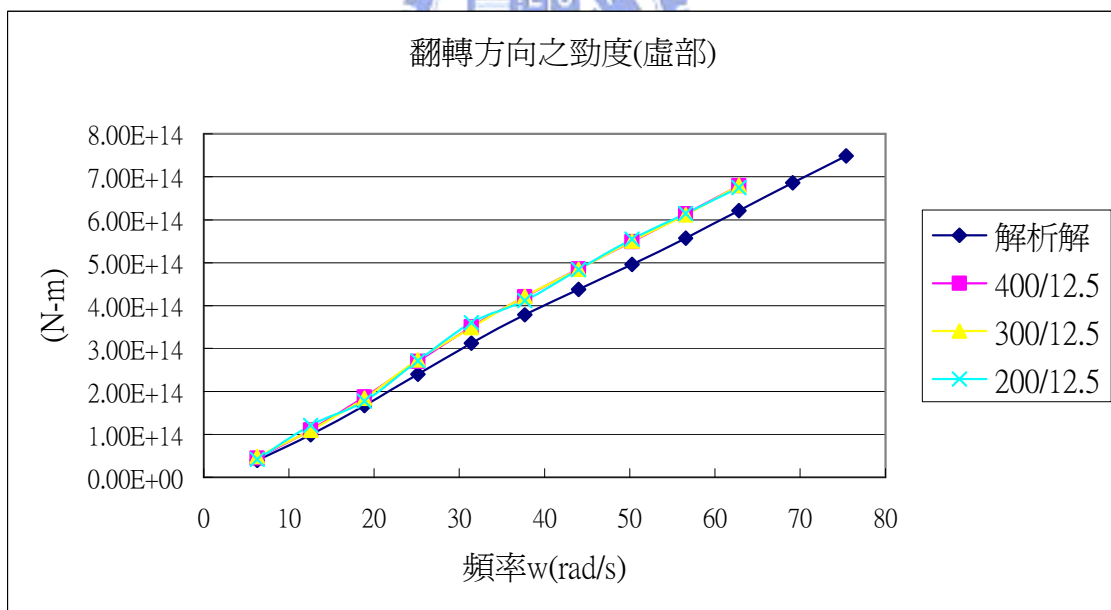


(b)虛部份

圖 4-2 模型尺寸之收斂性分析(垂直方向之勁度)



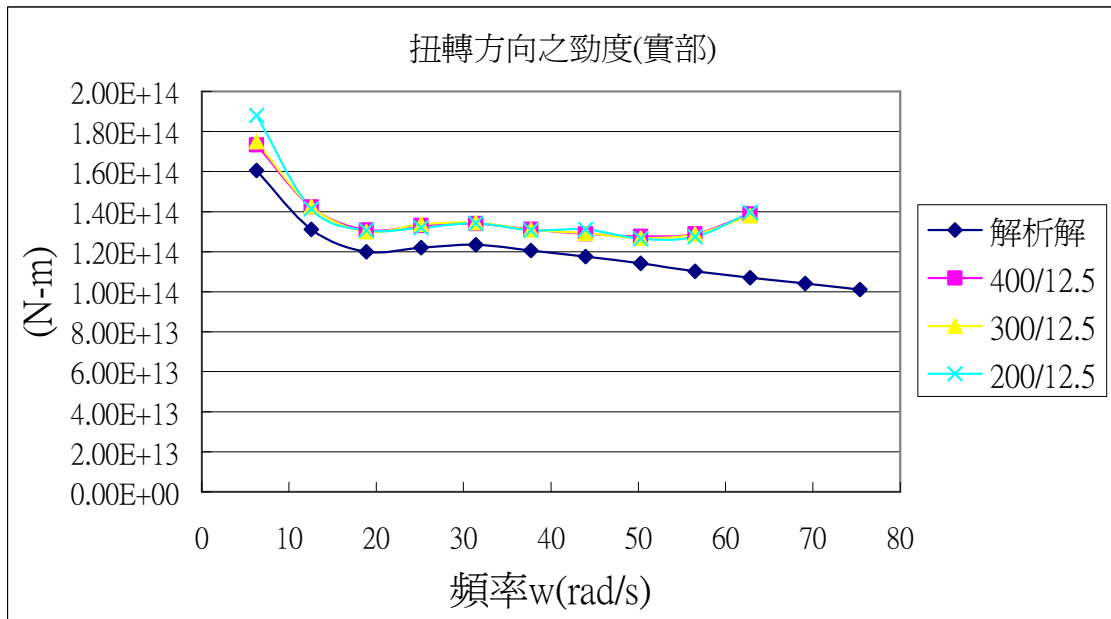
(a)實部份



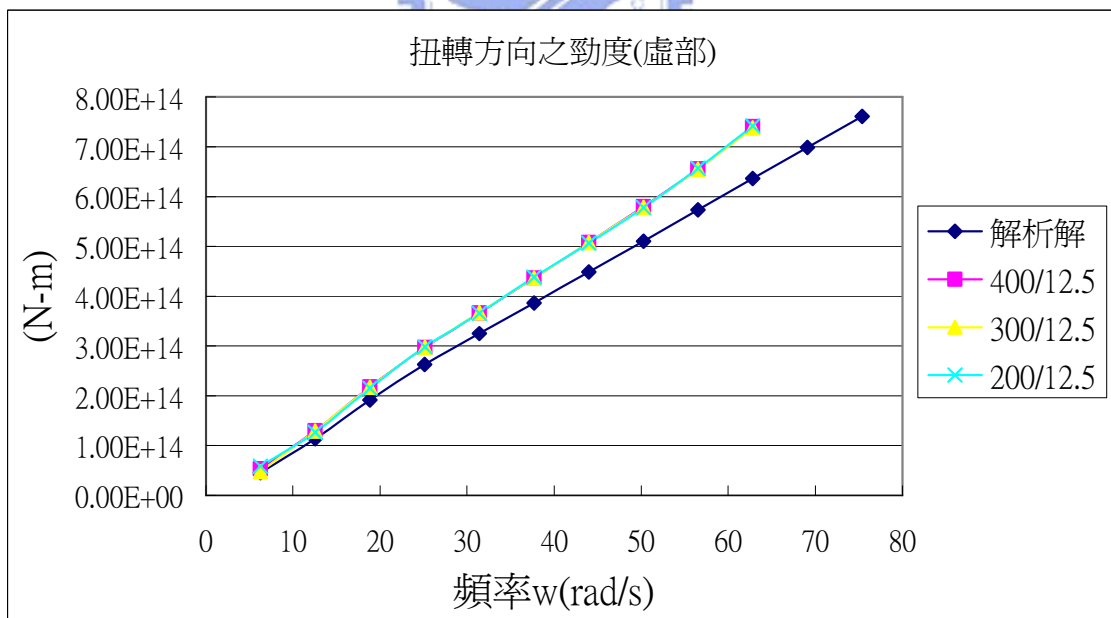
(b)虛部份

圖 4-3 模型尺寸之收斂性分析(翻轉方向之勁度)



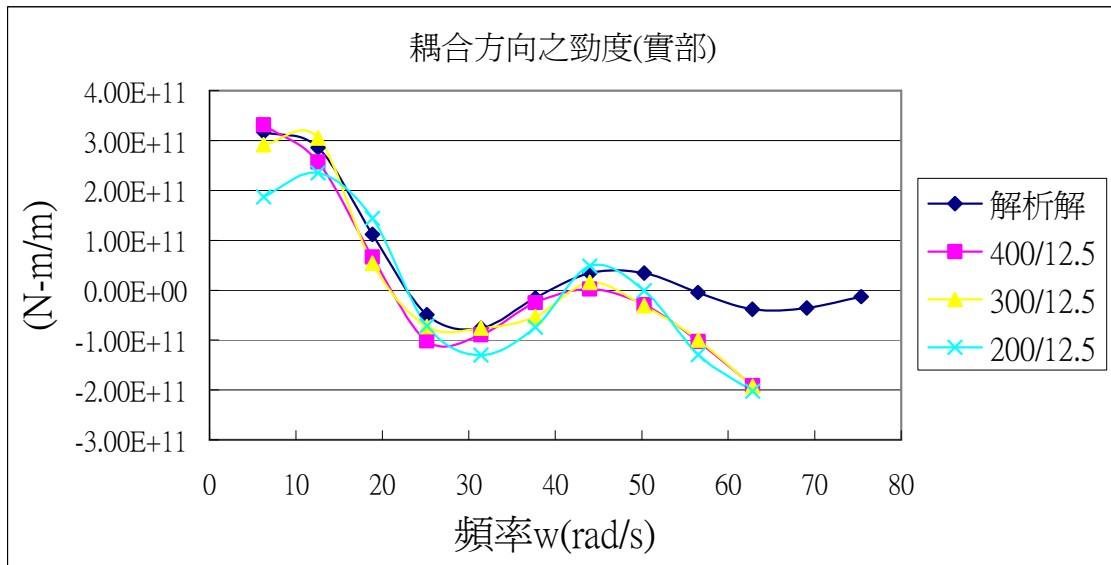


(a) 實部部份

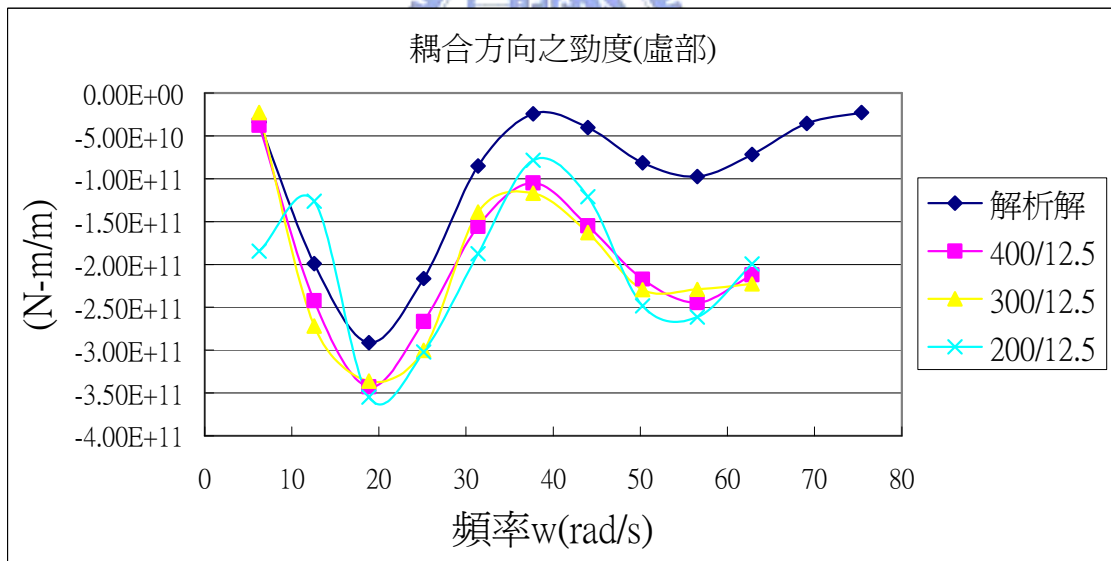


(b) 虛部部份

圖 4-4 模型尺寸之收斂性分析(扭轉方向之勁度)

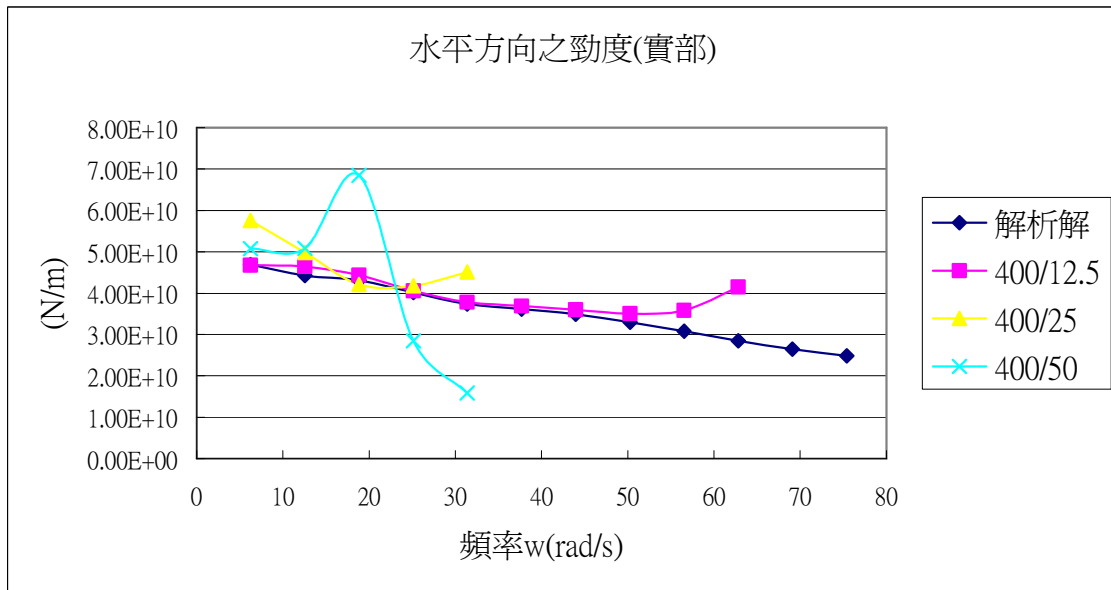


(a)實部份

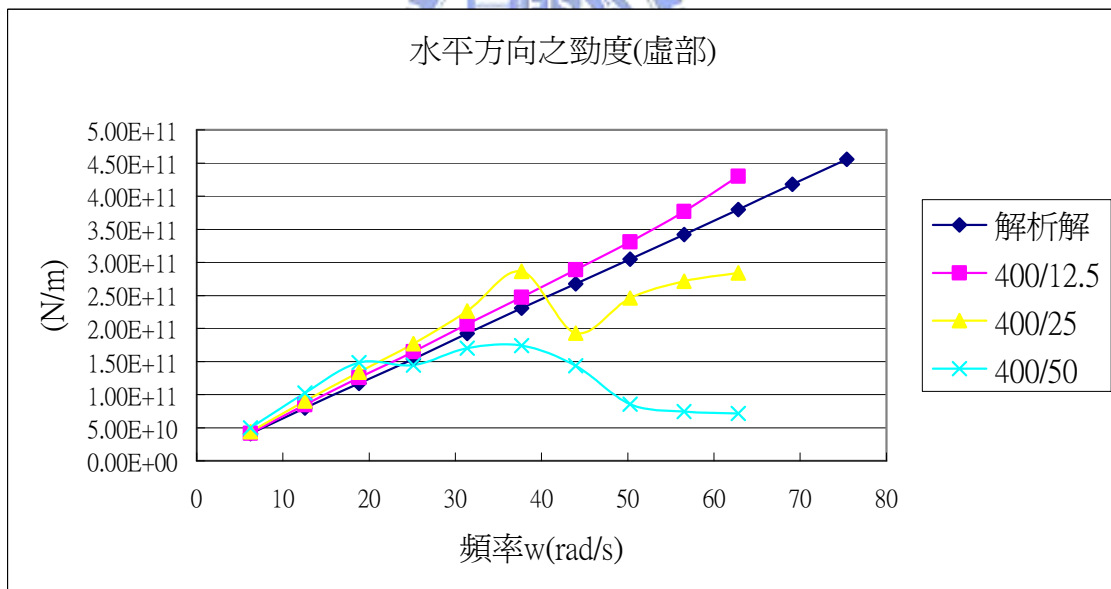


(b)虛部份

圖 4-5 模型尺寸之收斂性分析(耦合方向之勁度)

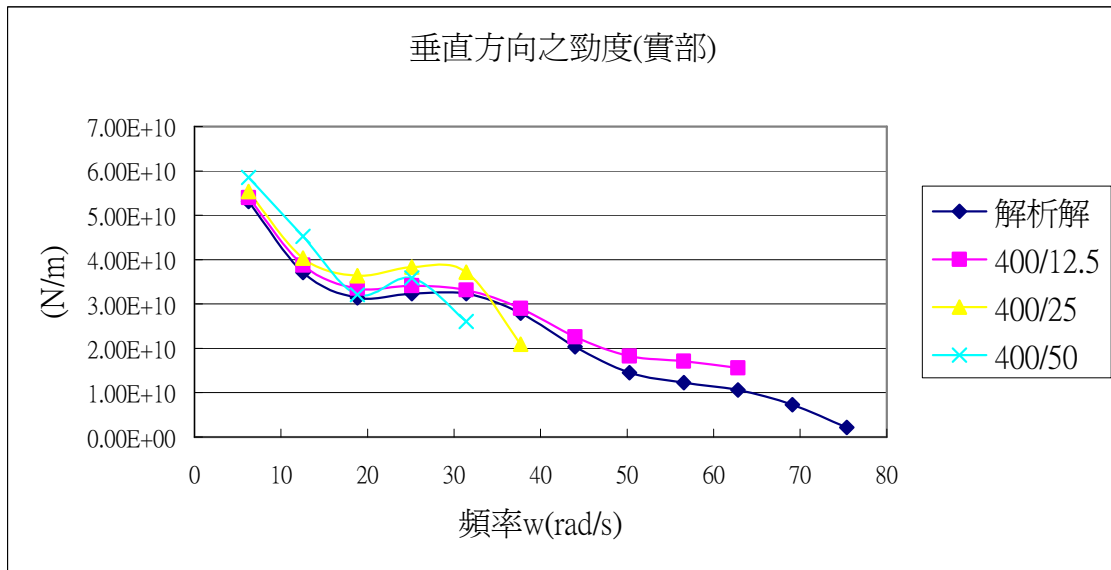


(a)實部份

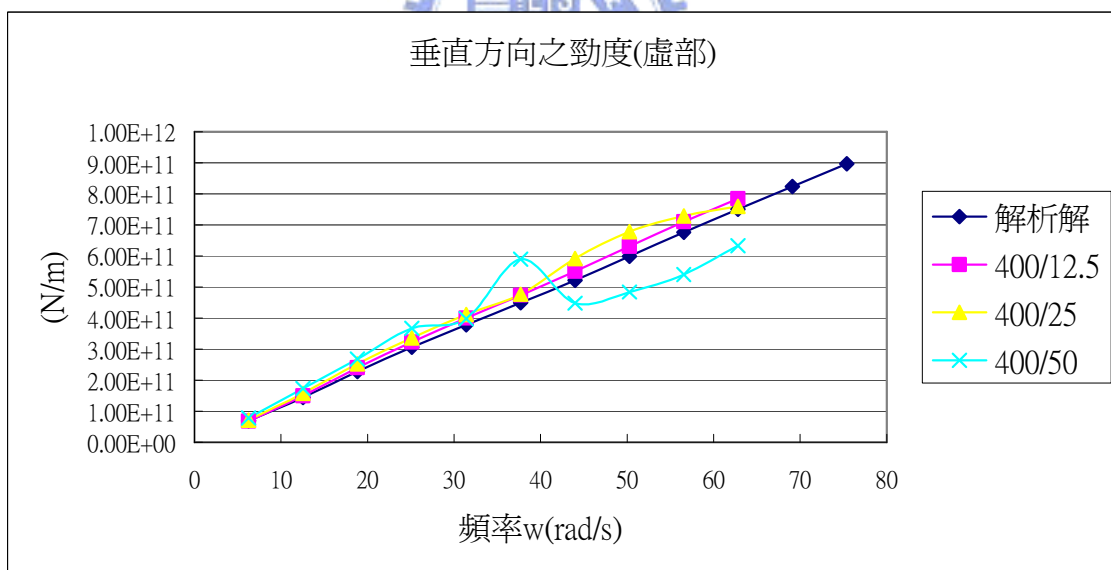


(b)虛部份

圖 4-6 元素大小之收斂性分析(水平方向之勁度)

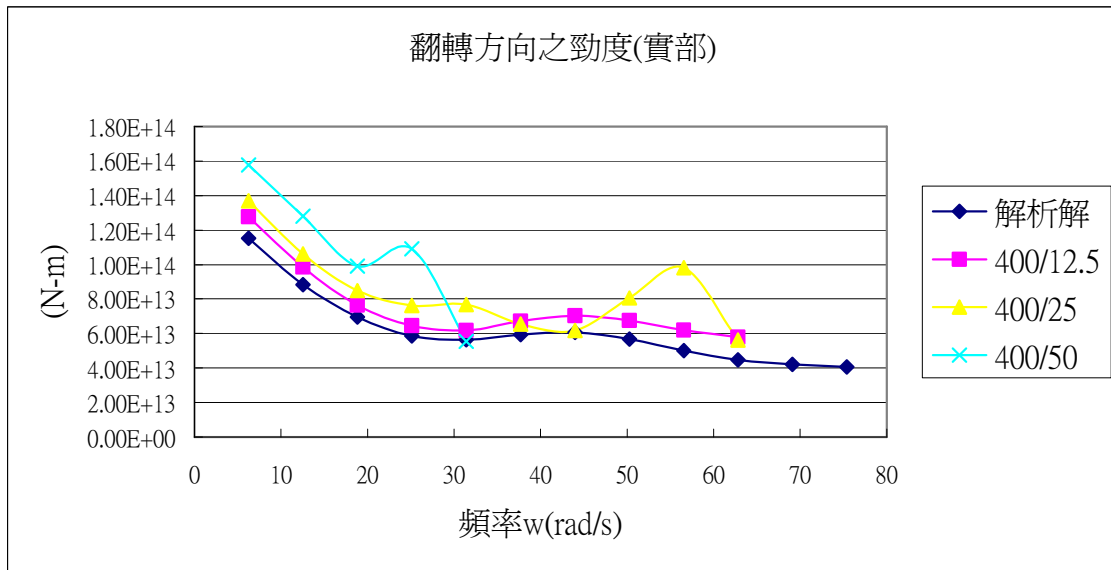


(a)實部份

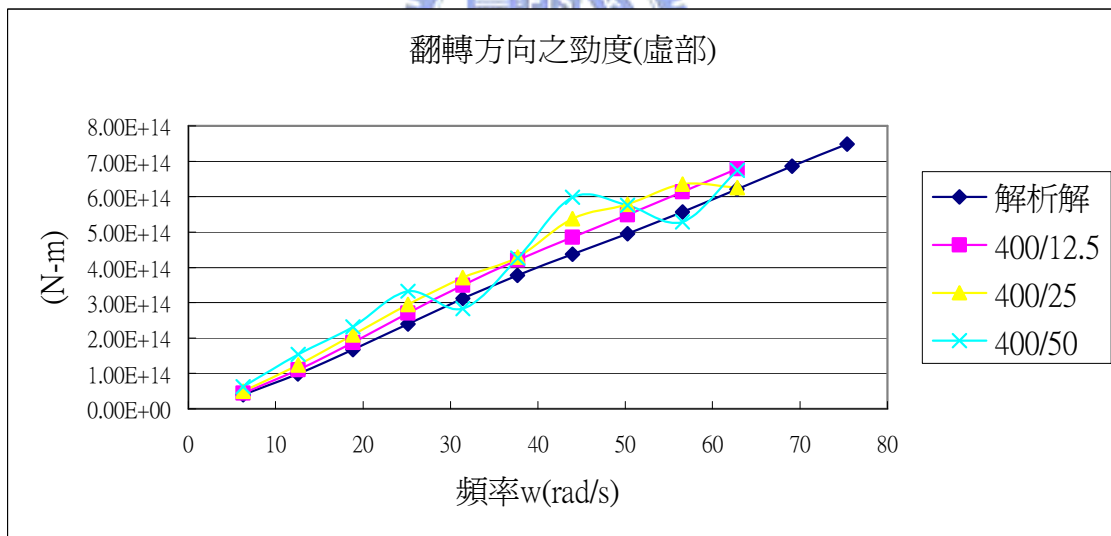


(b)虛部份

圖 4-7 元素大小之收斂性分析(垂直方向之勁度)

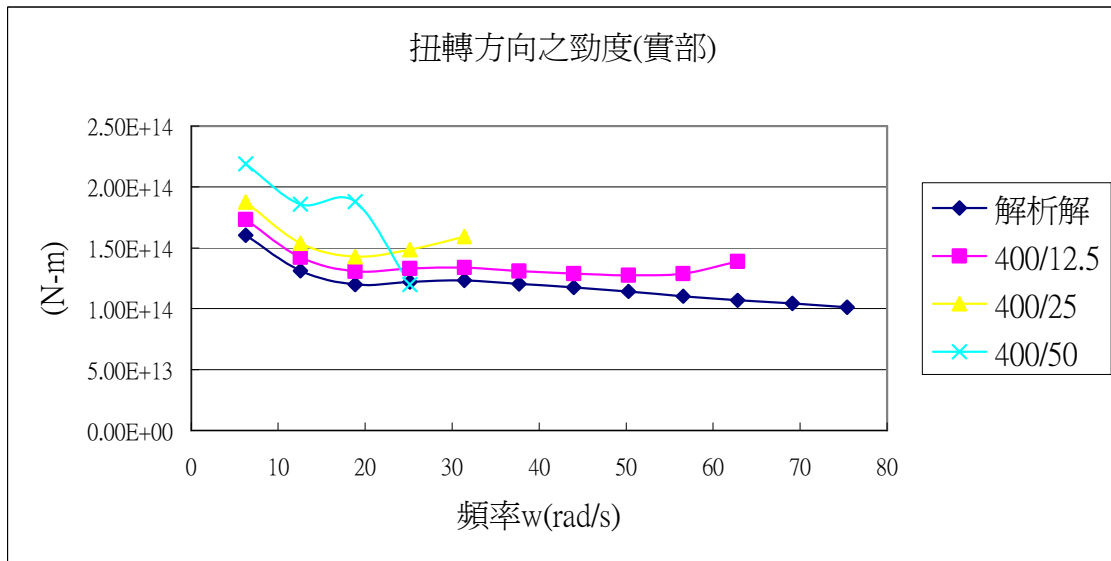


(a)實部份

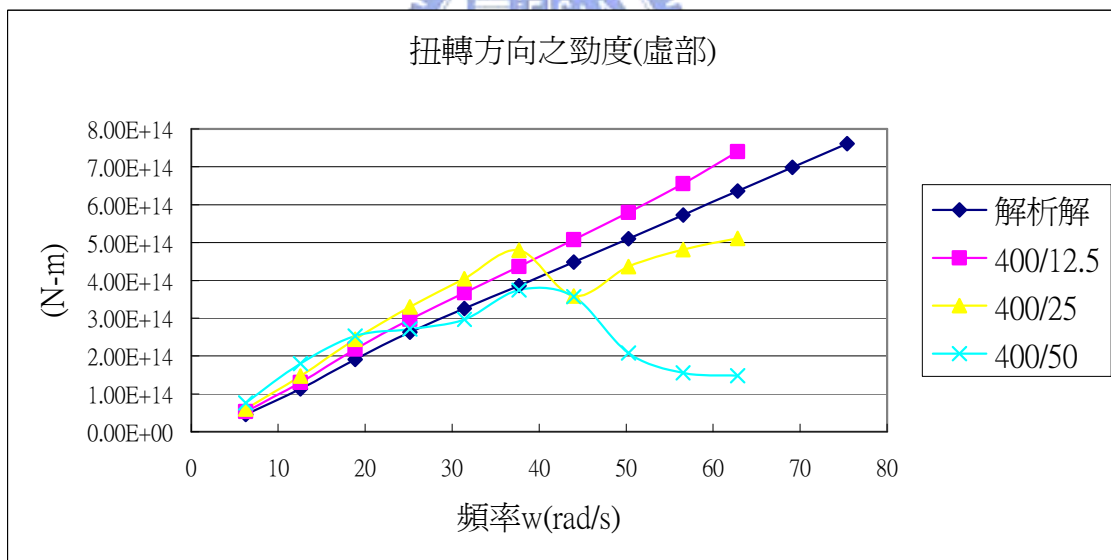


(b)虛部份

圖 4-8 元素大小之收斂性分析(翻轉方向之勁度)

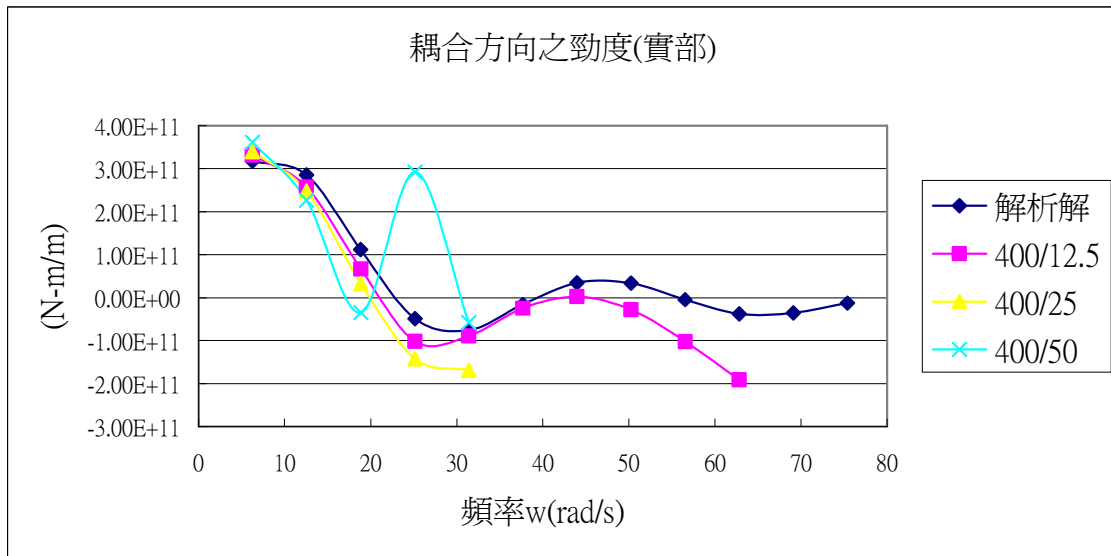


(a)實部部份

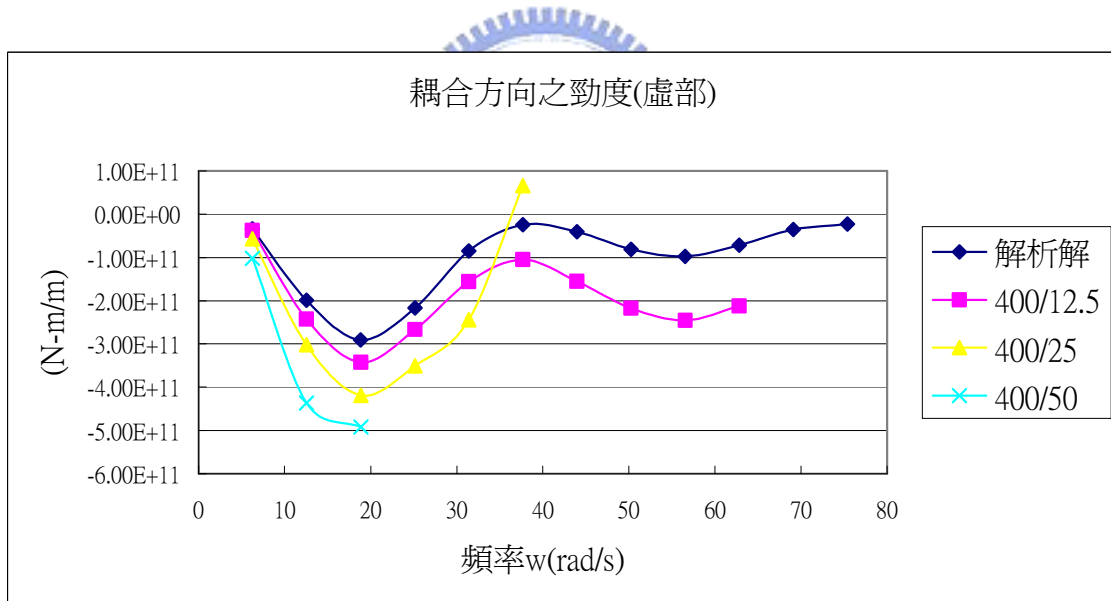


(b)虛部部份

圖 4-9 元素大小之收斂性分析(扭轉方向之勁度)

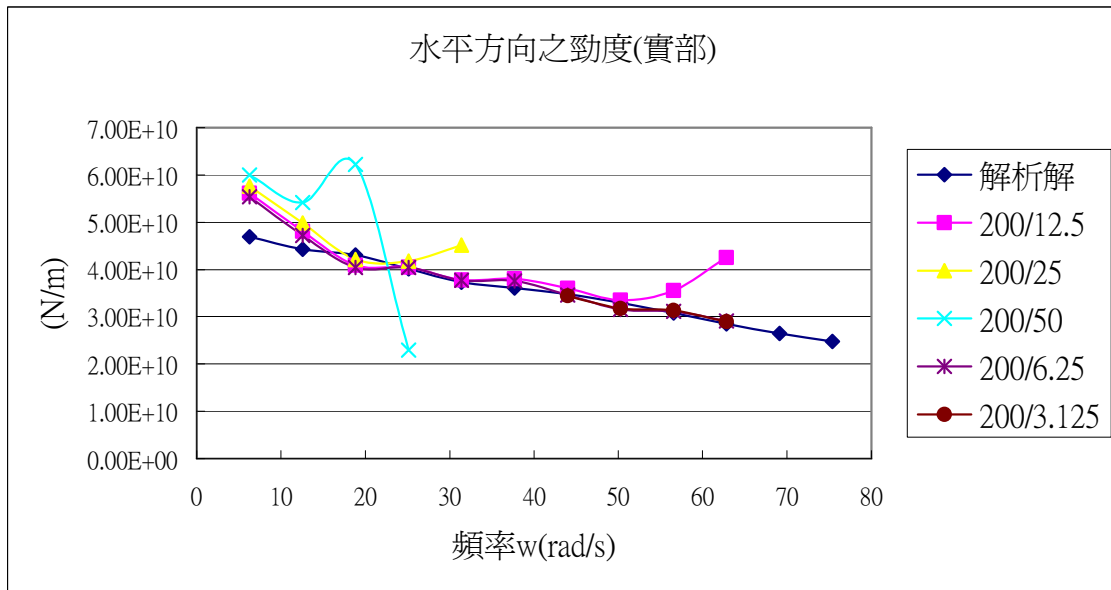


(a)實部份

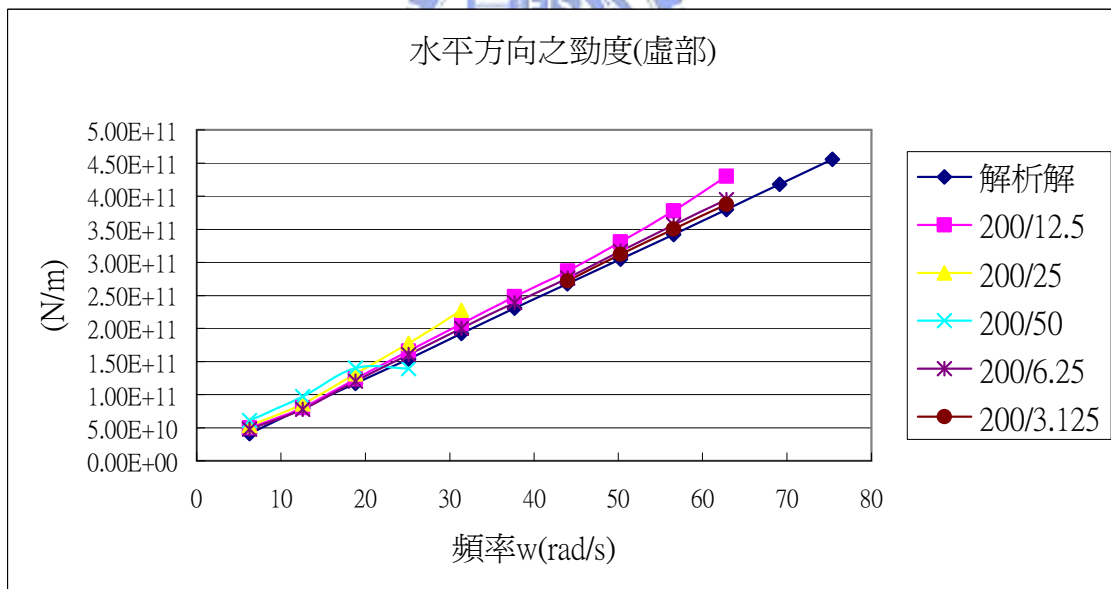


(b)虛部份

圖 4-10 元素大小之收斂性分析(耦合方向之勁度)



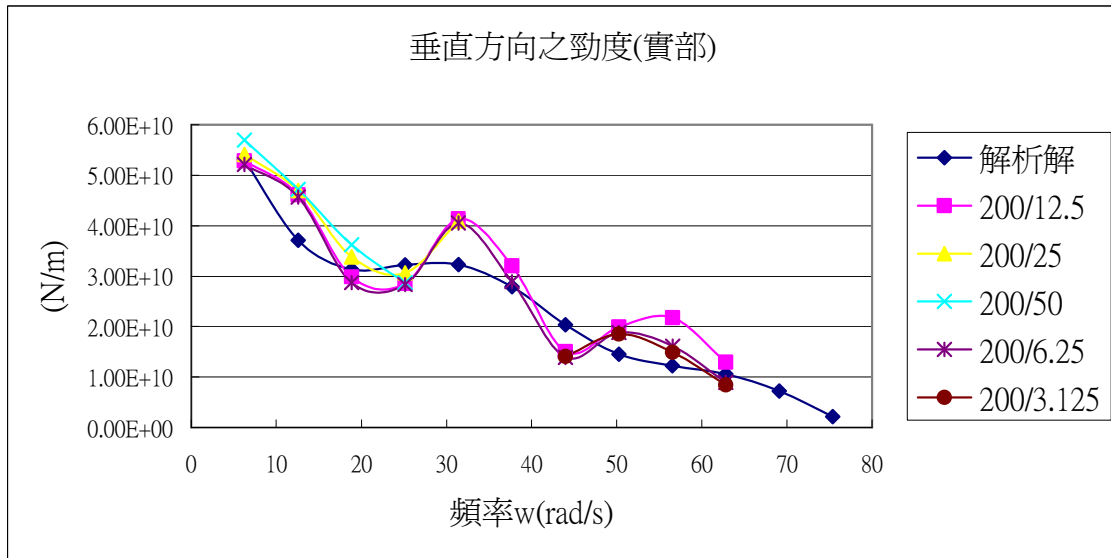
(a)實部部份



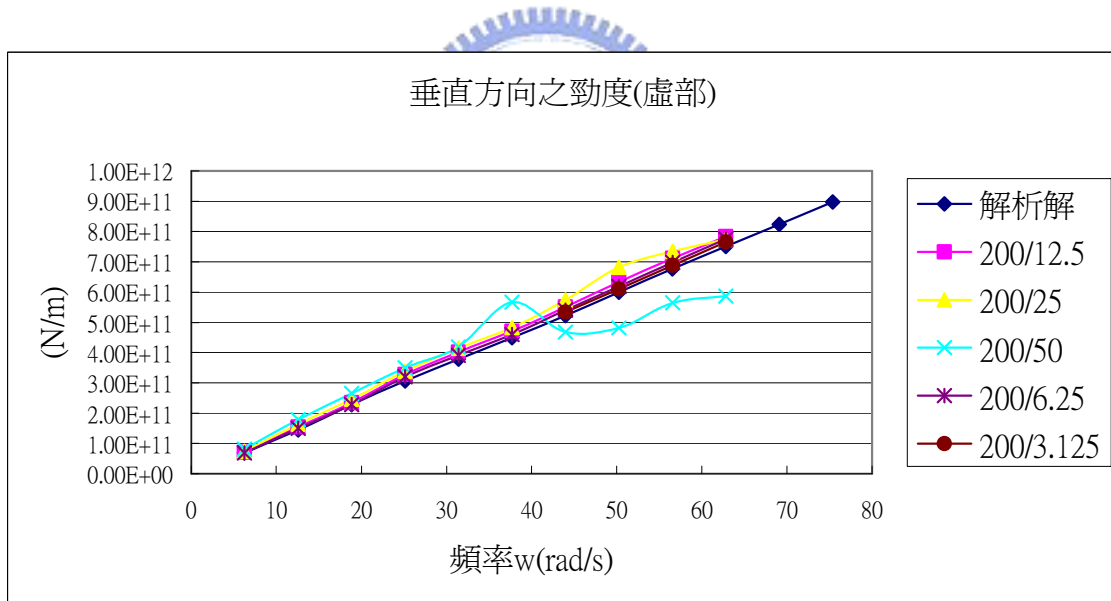
(b)虛部部份

圖 4-11 元素大小之收斂性分析(水平方向之勁度)



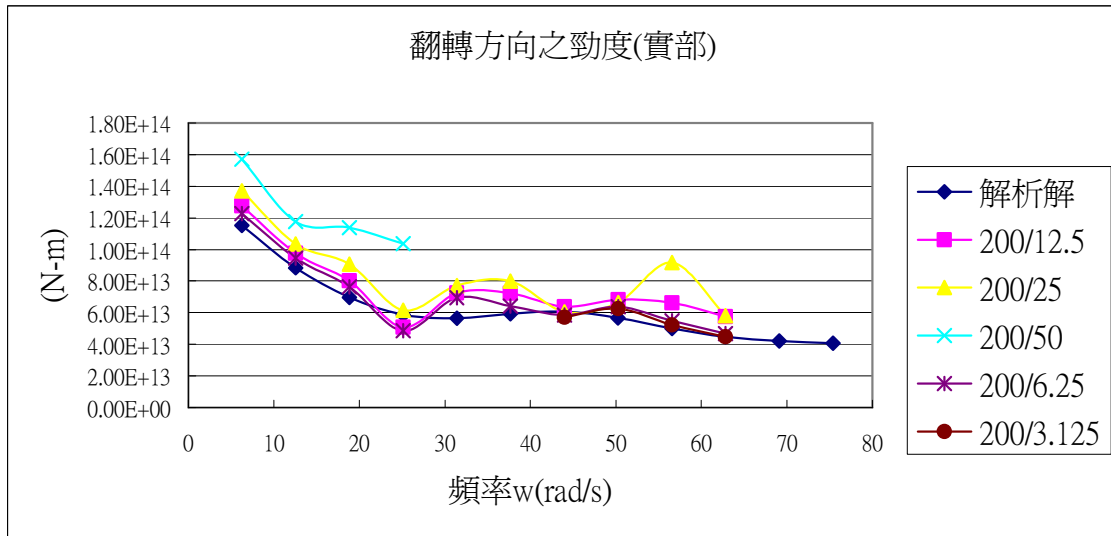


(a)實部部份

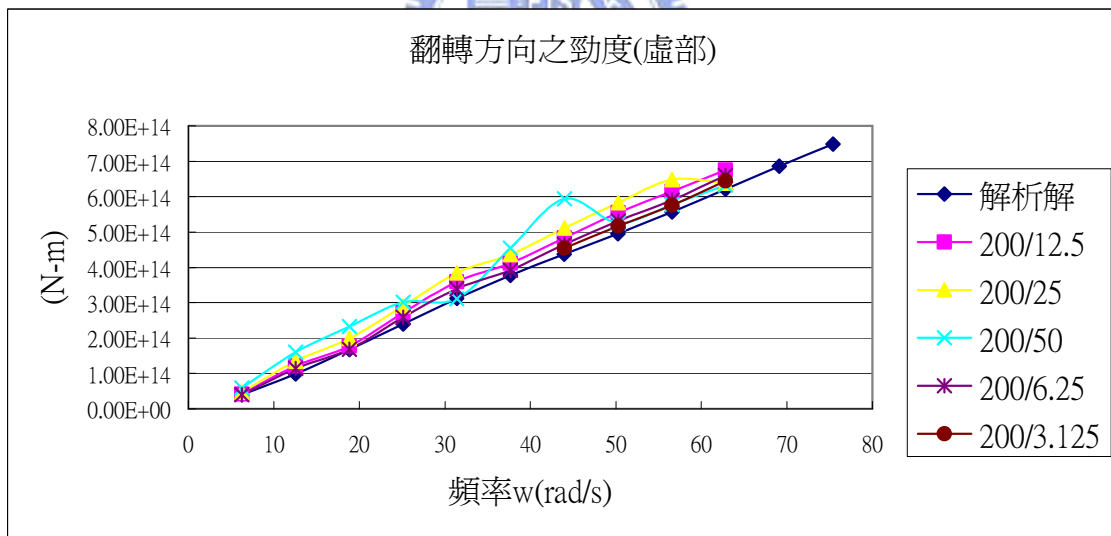


(b)虛部部份

圖 4-12 元素大小之收斂性分析(垂直方向之勁度)

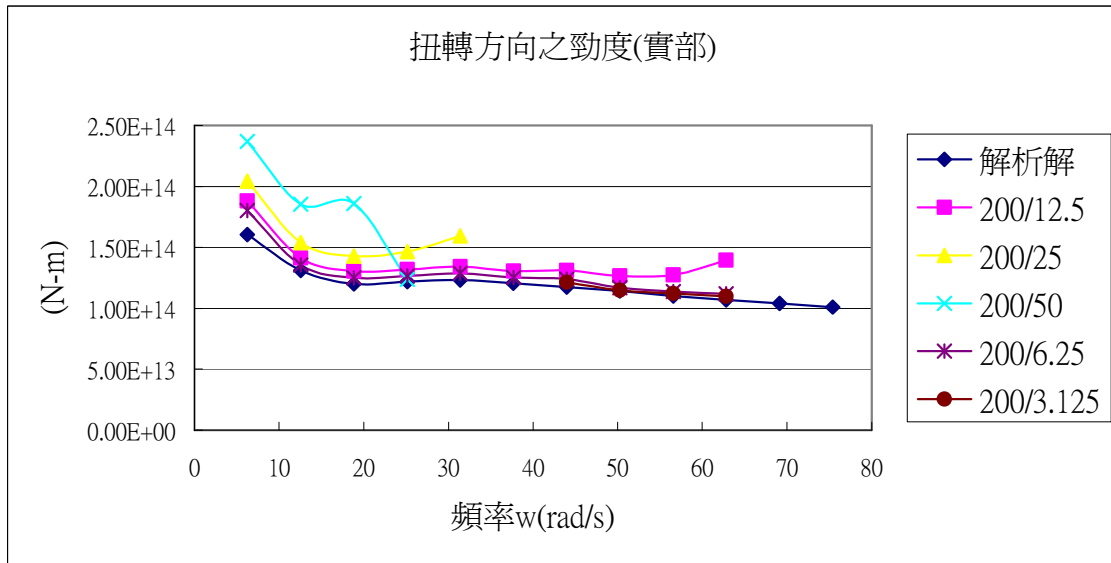


(a)實部部份

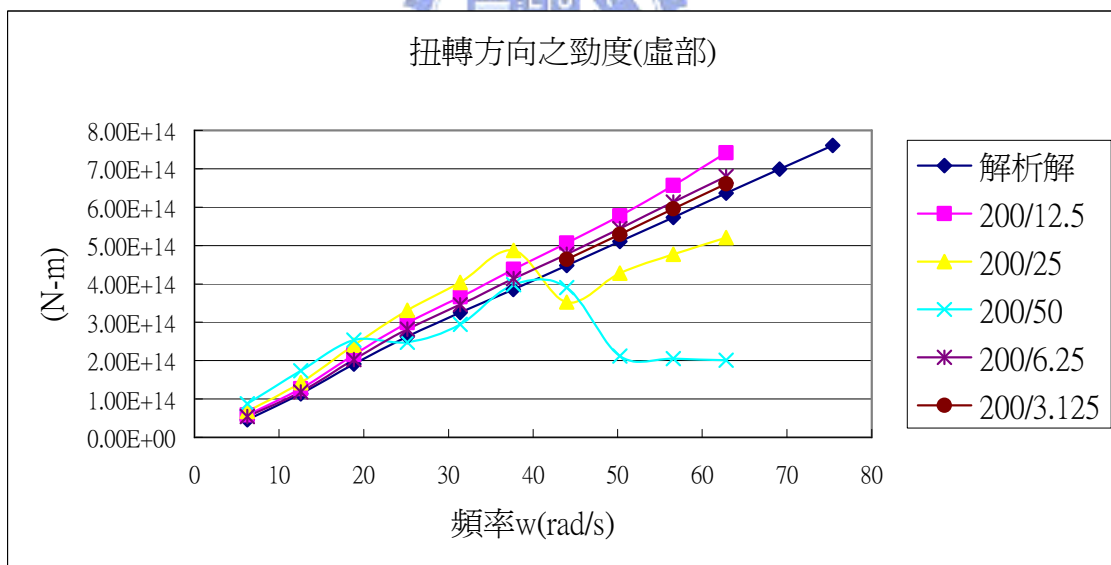


(b)虛部部份

圖 4-13 元素大小之收斂性分析(翻轉方向之勁度)



(a)實部部份



(b)虛部部份

圖 4-14 元素大小之收斂性分析(扭轉方向之勁度)

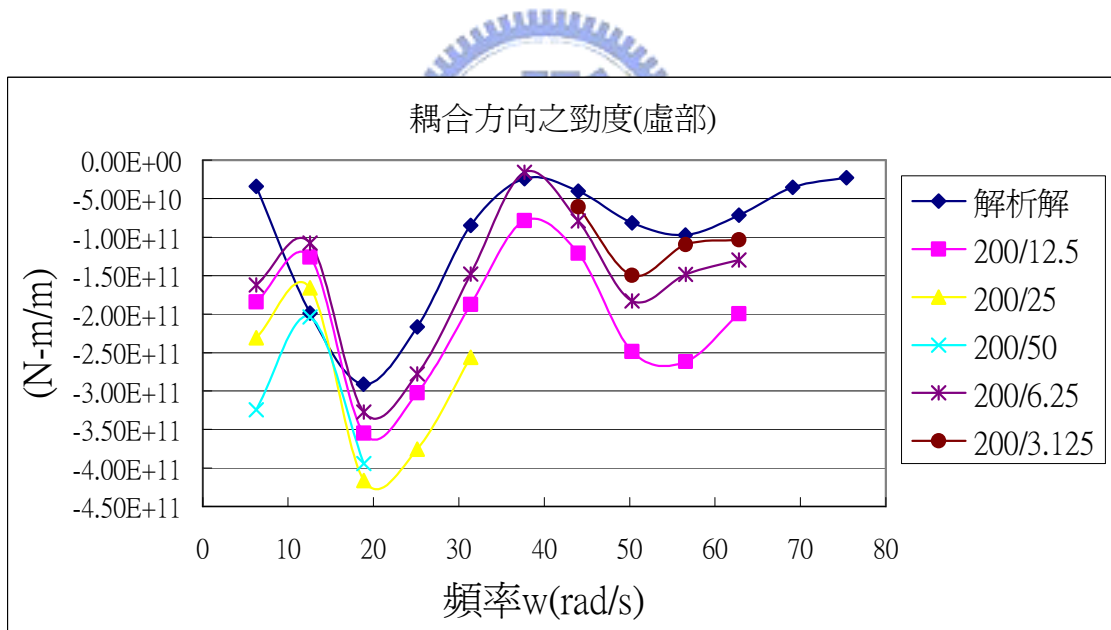
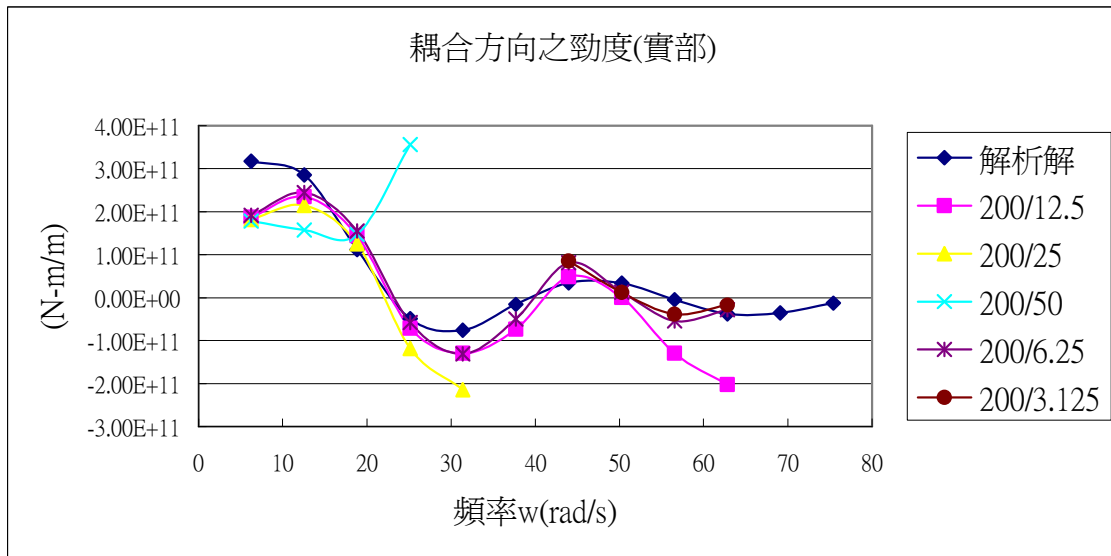
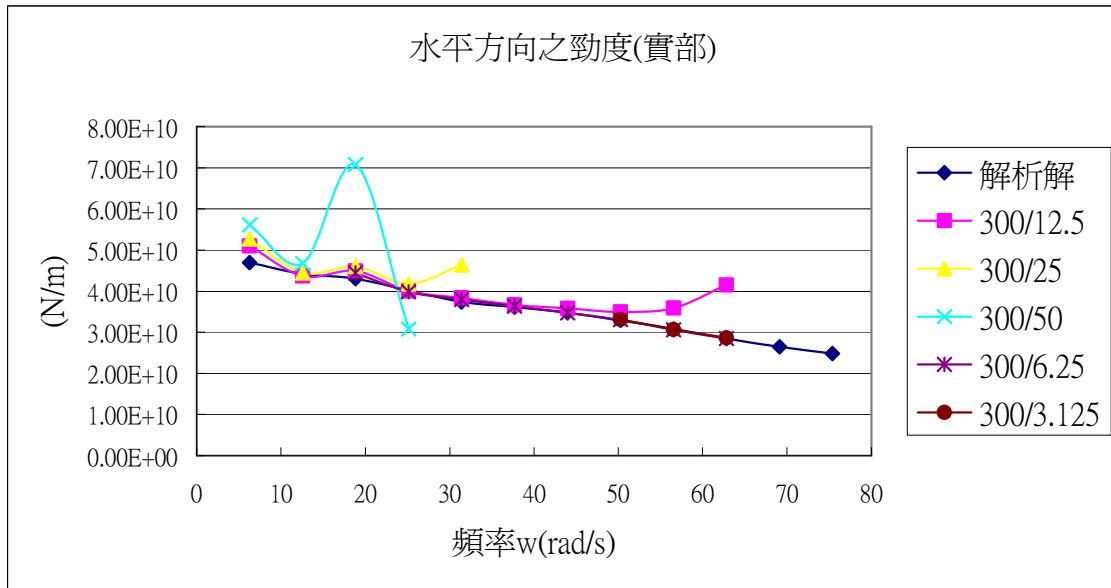
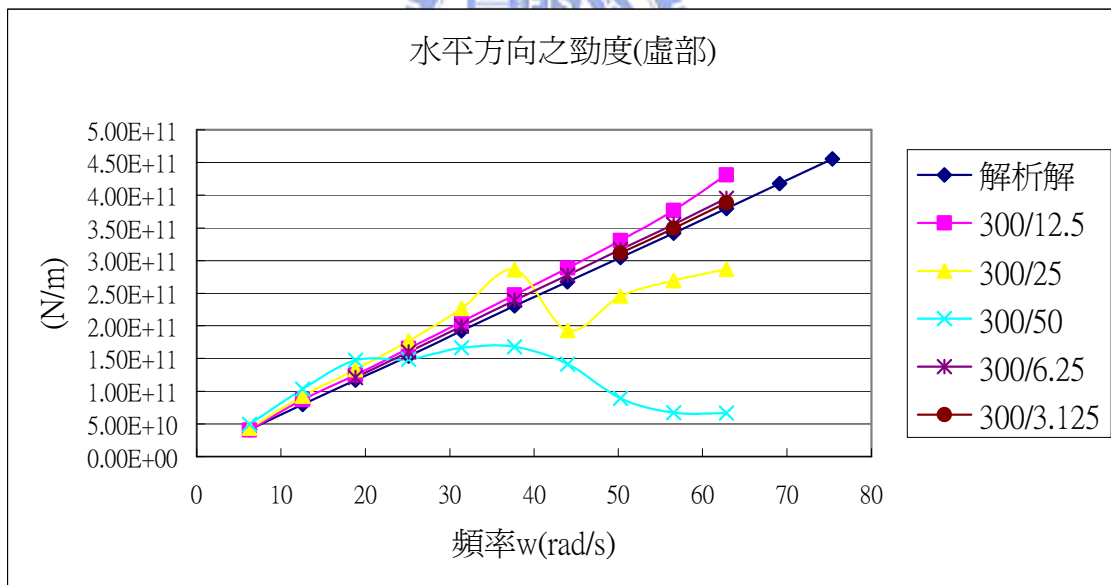


圖 4-15 元素大小之收斂性分析(耦合方向之勁度)

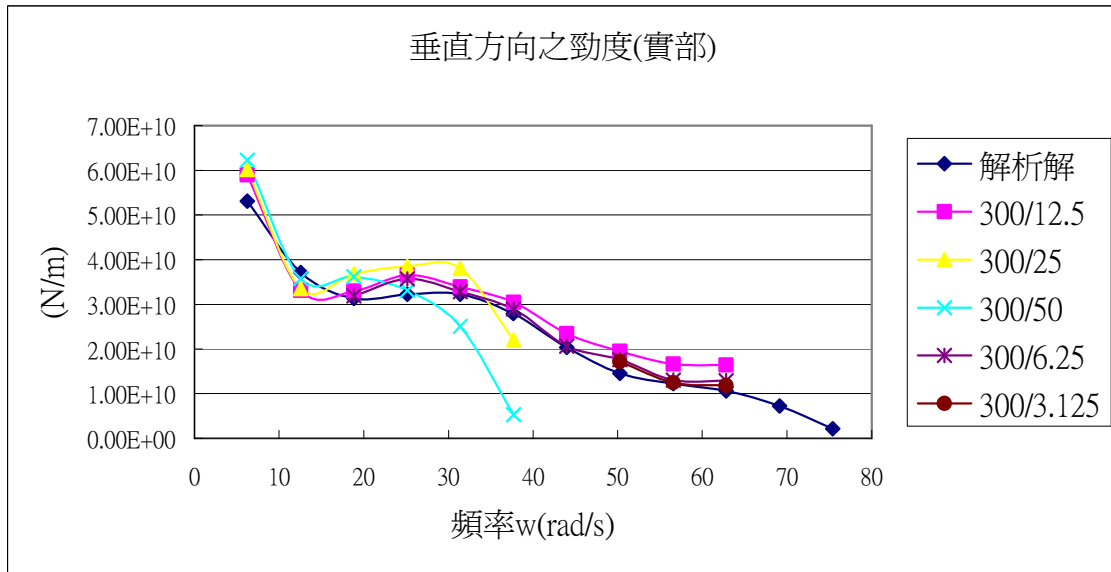


(a)實部部份

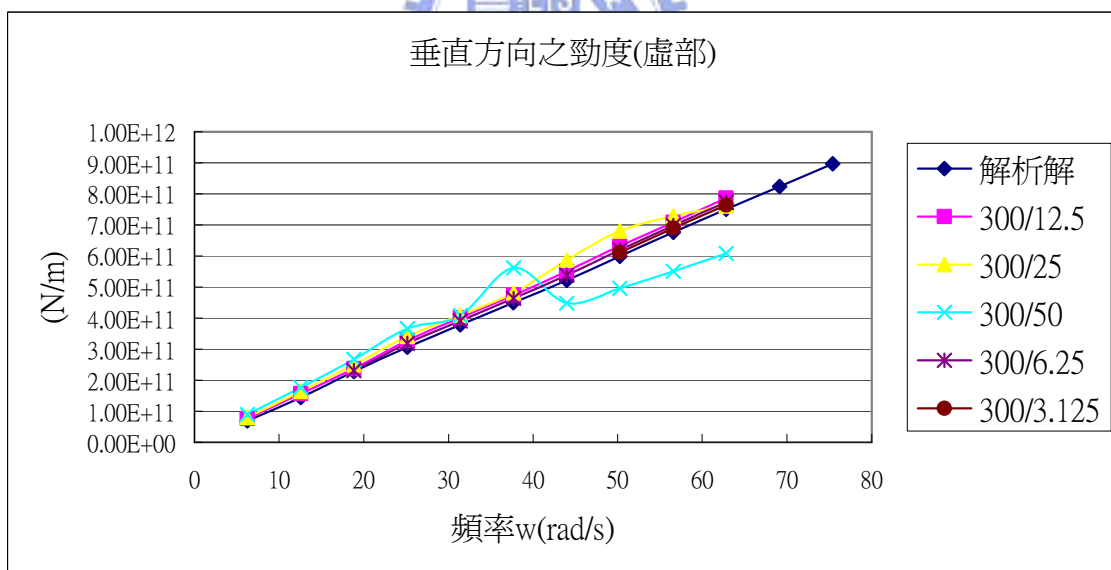


(b)虛部部份

圖 4-16 元素大小之收斂性分析(水平方向之勁度)



(a)實部部份



(b)虛部部份

圖 4-17 元素大小之收斂性分析(垂直方向之勁度)

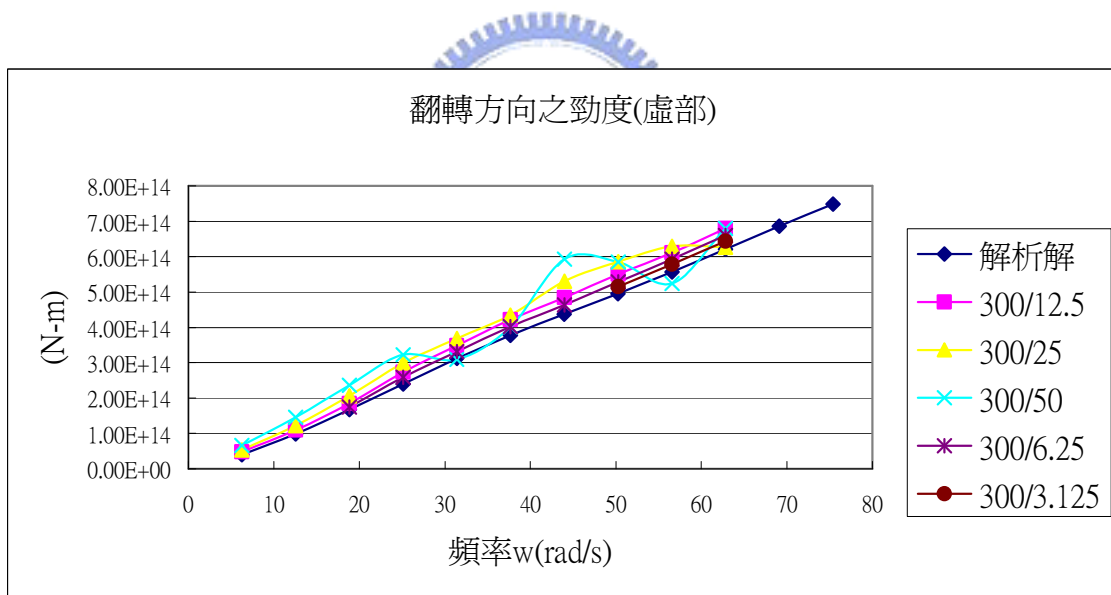
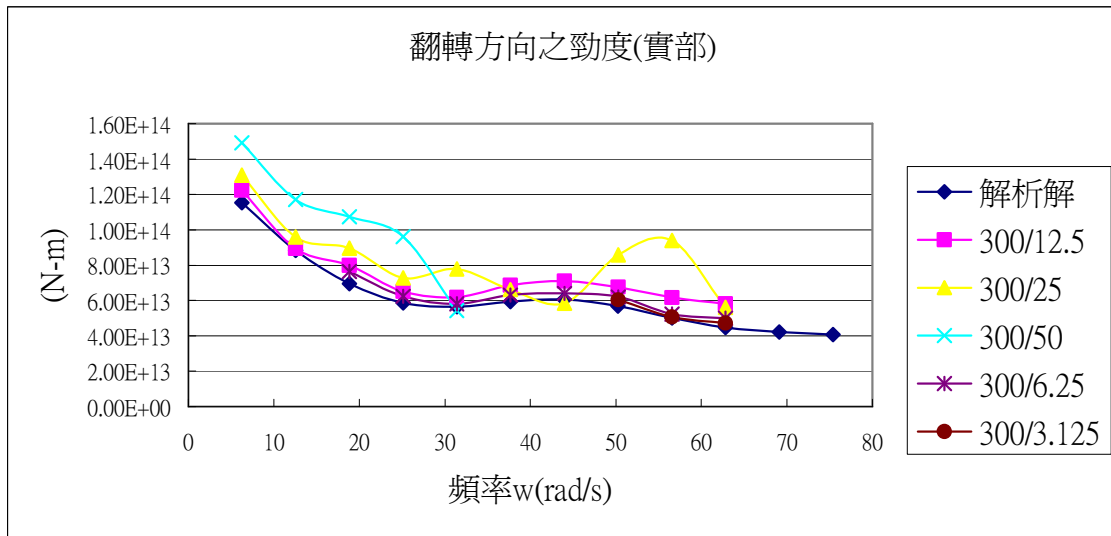
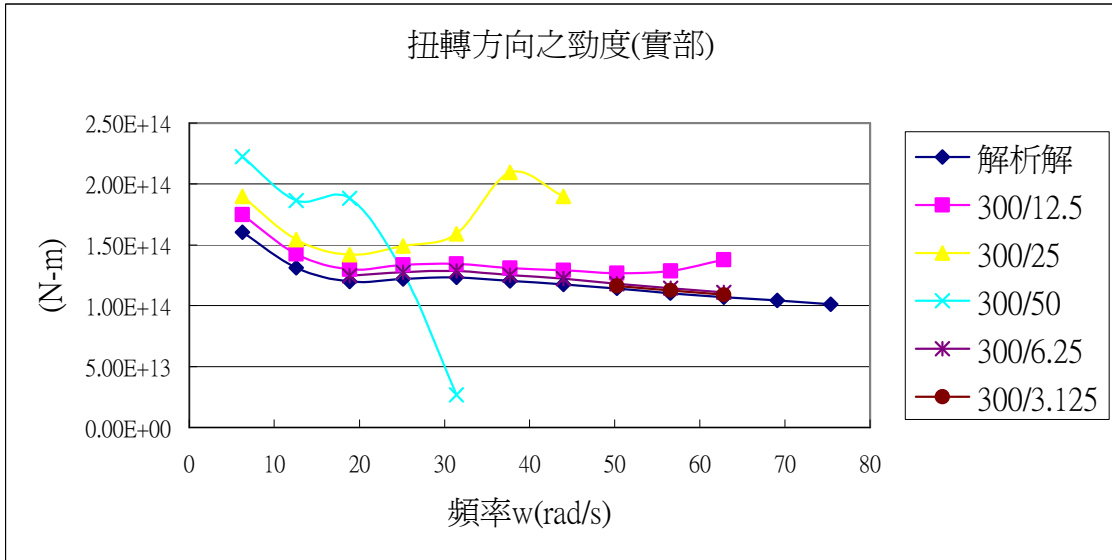
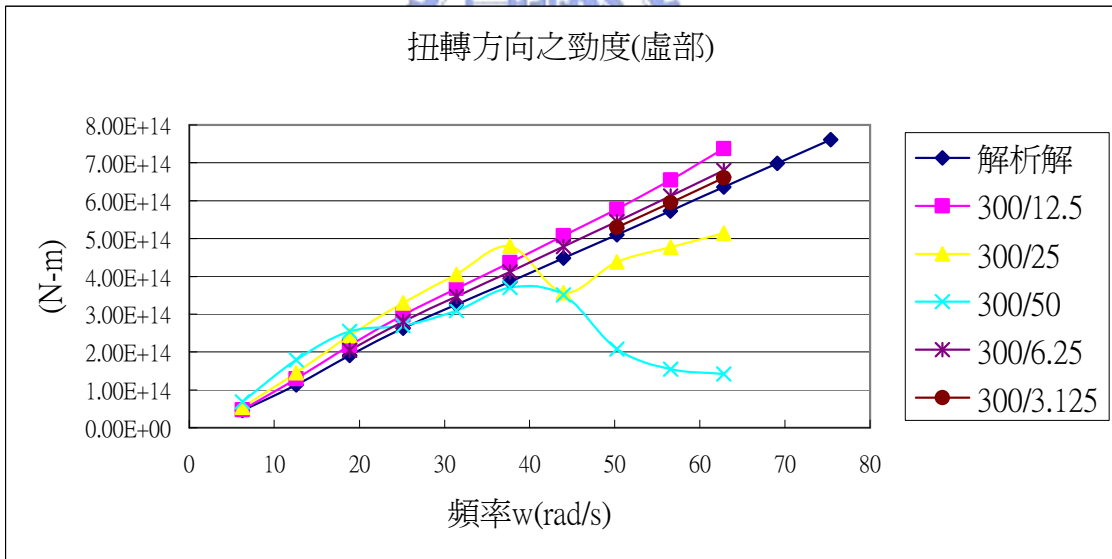


圖 4-18 元素大小之收斂性分析(翻轉方向之勁度)



(a)實部份



(b)虛部份

圖 4-19 元素大小之收斂性分析(扭轉方向之勁度)



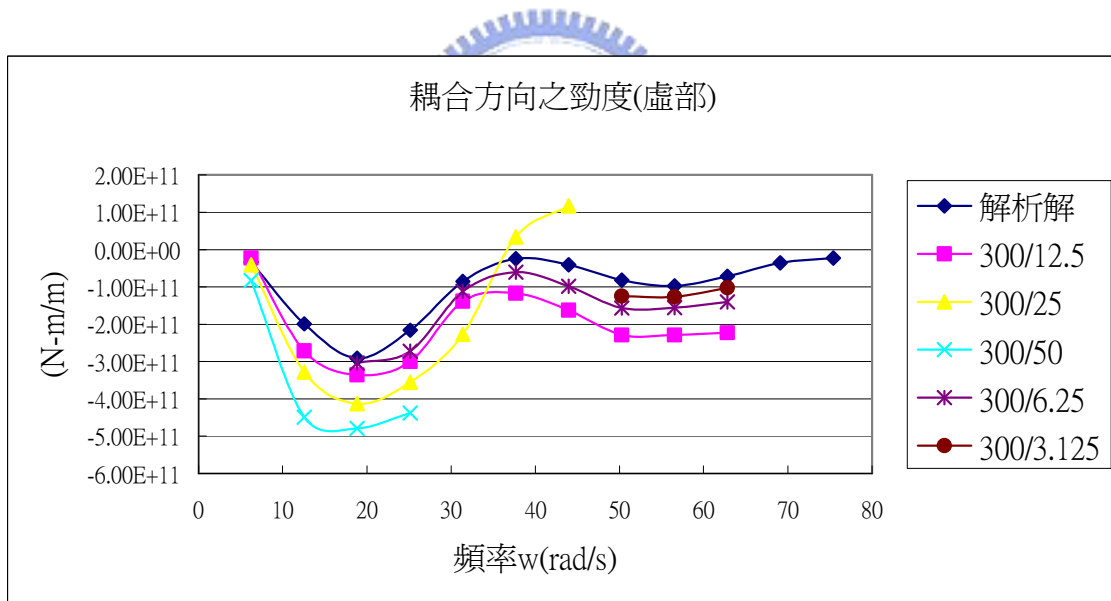
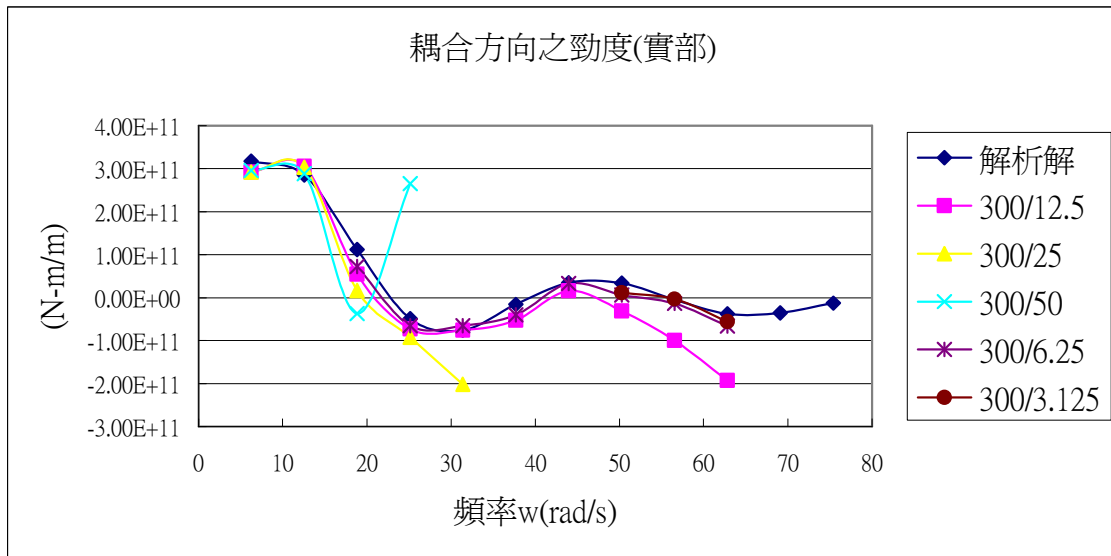
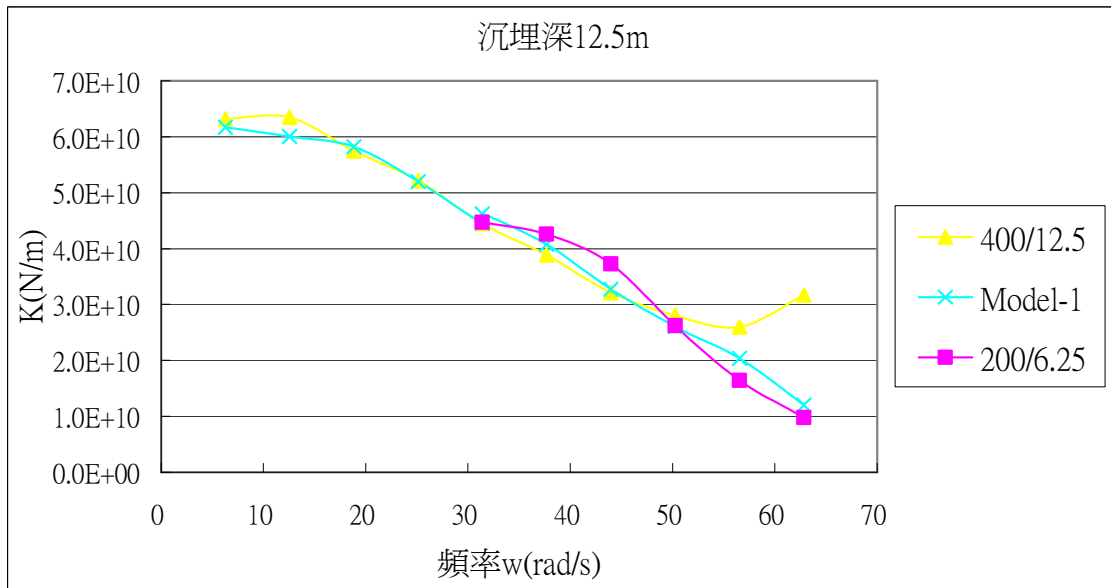
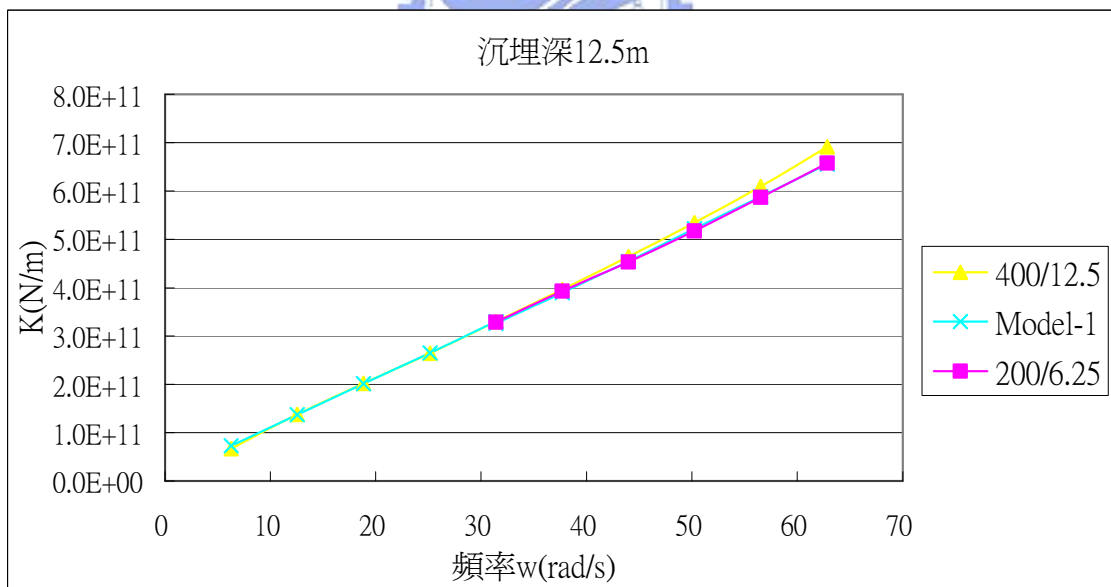


圖 4-20 元素大小之收斂性分析(耦合方向之勁度)

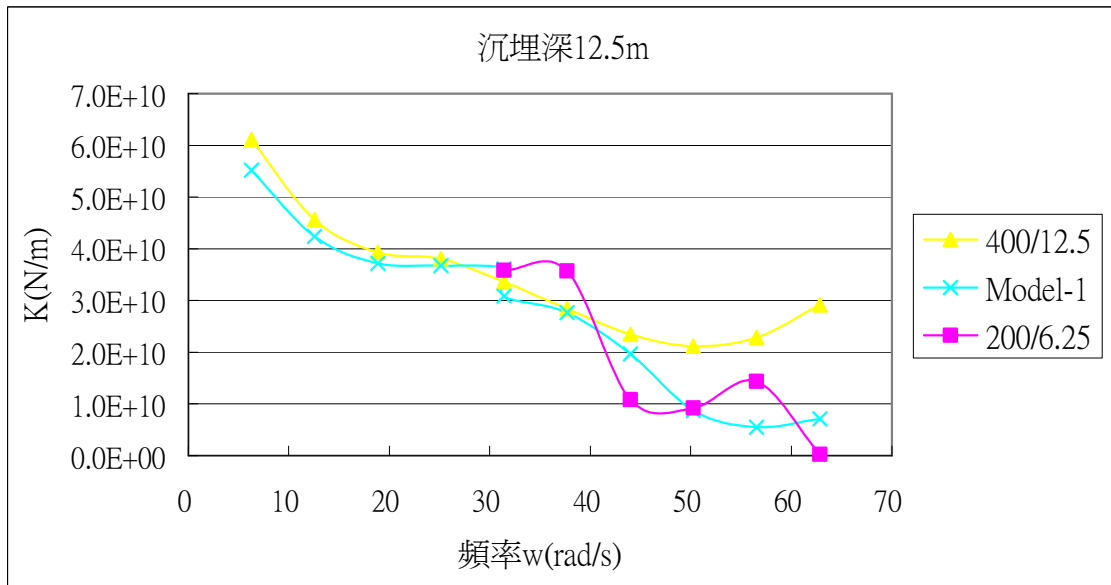


(a)實部部分

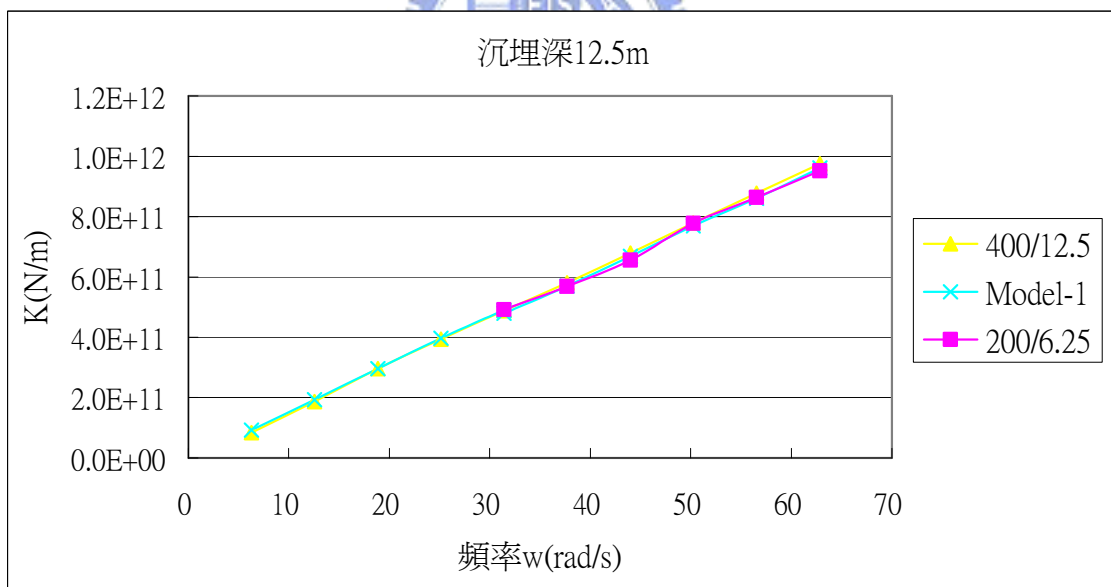


(b)虛部部份

圖 5-1 沉埋 12.5 m 水平方向之勁度

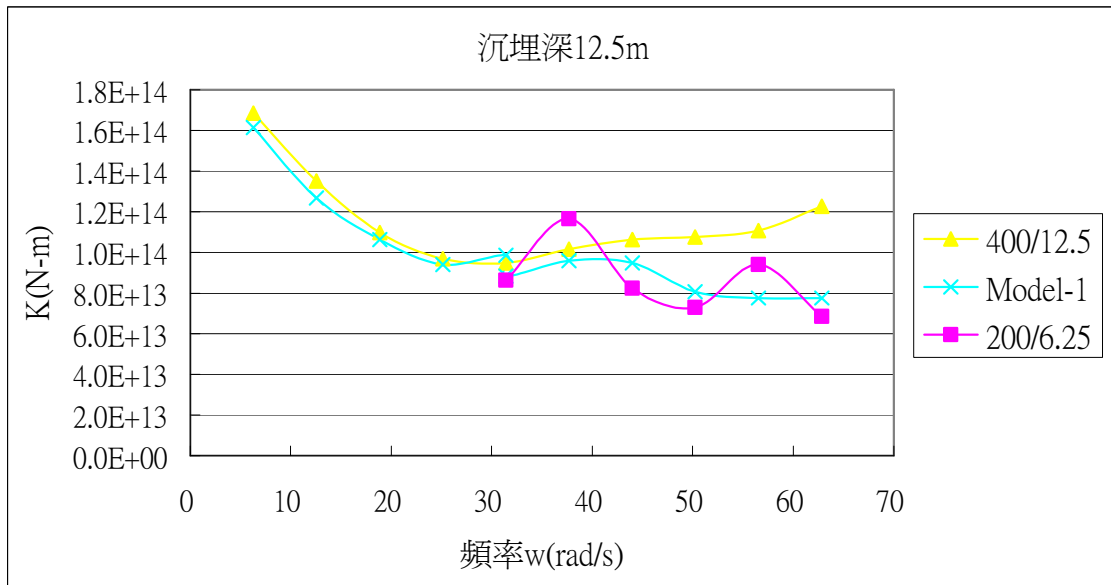


(a)實部部份

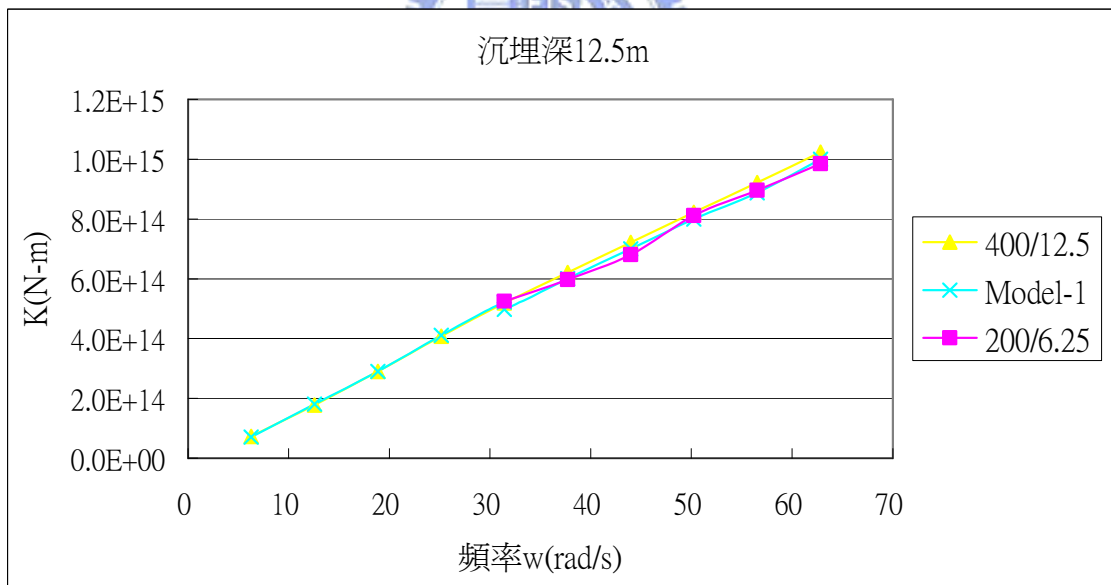


(b)虛部部份

圖 5-2 沉埋 12.5 m 垂直方向之勁度

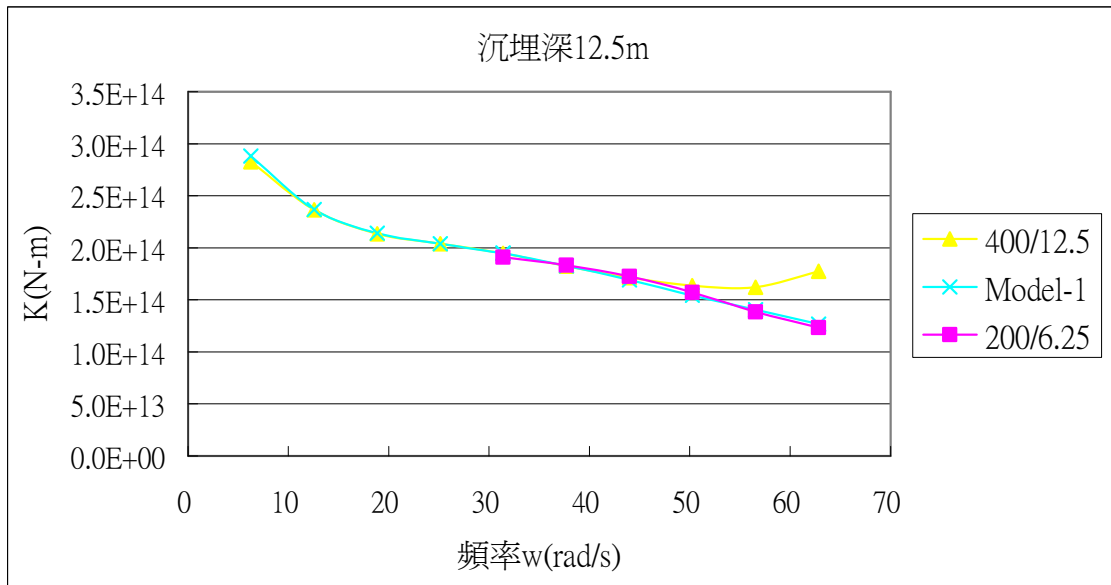


(a)實部部份

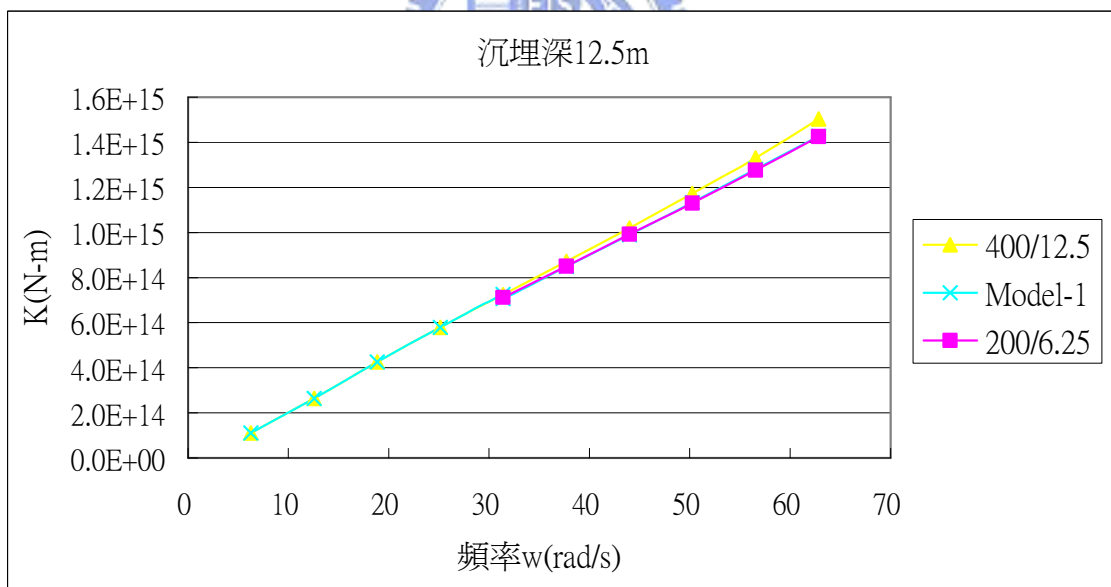


(b)虛部部份

圖 5-3 沉埋 12.5 m 翻轉方向之勁度



(a)實部部份



(b)虛部部份

圖 5-4 沉埋 12.5 m 扭轉方向之勁度

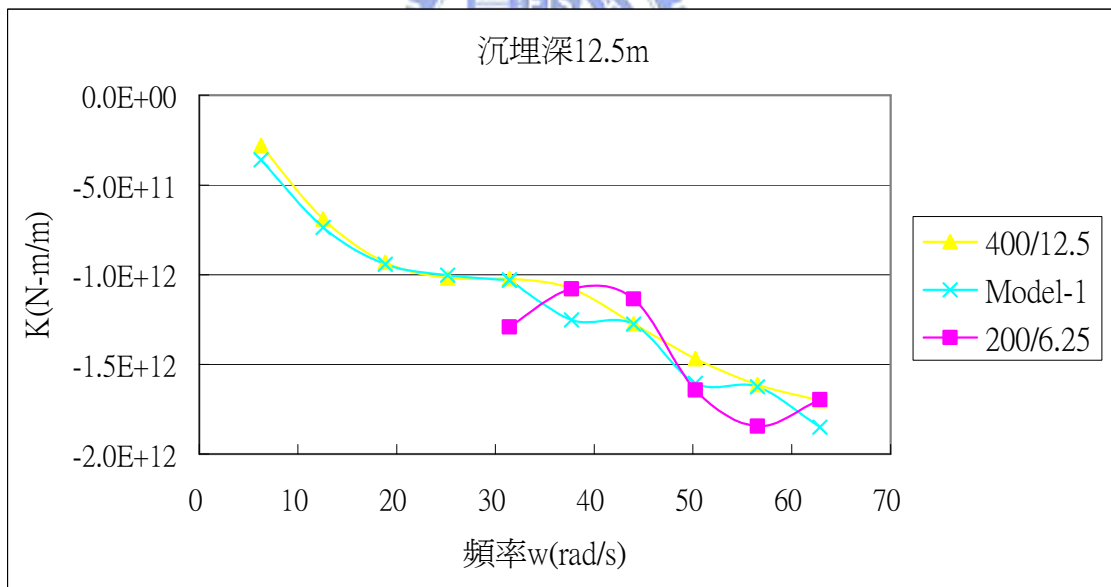
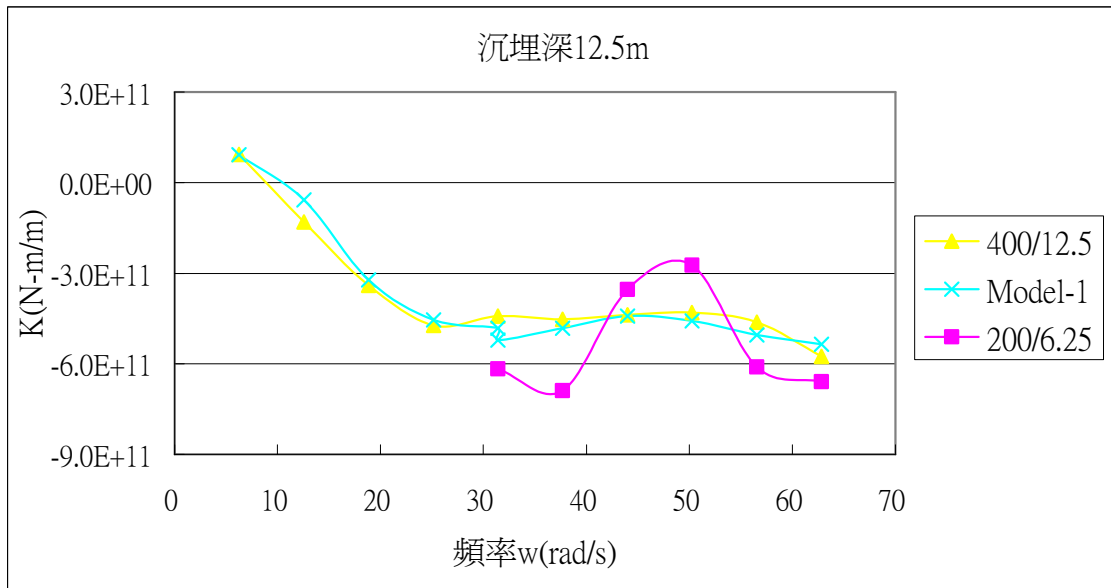
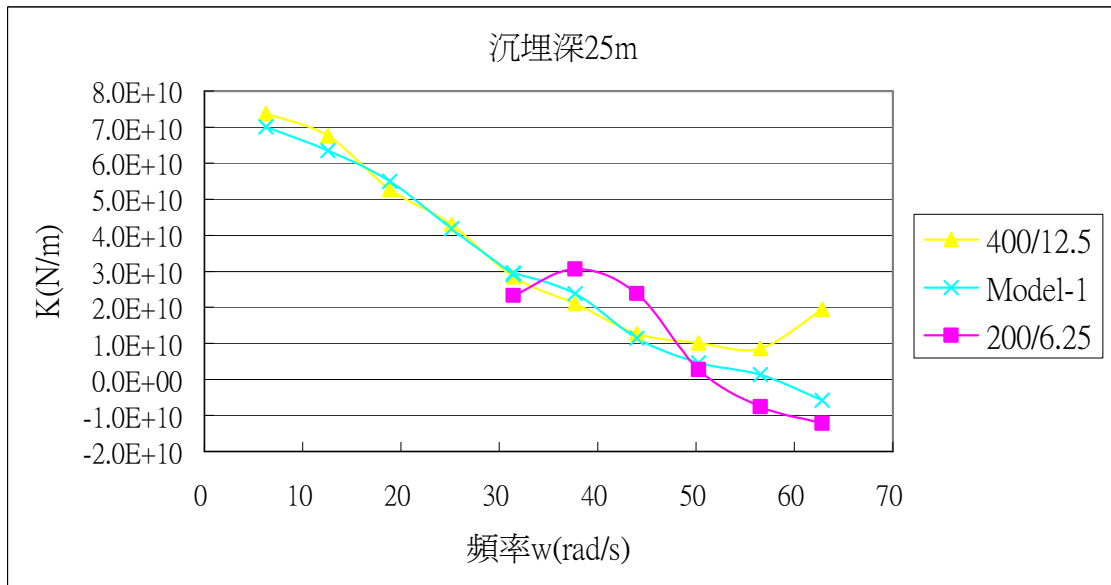
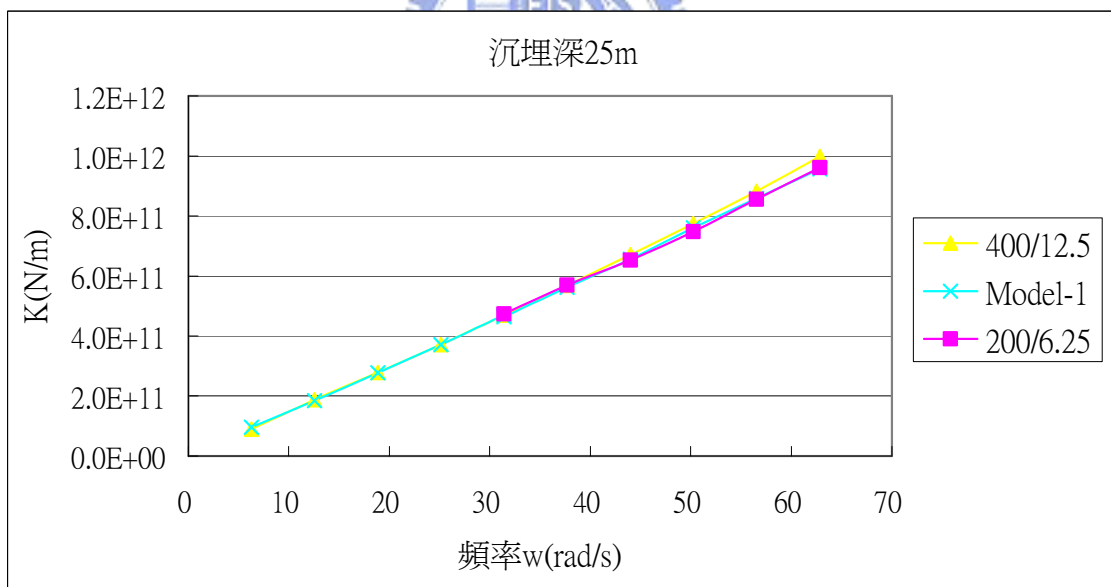


圖 5-5 沉埋 12.5 m 耦合方向之勁度

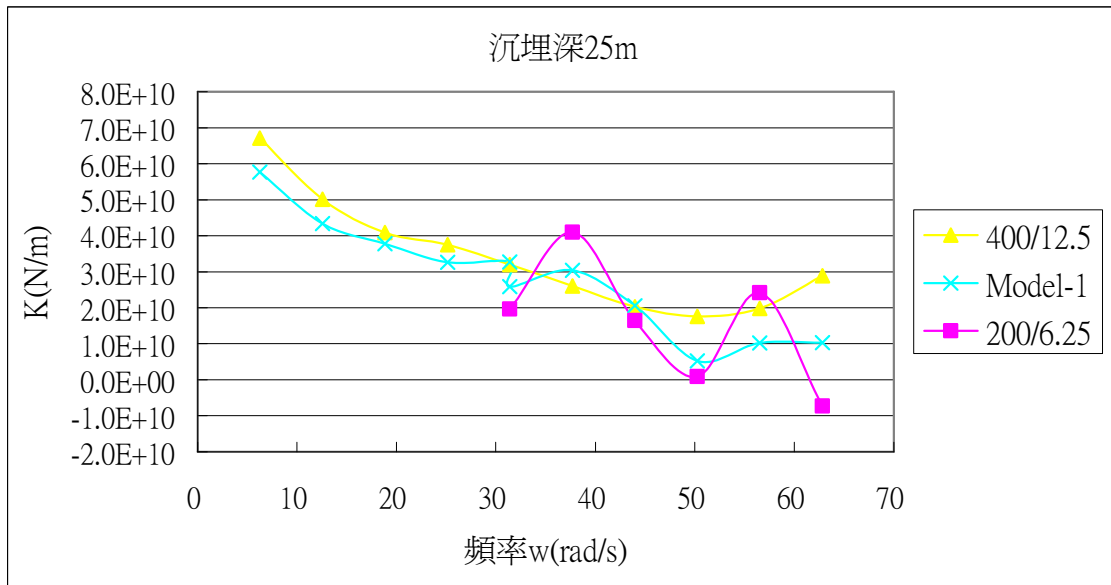


(a)實部部份

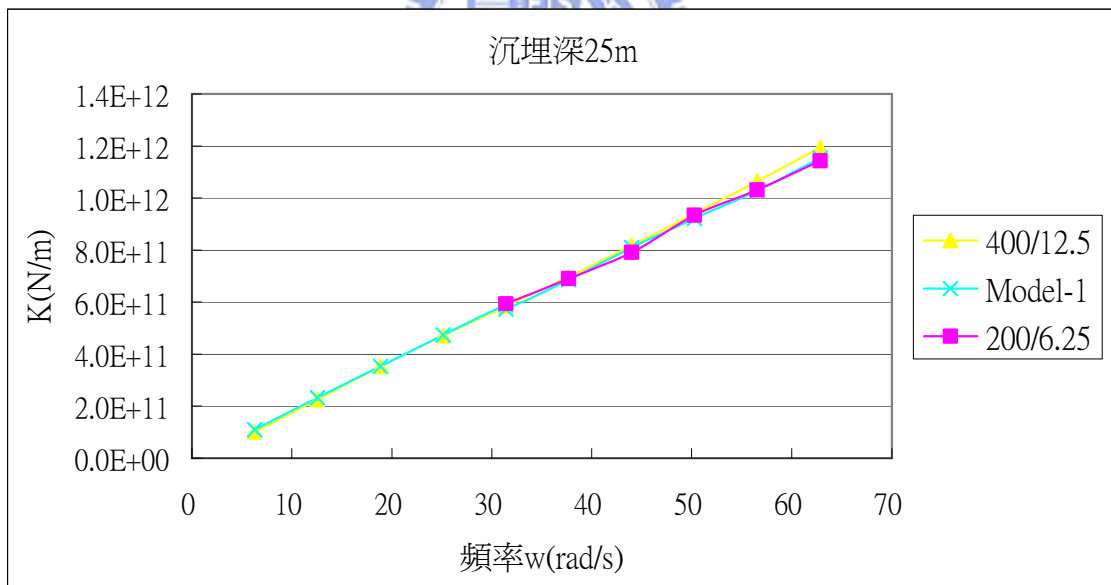


(b)虛部部份

圖 5-6 沉埋 25 m 水平方向之勁度



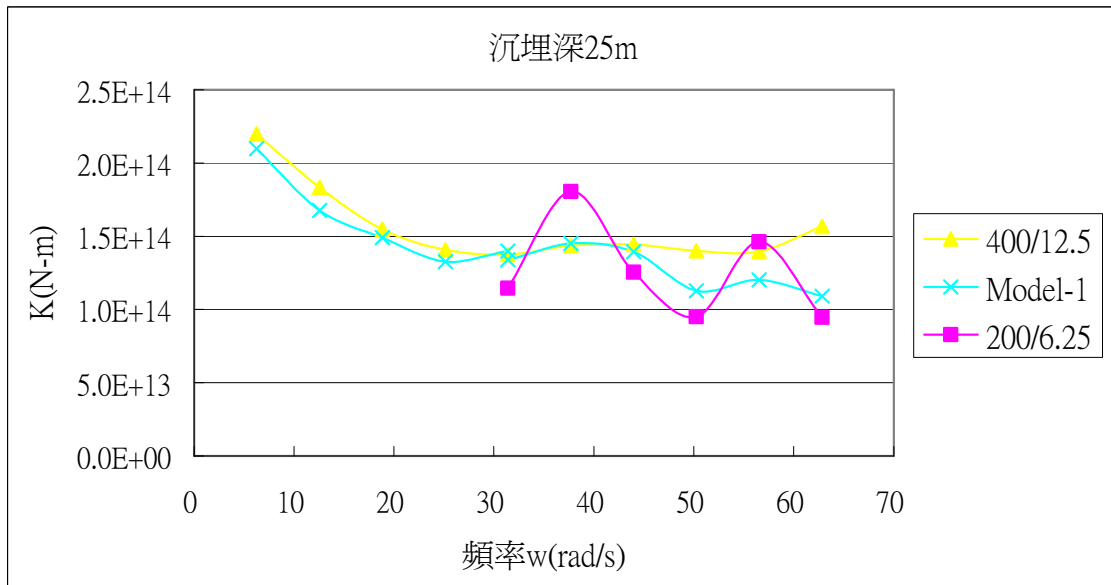
(a)實部部份



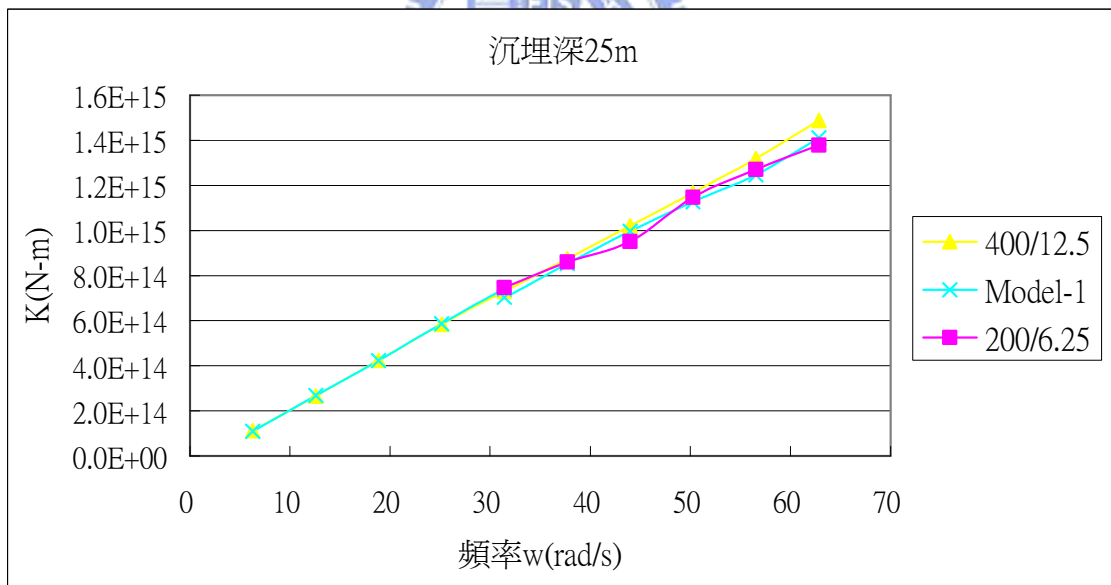
(b)虛部部份

圖 5-7 沉埋 25 m 垂直方向之勁度



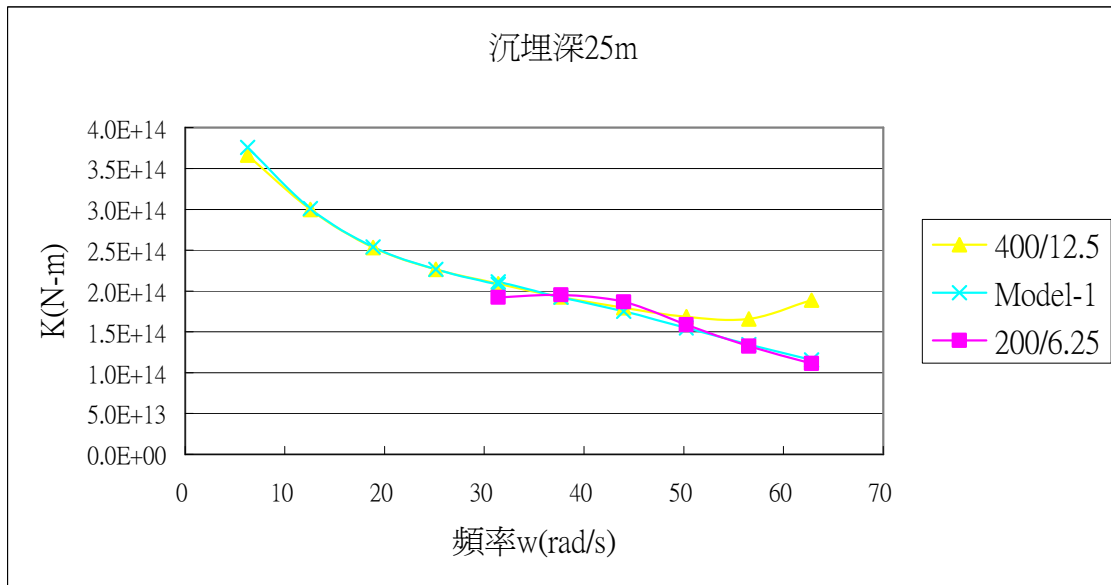


(a)實部部份

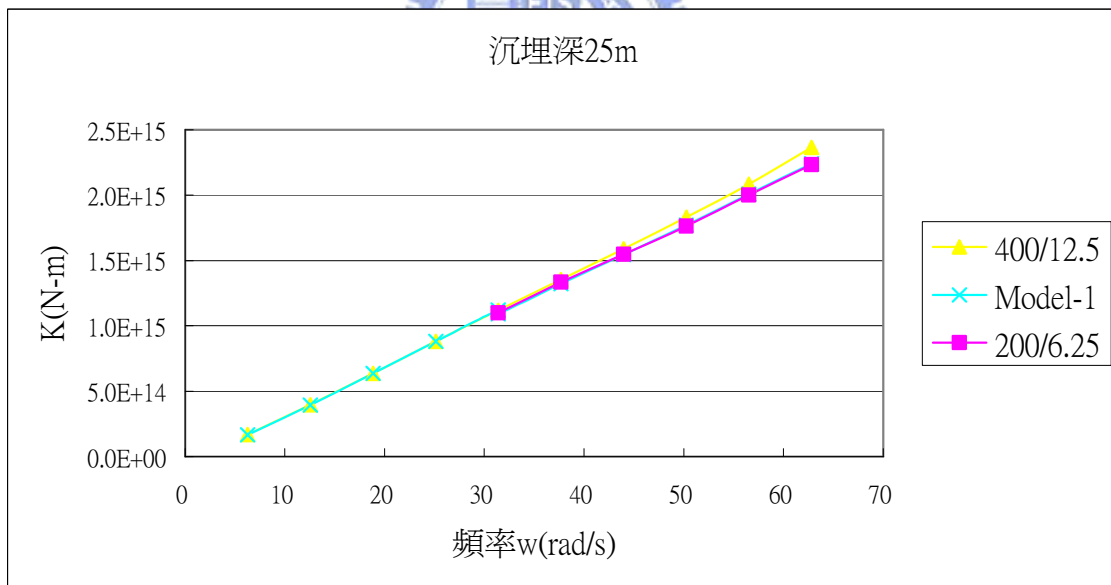


(b)虛部部份

圖 5-8 沉埋 25 m 翻轉方向之勁度

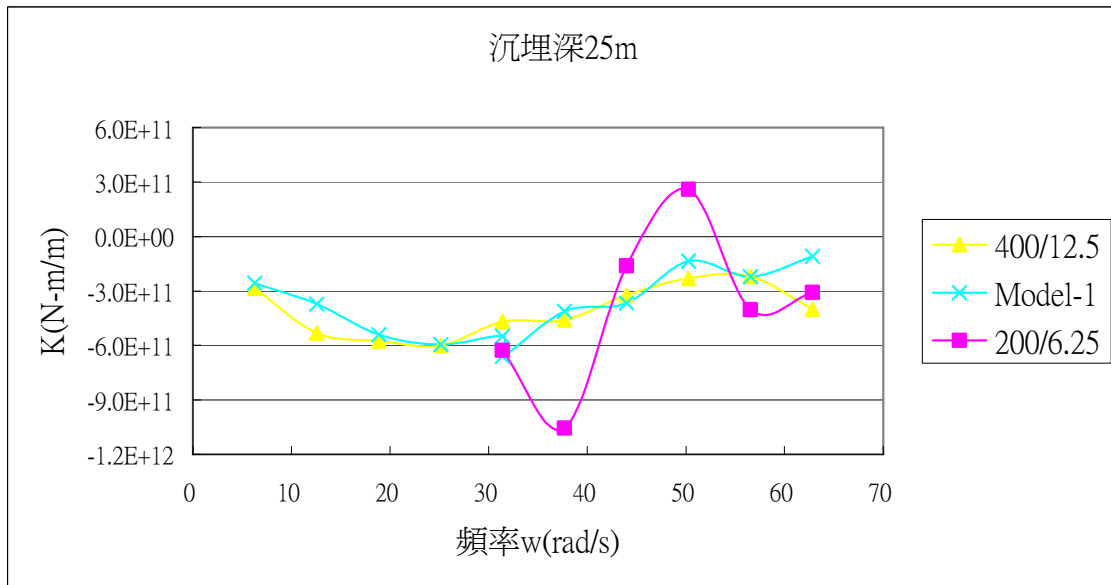


(a)實部部份

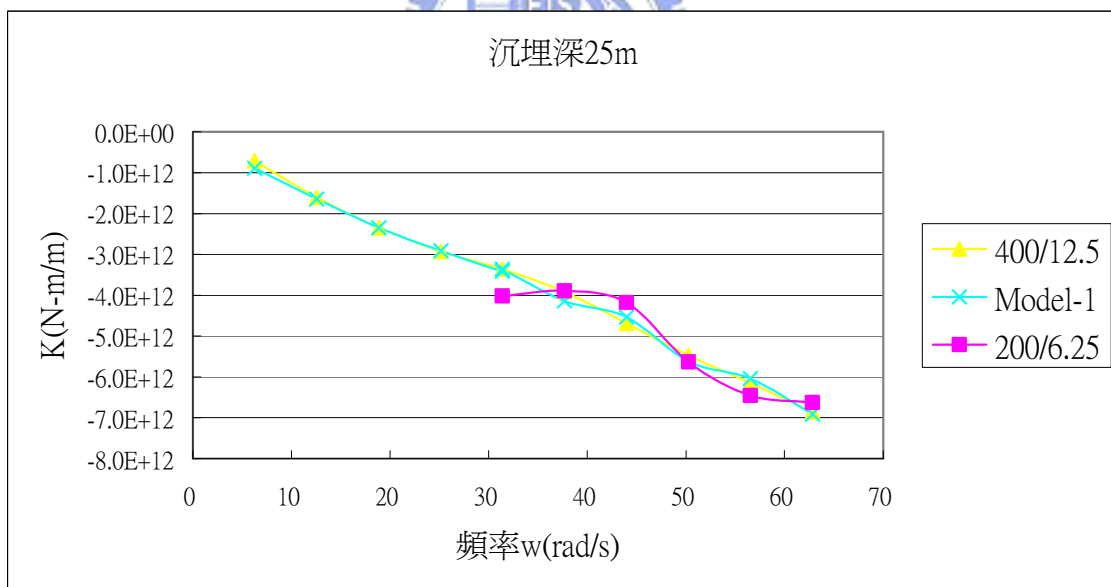


(b)虛部部份

圖 5-9 沉埋 25 m 扭轉方向之勁度

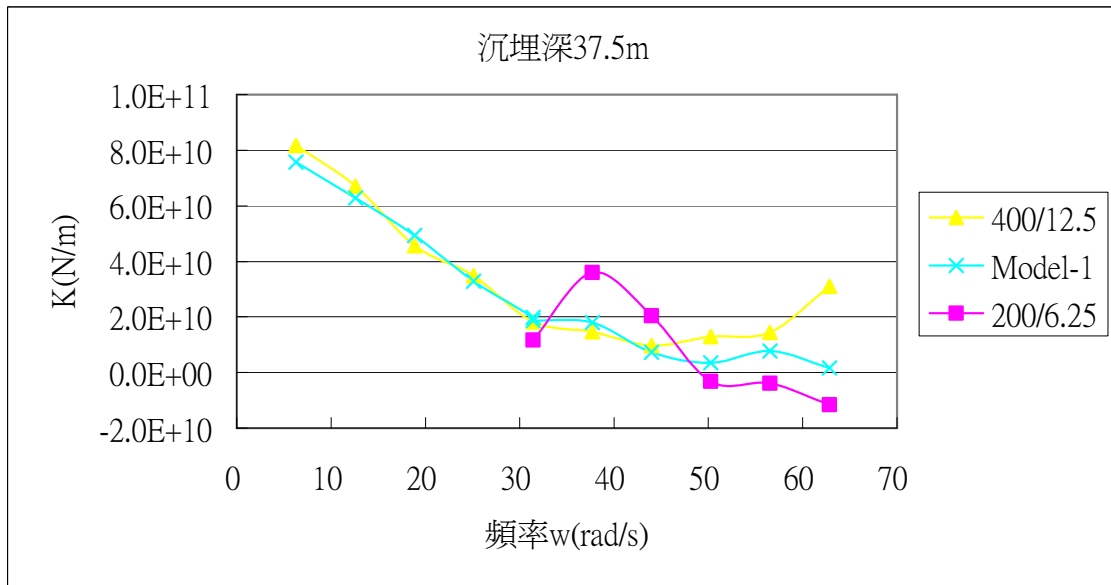


(a)實部部份

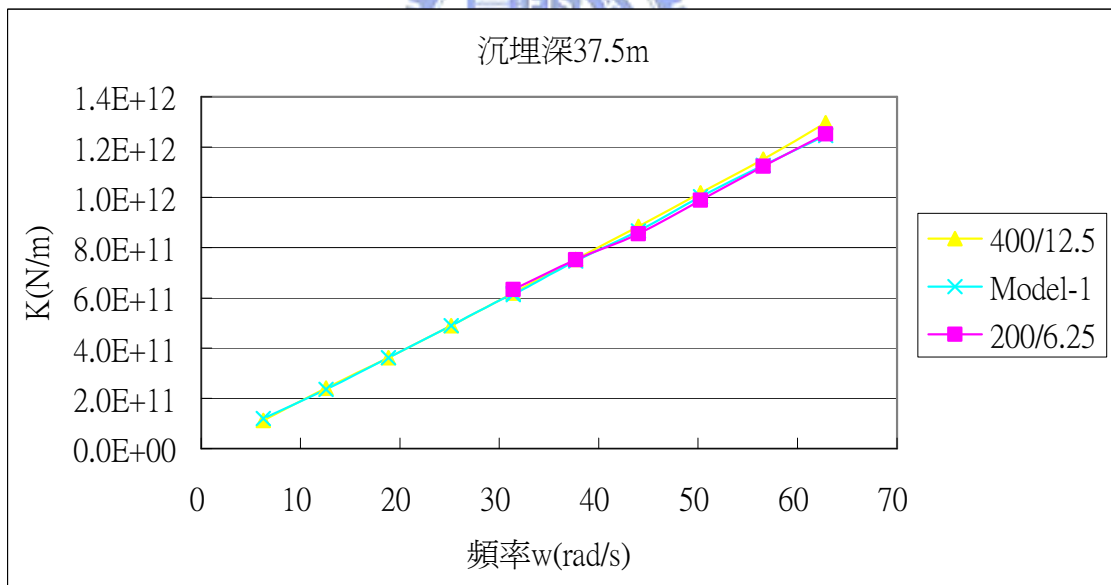


(b)虛部部份

圖 5-10 沉埋 25 m 耦合方向之勁度



(a)實部部份



(b)虛部部份

圖 5-11 沉埋 37.5 m 水平方向之勁度

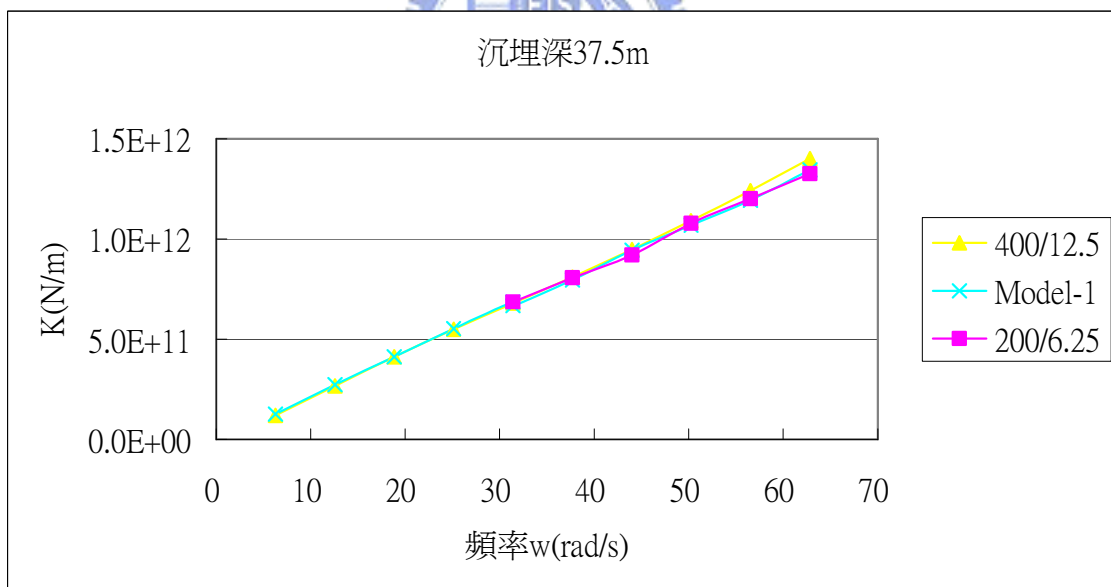
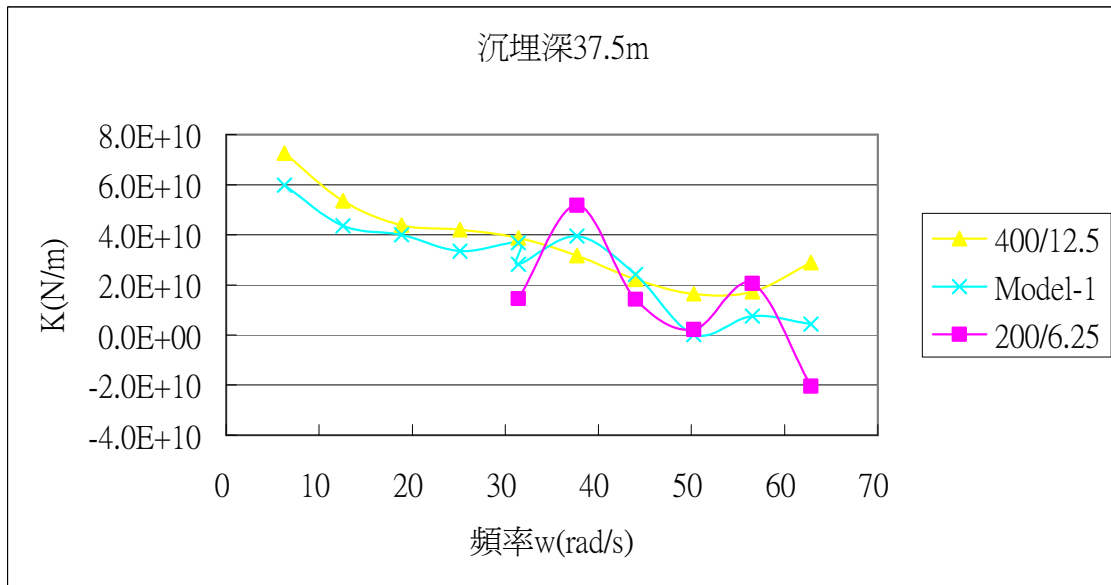
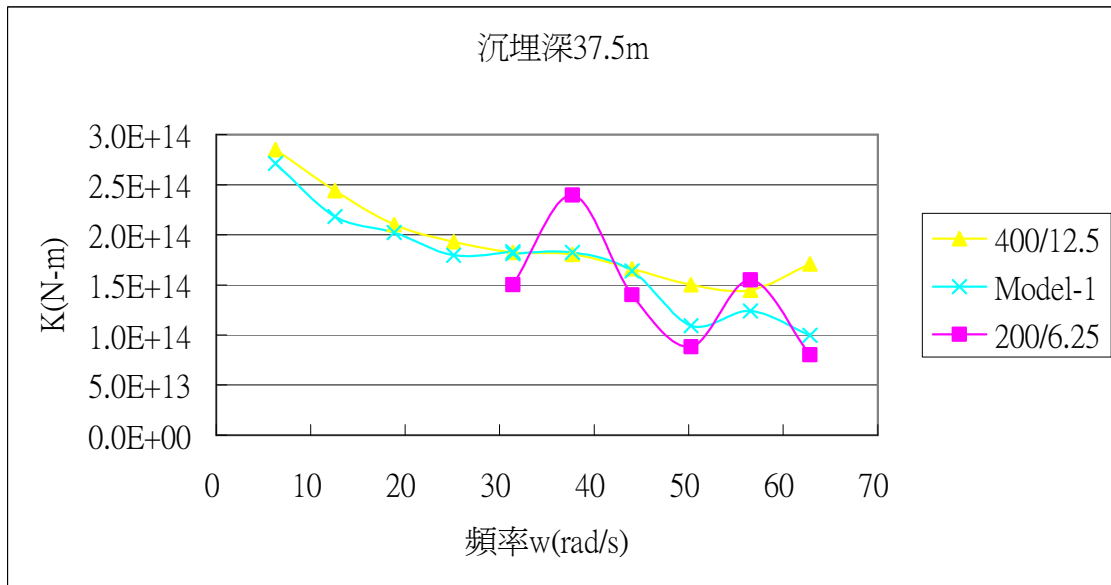
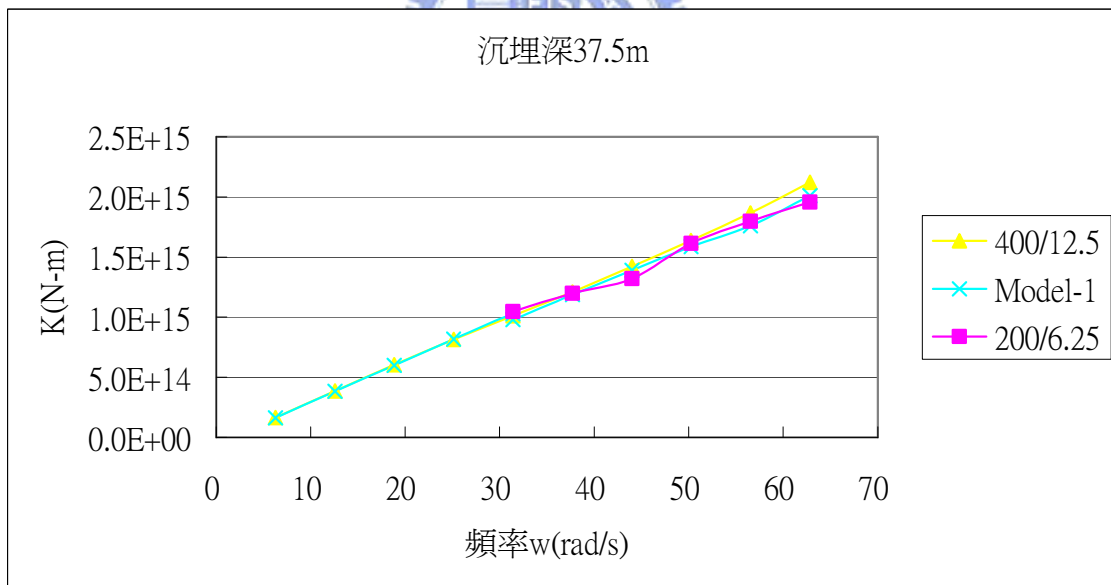


圖 5-12 沉埋 37.5 m 垂直方向之勁度

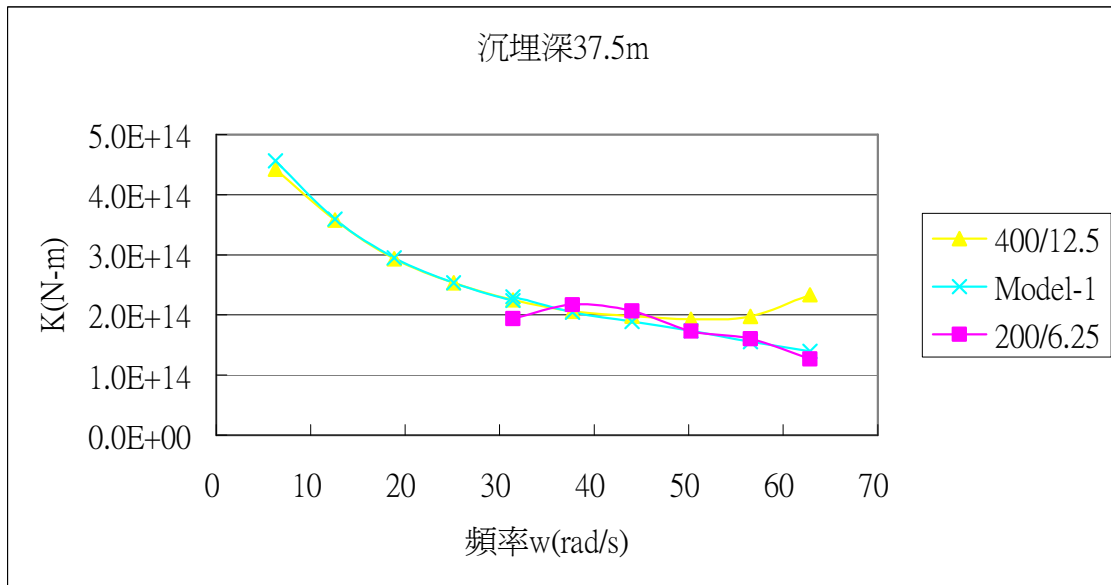


(a)實部部份

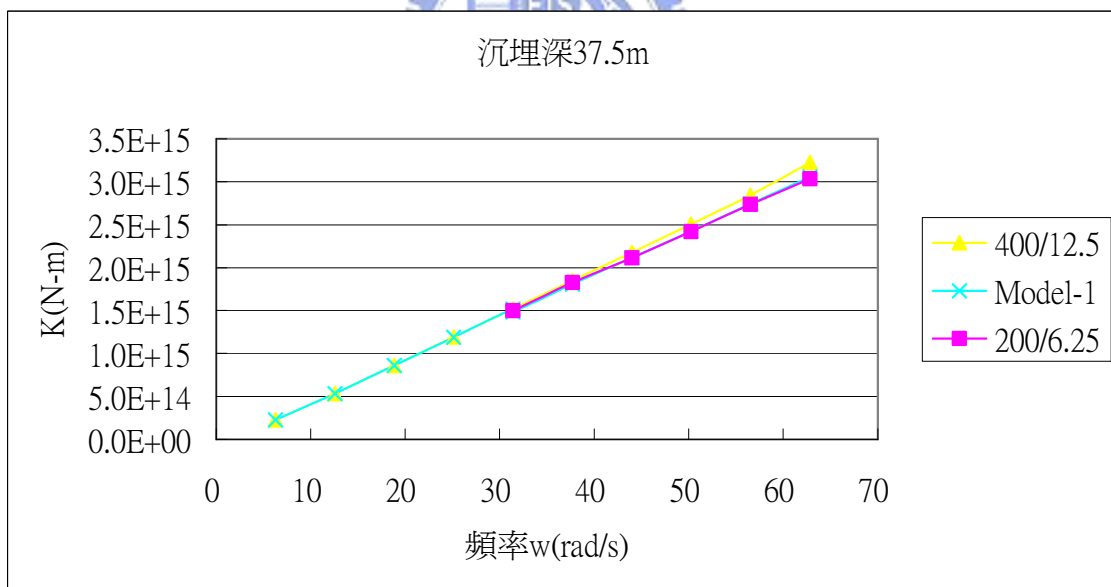


(b)虛部部份

圖 5-13 沉埋 37.5 m 翻轉方向之勁度

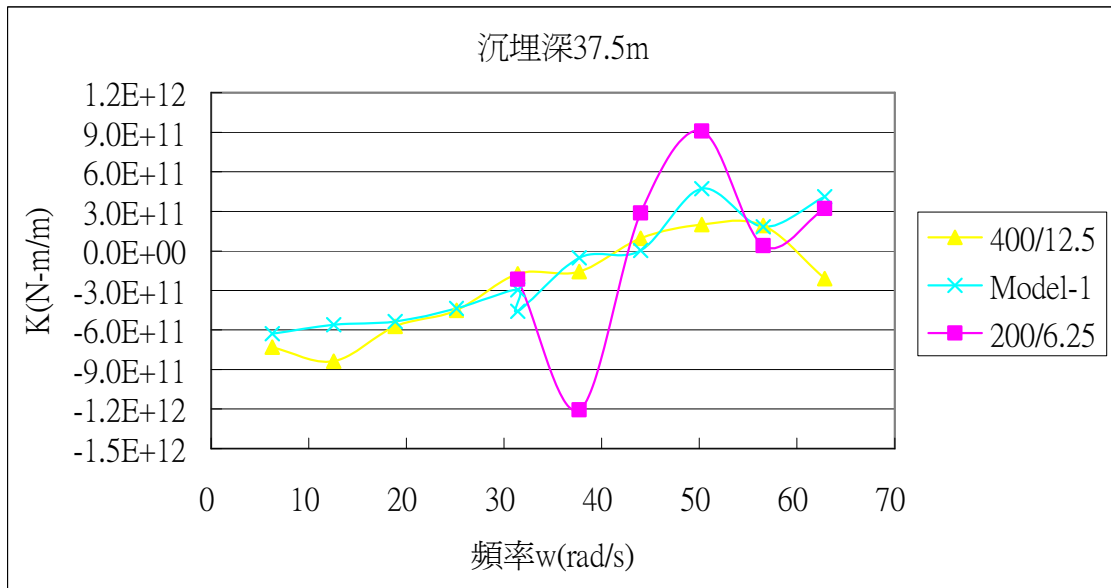


(a)實部部份

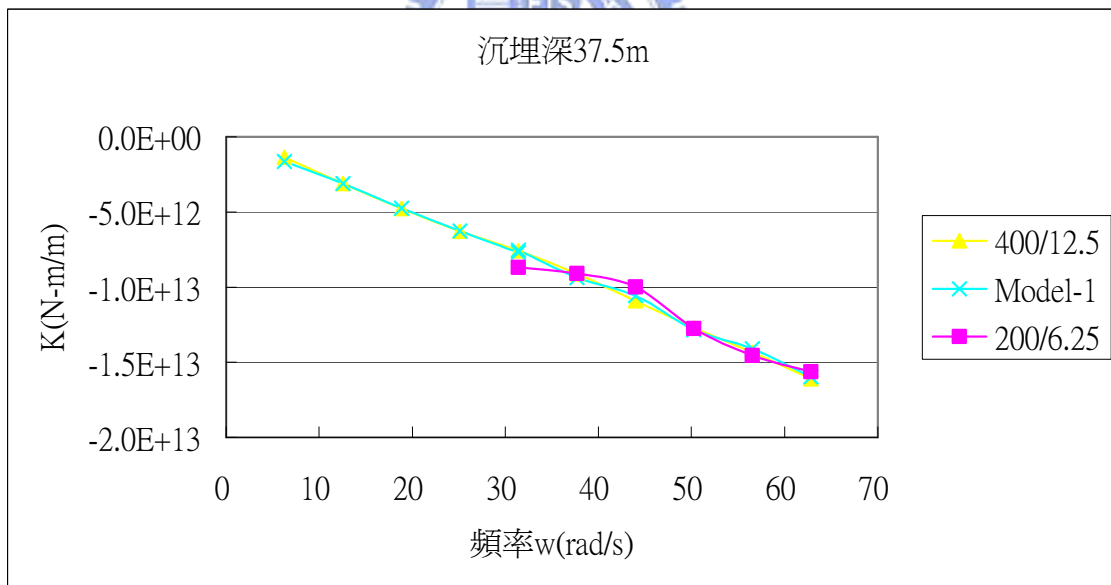


(b)虛部部份

圖 5-14 沉埋 37.5 m 扭轉方向之勁度



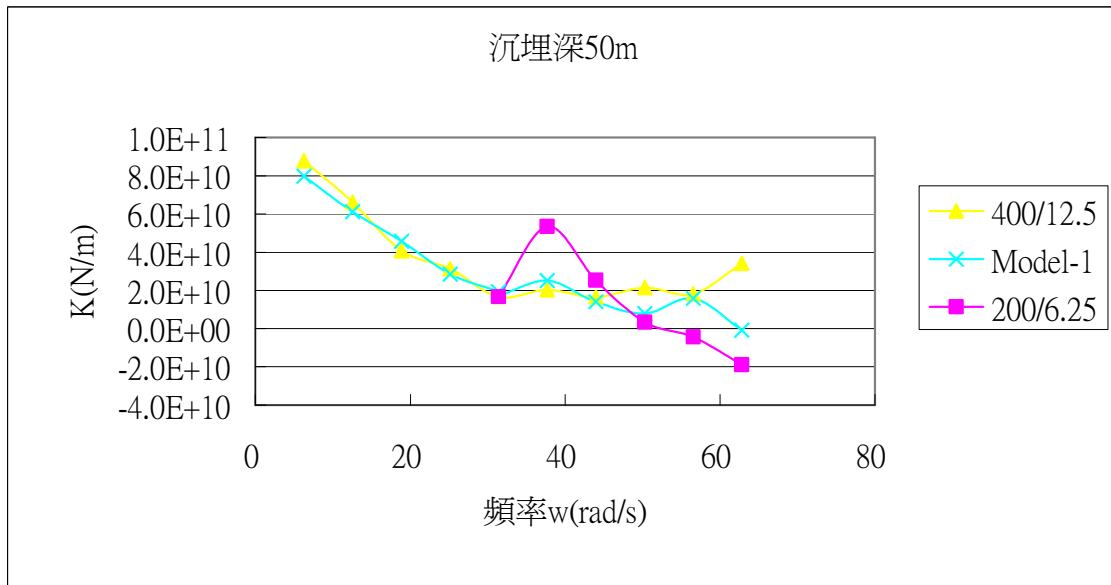
(a)實部部份



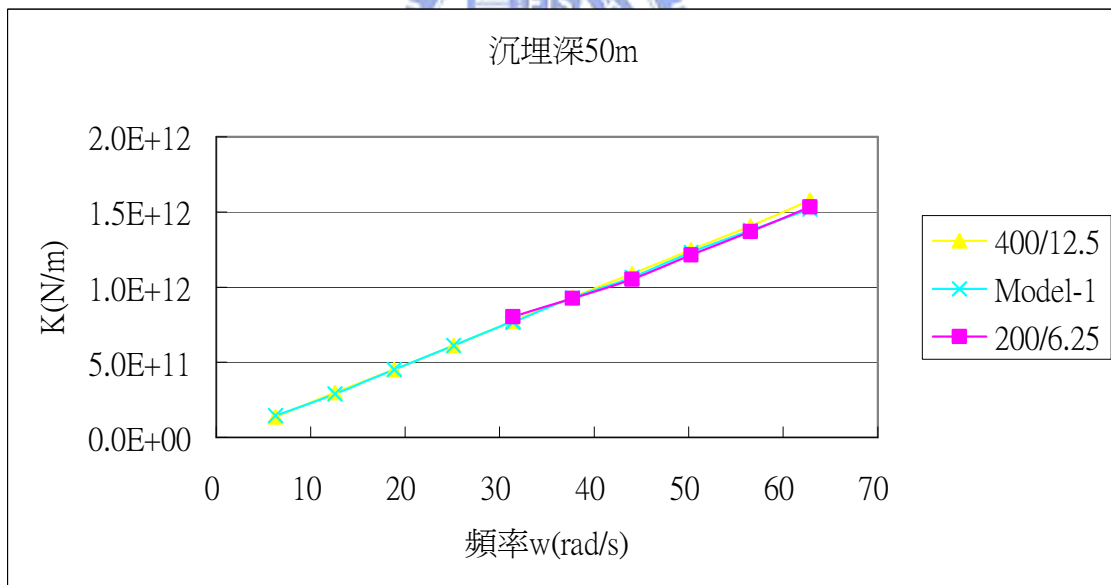
(b)虛部部份

圖 5-15 沉埋 37.5 m 耦合方向之勁度



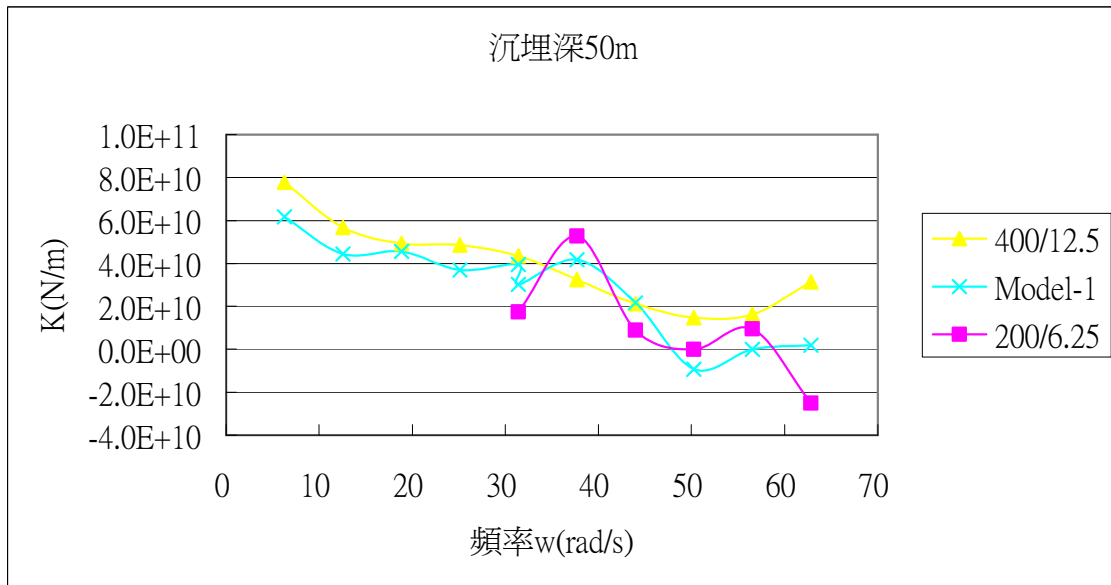


(a)實部部份

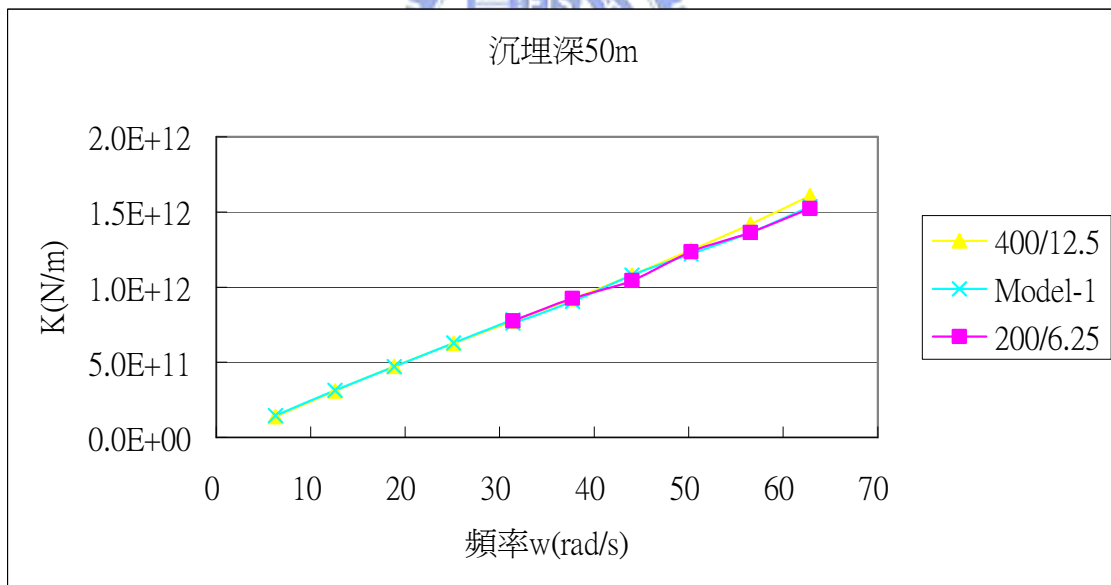


(b)虛部部份

圖 5-16 沉埋 50 m 水平方向之勁度

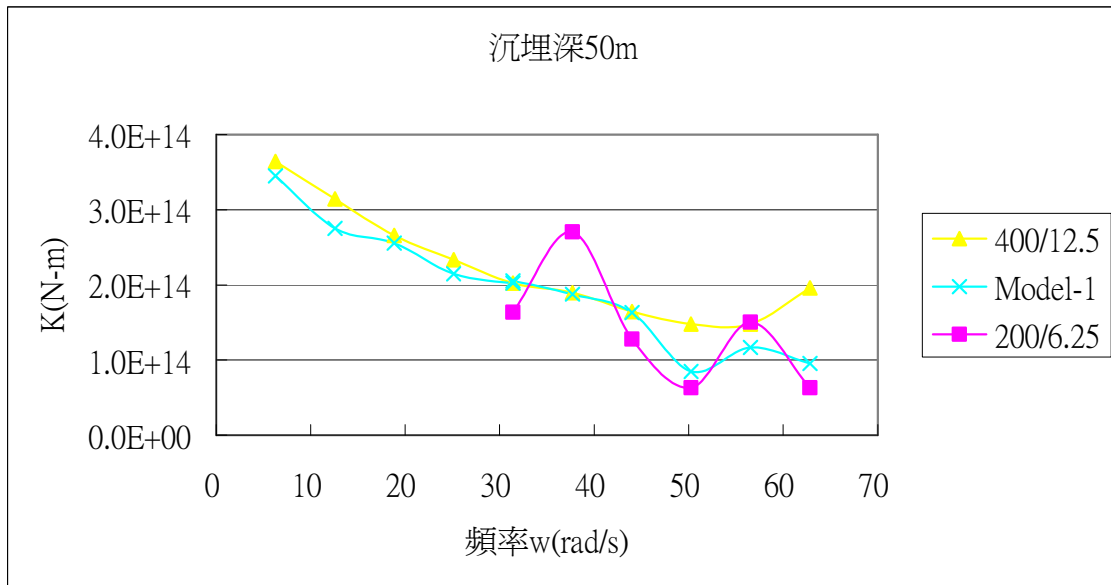


(a)實部部份

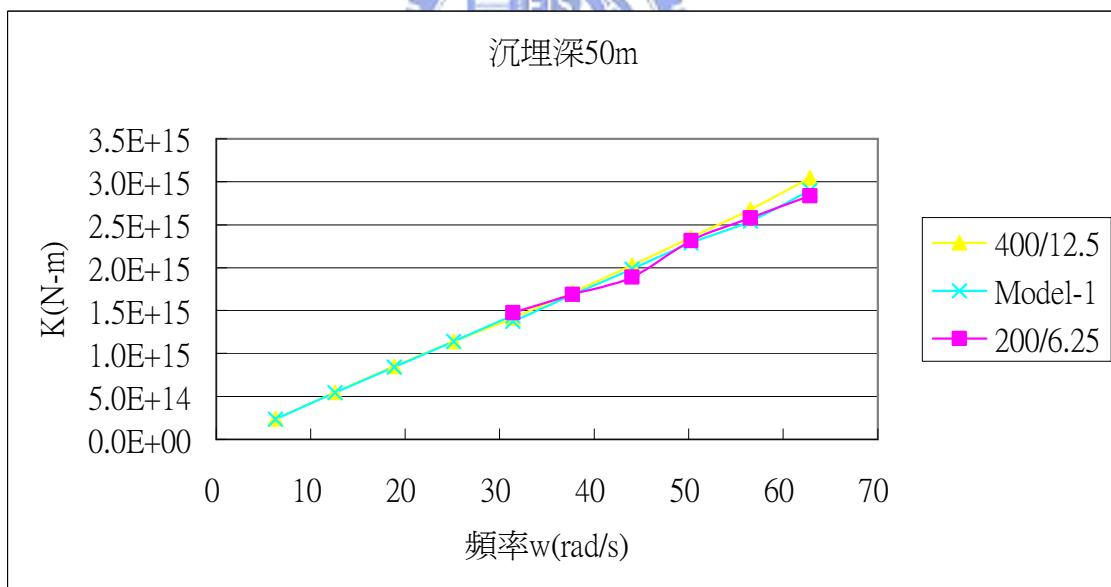


(b)虛部部份

圖 5-17 沉埋 50 m 垂直方向之勁度

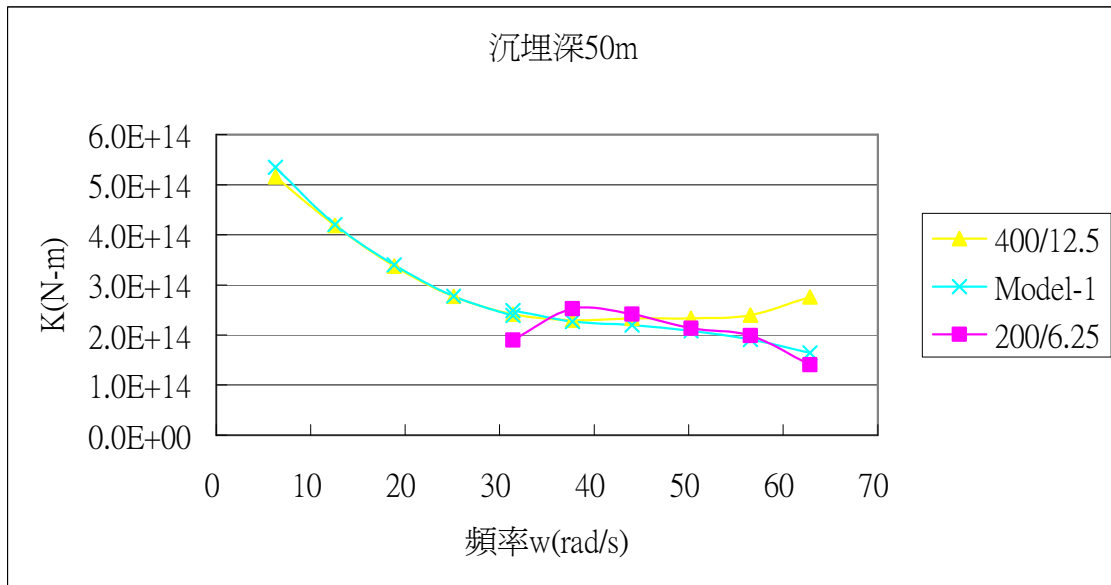


(a)實部部份

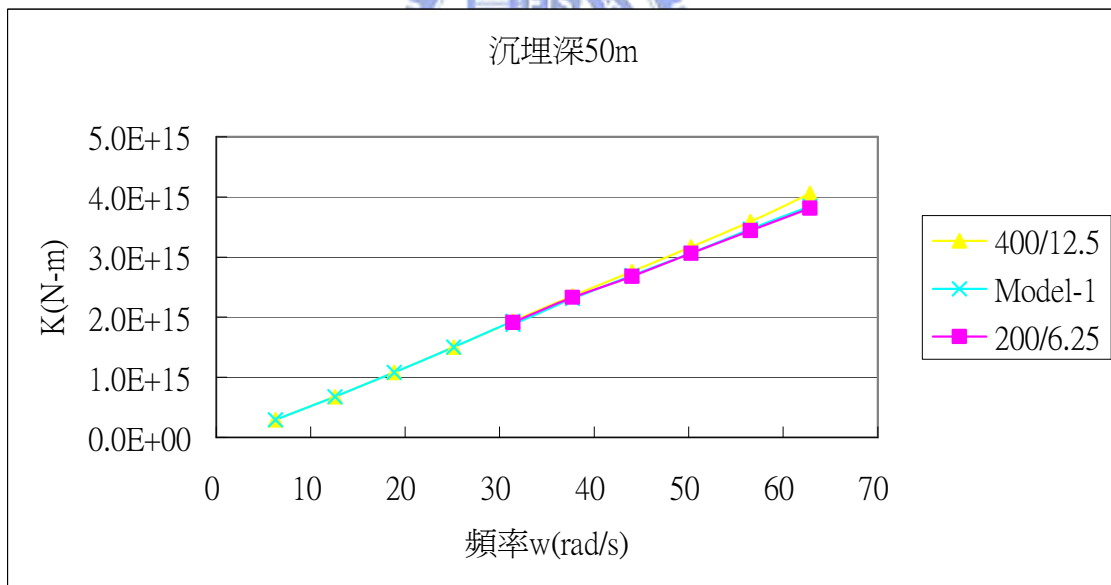


(b)虛部部份

圖 5-18 沉埋 50 m 翻轉方向之勁度

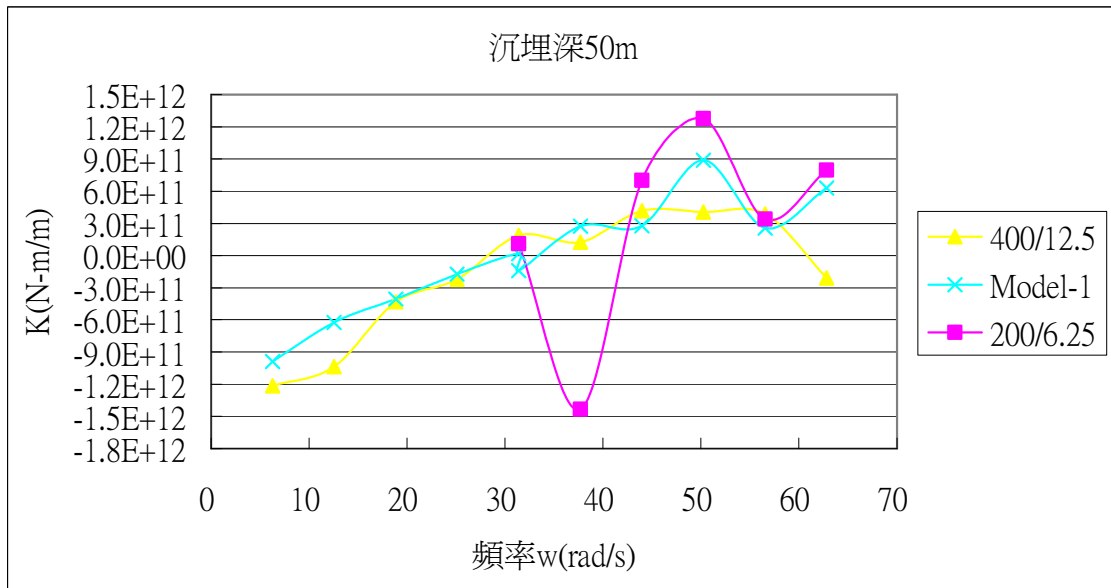


(a)實部部分

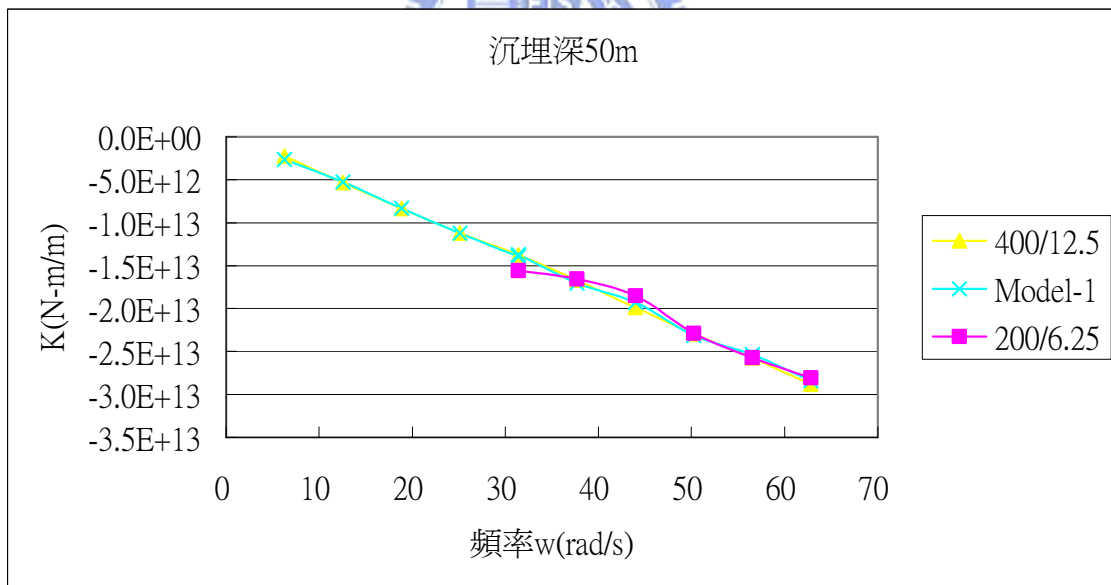


(b)虛部部份

圖 5-19 沉埋 50 m 扭轉方向之勁度

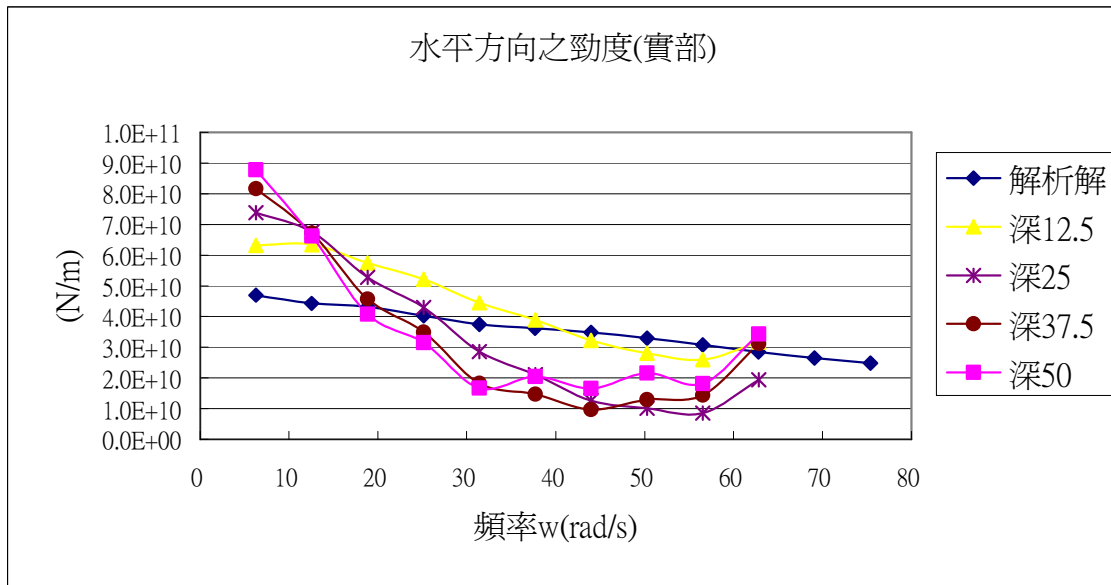


(a)實部部份

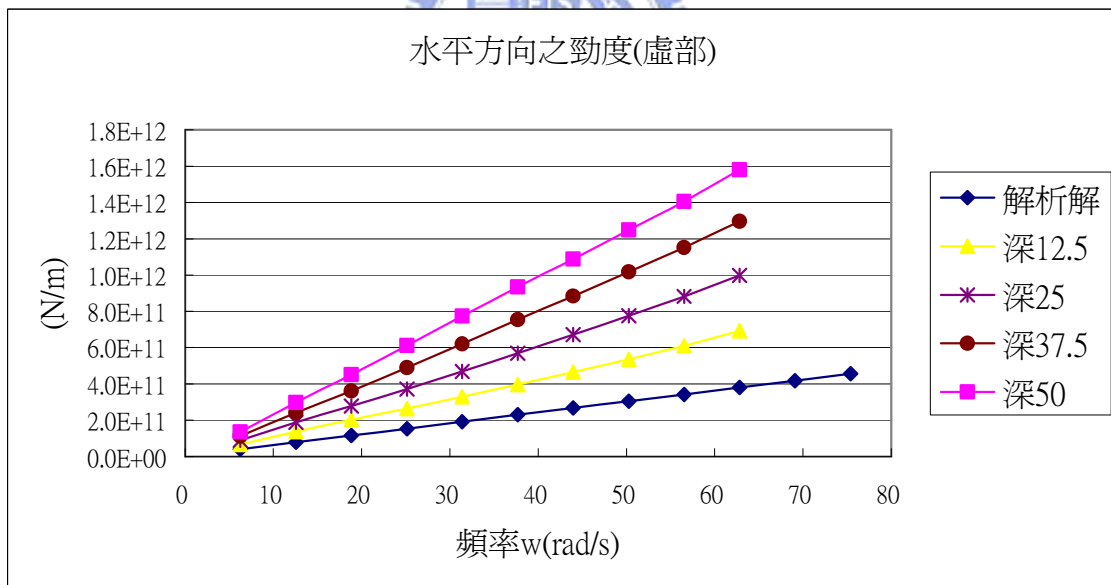


(b)虛部部份

圖 5-20 沉埋 50 m 耦合方向之勁度

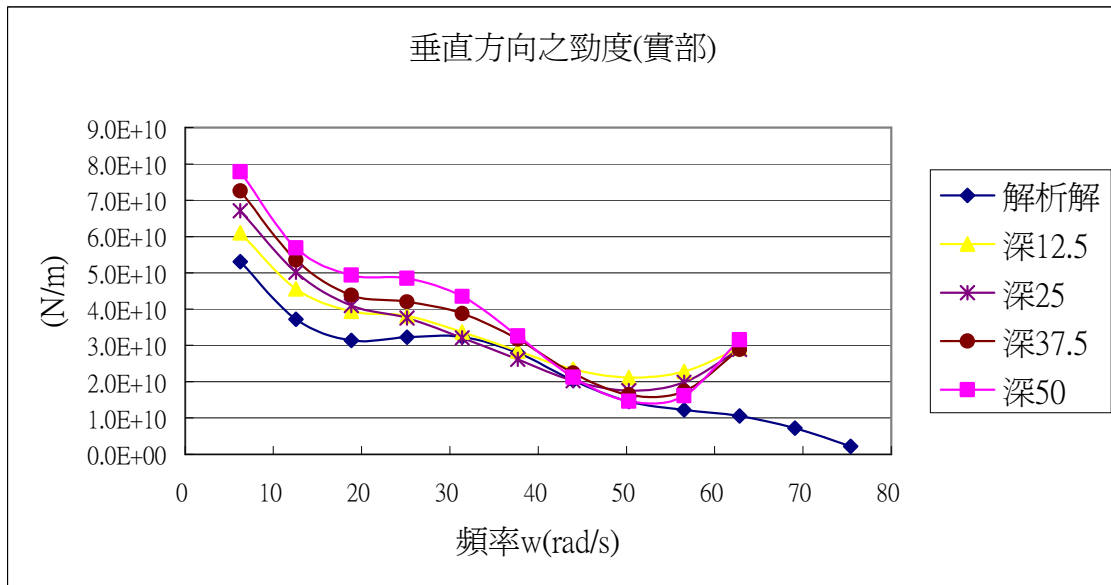


(a)水平方向之勁度實部部份

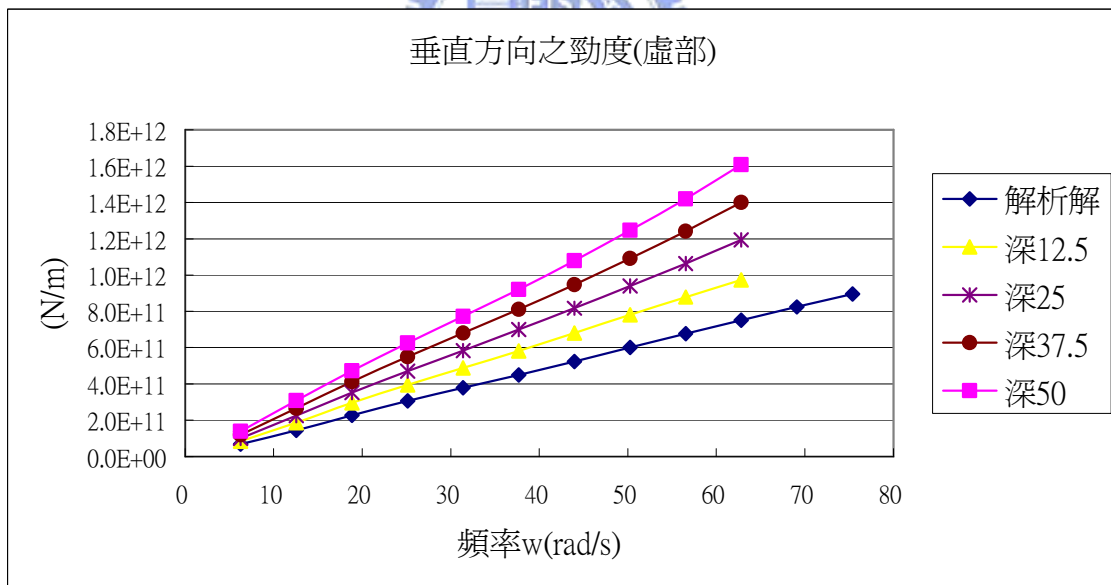


(b)水平方向之勁度虛部部份

圖 5-21 沉埋對剛性基礎之影響比較(以 400/12.5 之模型比較)

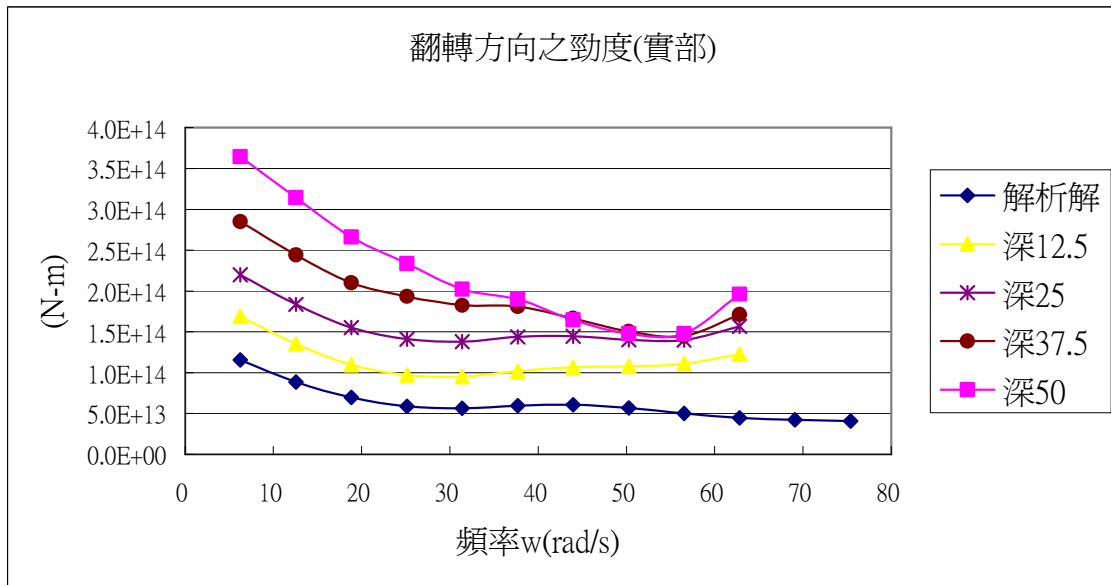


(a)垂直方向之勁度實部部份

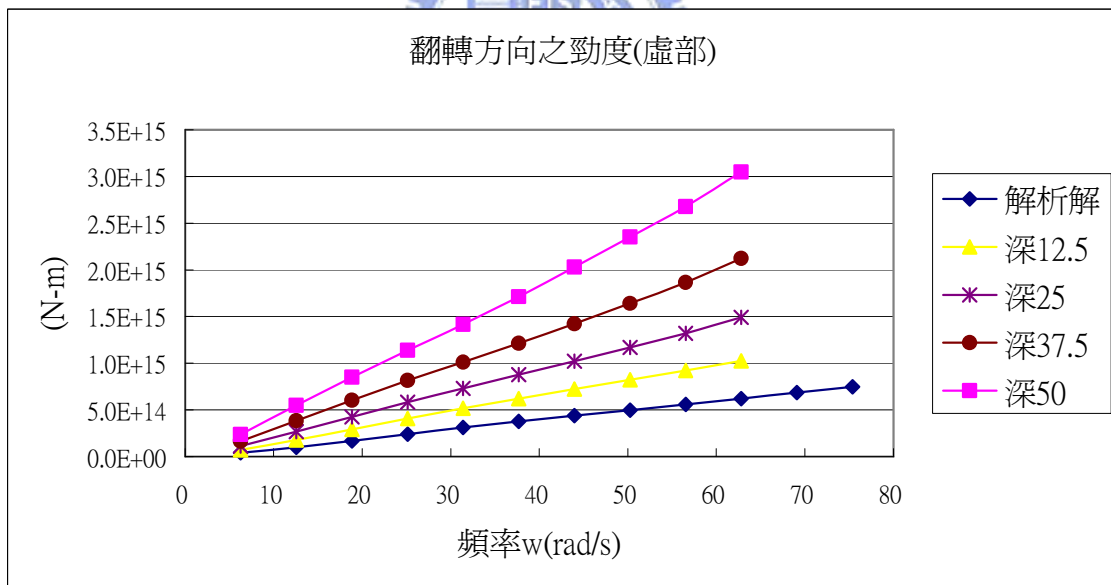


(b)垂直方向之勁度虛部部份

圖 5-22 沉埋對剛性基礎之影響比較(以 400/12.5 之模型比較)



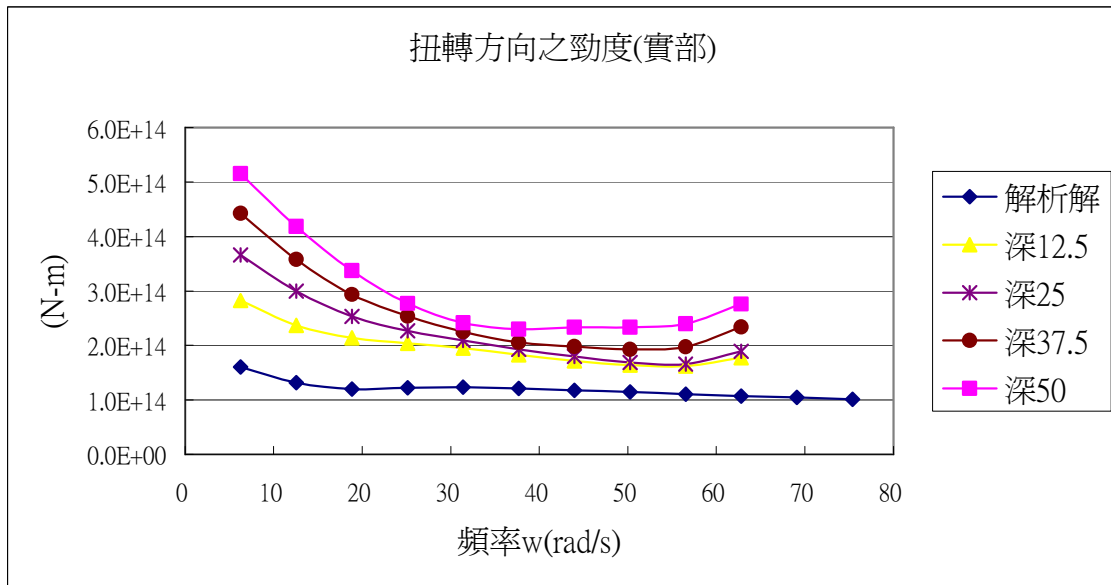
(a)翻轉方向之勁度實部部份



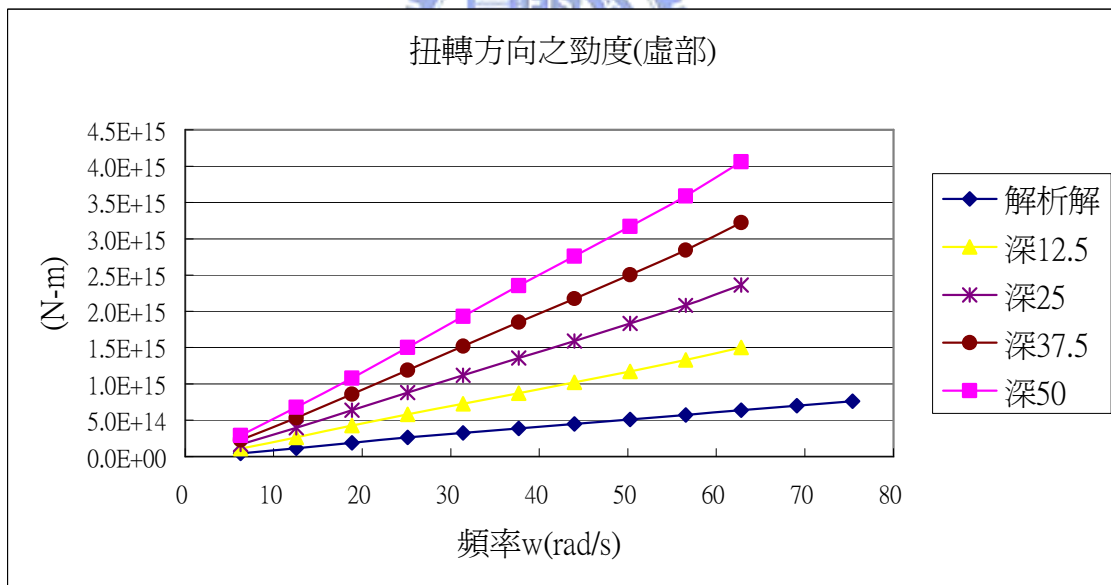
(b)翻轉方向之勁度虛部部份

圖 5-23 沉埋對剛性基礎之影響比較(以 400/12.5 之模型比較)





(a) 扭轉方向之勁度實部份



(b) 扭轉方向之勁度虛部份

圖 5-24 沉埋對剛性基礎之影響比較(以 400/12.5 之模型比較)

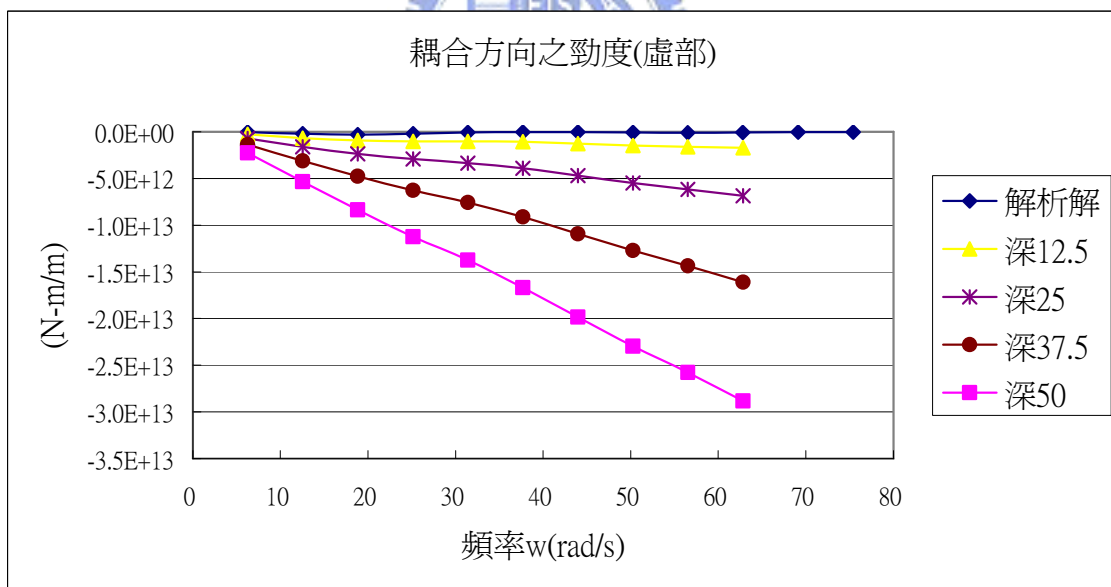
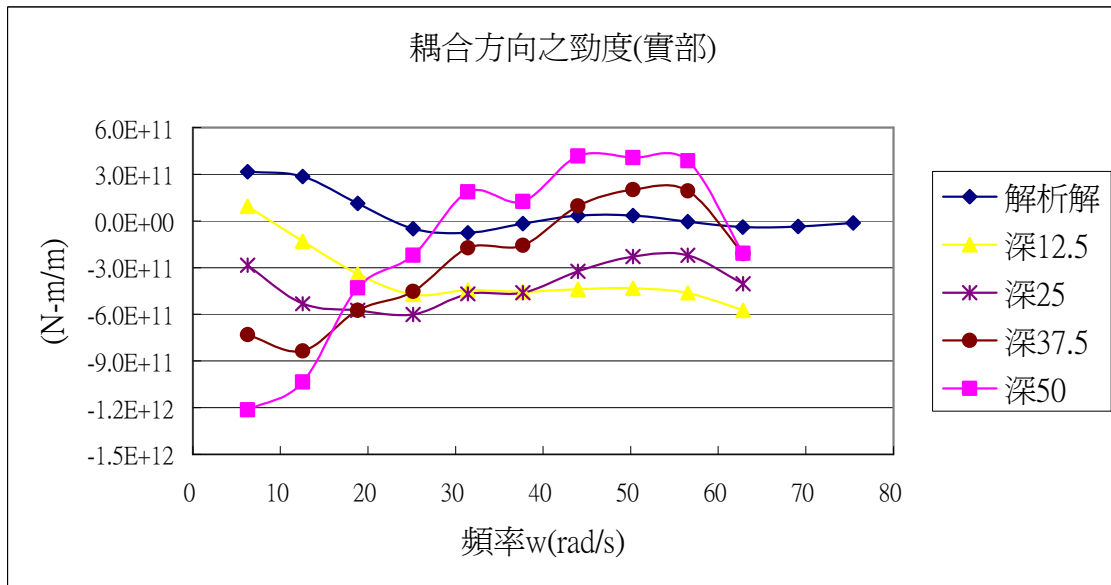


圖 5-25 沉埋對剛性基礎之影響比較(以 400/12.5 之模型比較)