

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

簡諧點荷重之基盤反應

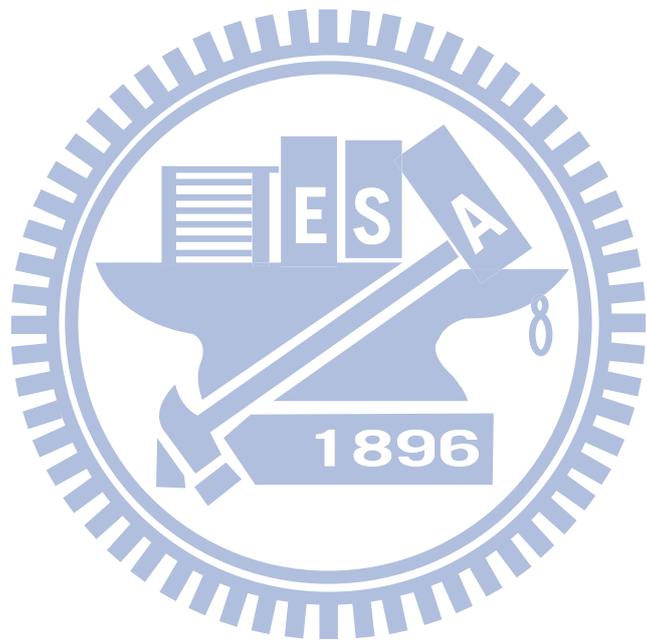
Response of Half-Space Medium due to Harmonic Point Load



研究生：方彥鈞

指導教授：劉俊秀 教授

中華民國一〇一年十一月



簡諧點荷重之基盤反應
Response of Half-Space Medium due to Harmonic Point Load

研究生：方彥鈞

Student : Yen-Jhun Fang

指導教授：劉俊秀

Advisor : Gin-Show Liou

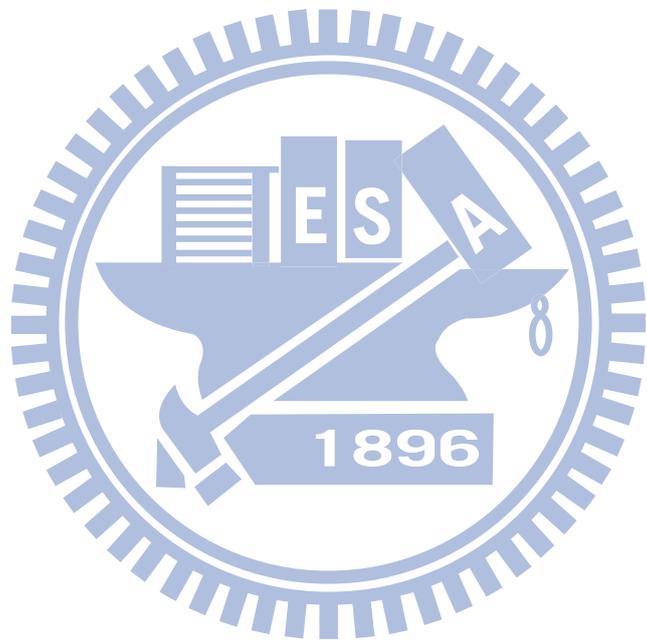


Civil Engineering

November 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年十一月



簡諧點荷重之基盤反應

學生：方彥鈞

指導教授：劉俊秀

國立交通大學土木工程學系

中文摘要

本研究主要之目的為探討環境外力對於台灣光子源屏蔽隧道區所產生之波傳振動問題。

本論文為採用有限元素法套裝軟體 ABAQUS，以三維模型進行頻率域分析。首先須驗證 ABAQUS 軟體分析波傳問題之精確性，接著再以收斂性分析之結果建立實際案例模型，針對簡諧點荷重作用下的強迫振動進行數值模擬。

最後，在實際案例分析中，將分為三個主題來探討，第一個主題為對於無開挖之土壤，有無放置屏蔽隧道區之比較，結果顯示有放置屏蔽隧道區之位移反應會較小；第二個主題為對於全開挖之土壤，有無放置屏蔽隧道區之比較，結果顯示有放置屏蔽隧道區之位移反應會較小；第三個主題為對於放置屏蔽隧道區之後，土壤有無開挖之比較，結果顯示全開挖之土壤其位移反應會較小。

而在實際案例 2 分析中，對於半開挖之土壤，有無放置加速器環館之比較，結果顯示在鉛垂向振動所產生之位移，其測點 A 之 U_r 會變小， U_z 為變大，而測點 B 之位移則皆為變小；在水平向振動所產生之位移，不論是在測點 A 還是測點 B，其 U_r 皆會變小， U_z 則會有兩種情況，在低頻時變小，高頻時變大。

關鍵詞：ABAQUS、彈性波傳理論、有限元素法

Response of Half-Space Medium due to Harmonic Point Load

Student : Yen-Jhun Fang

Advisors : Dr.Gin-Show Liou

Institute of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The main goal of this research lies on analyzing wave propagation problem at the storage ring tunnel of Taiwan Photon Source.

The finite element program ABAQUS is selected for analysis. First, we set up an ideal model and analyzed it to obtain numerical solutions by changing element sizes and domain sizes. Then we compared the numerical solutions with the theoretical solutions in order to examine the accuracy and convergence of the program. After that, we discussed how to select proper parameters to model the real situations. And then, wave propagation in half-space medium caused by harmonic point load is analyzed.

In these analysis, the results for the case without tunnel will be compared with that with tunnel, and the results without excavation will be compared with that with excavation. By the comparisons, one can observe that the vibrations, for the case with tunnel and the vibrations for the case with excavation are smaller.

Keywords : ABAQUS, wave propagation, finite element method

誌謝

在研究所修業期間，承蒙恩師 劉俊秀教授於研究及學業上悉心指導與教誨，師恩浩瀚，永誌於心。同時也感謝 鄭復平教授以及 黃炯憲教授在百忙之中撥冗擔任口試委員，於口試期間詳細審閱及斧正，賜與寶貴意見，使得論文倍臻完善，謹此表達誠摯之謝意。

在論文研究期間，承蒙王俊超學長與郭恆志學長照顧與協助，在數值程式部分要特別感謝已經畢業的孫紀戎學長提供我許多相關知識，還要感謝學弟兼朋友的碩亨、翊文、耕白、騏璋、子堯、秉洋、哲維、正鼎、佳皓以及佳哲等，為我的生活增添不少的樂趣。因為有你們的扶持與鼓勵，我才能順利拿到碩士學位，感謝上天賜給我這麼多人生的良伴，讓我一路走來倍感溫馨。

最後要感謝我的家人，感謝爸爸、媽媽在經濟、生活上的全力支持，使我可以無憂無慮的專心為學業而衝刺，謹將本論文獻給我摯愛的家人。



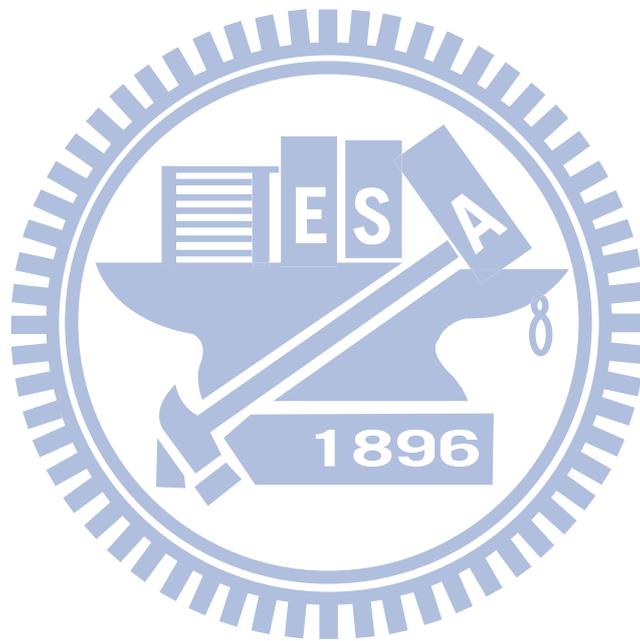
目錄

中文摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表次	vii
圖次	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的與方法	2
1.3 研究內容	2
第二章 彈性波傳理論	3
2.1 彈性波傳簡介	3
2.2 彈性波傳控制方程式	3
2.2.1 壓力波	6
2.2.2 剪力波	7
2.2.3 雷利波	8
2.2.4 波速比較	11
第三章 數值模擬分析	13
3.1 分析軟體簡介	13
3.2 基本模型	14
3.2.1 材料參數與土壤阻尼	14
3.2.2 分析模式與施力方式	16
3.2.3 採用元素與邊界條件	16
3.3 簡諧外力作用於剛性基礎上（半徑 12.5m）	16
3.3.1 收斂性探討	17

3.3.2	網域範圍探討.....	17
3.3.3	元素大小探討.....	19
3.4	簡諧外力作用於剛性基礎上（半徑 25m）.....	21
3.4.1	分析結果與探討.....	21
3.5	簡諧外力作用於半無限域上.....	22
3.5.1	分析結果與探討.....	23
3.6	所需電腦資源.....	24
3.7	模型驗證.....	25
3.8	小結.....	26
第四章	案例分析.....	28
4.1	基本模型.....	28
4.2	土壤無開挖之分析.....	29
4.2.1	分析結果與探討.....	29
4.3	土壤全開挖之分析.....	31
4.3.1	分析結果與探討.....	32
4.4	綜合分析.....	34
4.4.1	分析結果與探討.....	34
4.5	小結.....	36
第五章	案例分析 2.....	39
5.1	基本模型.....	39
5.2	收斂性分析.....	40
5.2.1	分析結果與探討.....	40
5.3	土壤半開挖之分析.....	42
5.3.1	分析結果與探討.....	43
5.4	小結.....	44
第六章	結論與建議.....	46
6.1	結論.....	46

6.2 建議.....47

REFERENCE48



表次

Table 3.1	ABAQUS 單位表格[11]	50
Table 3.2	最佳模型大小/元素尺寸	50
Table 3.3	各模型元素與節點數目	51
Table 3.4	各模型所需之運算時間	52
Table 5.1	土壤半開挖之收斂性分析（鉛垂力-測點 A）	53
Table 5.2	土壤半開挖之收斂性分析（鉛垂力-測點 B）	53
Table 5.3	土壤半開挖之收斂性分析（水平力-測點 A）	54
Table 5.4	土壤半開挖之收斂性分析（水平力-測點 B）	54
Table 5.5	土壤半開挖之分析（鉛垂力-測點 A）	55
Table 5.6	土壤半開挖之分析（鉛垂力-測點 B）	55
Table 5.7	土壤半開挖之分析（水平力-測點 A）	56
Table 5.8	土壤半開挖之分析（水平力-測點 B）	56



圖次

Fig. 2.1	壓力波波傳遞方向與介質振動方向的示意圖[13]	57
Fig. 2.2	剪力波波傳遞方向與介質振動方向的示意圖[13]	57
Fig. 2.3	雷利波波傳遞方向與介質振動方向的示意圖[13]	57
Fig. 2.4	元素表面應力分佈圖[6]	58
Fig. 2.5	半無限域表面平面波傳遞於 X-Z 平面[6]	58
Fig. 2.6	P、S、R 波波速比較圖[6]	59
Fig. 2.7	半無限域表面三種波傳攜帶能量百分比[7]	59
Fig. 3.1	三維實體元素 15-node[14]	60
Fig. 3.2	三維實體元素 20-node[14]	60
Fig. 3.3	三維無限元素 12-node[14]	61
Fig. 3.4	實體元素的命名及其代表的意義[14]	61
Fig. 3.5	ABAQUS 四分之一模型示意圖	62
Fig. 3.6	圓柱座標系統示意圖	62
Fig. 3.7	模型一之網域範圍收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r ）	63
Fig. 3.8	模型一之網域範圍收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z ）	64
Fig. 3.9	模型一之網域範圍收斂性分析（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r ）	65
Fig. 3.10	模型一之網域範圍收斂性分析（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z ）	66
Fig. 3.11	模型一之網域範圍收斂性分析（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ ）	67
Fig. 3.12	模型一之元素大小收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r ）	68
Fig. 3.13	模型一之元素大小收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z ）	69
Fig. 3.14	模型一之元素大小收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r ）	70
Fig. 3.15	模型一之元素大小收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z ）	71
Fig. 3.16	模型一之元素大小收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r ）	72
Fig. 3.17	模型一之元素大小收斂性分析（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z ）	73

Fig. 3.18	模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	.....74
Fig. 3.19	模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	.....75
Fig. 3.20	模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	.....76
Fig. 3.21	模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	.....77
Fig. 3.22	模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	.....78
Fig. 3.23	模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	.....79
Fig. 3.24	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	.....80
Fig. 3.25	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	.....81
Fig. 3.26	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ)	.....82
Fig. 3.27	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	.....83
Fig. 3.28	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	.....84
Fig. 3.29	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_θ)	.....85
Fig. 3.30	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	.....86
Fig. 3.31	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	.....87
Fig. 3.32	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ)	.....88
Fig. 3.33	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	.....89
Fig. 3.34	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	.....90
Fig. 3.35	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ)	.....91
Fig. 3.36	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	.....92
Fig. 3.37	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	.....93
Fig. 3.38	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ)	.....94
Fig. 3.39	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	.....95
Fig. 3.40	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	.....96
Fig. 3.41	模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ)	.....97
Fig. 3.42	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	.....98
Fig. 3.43	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	.....99

Fig. 3.44	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	... 100
Fig. 3.45	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	... 101
Fig. 3.46	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	... 102
Fig. 3.47	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	... 103
Fig. 3.48	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	... 104
Fig. 3.49	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	... 105
Fig. 3.50	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	... 106
Fig. 3.51	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	... 107
Fig. 3.52	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	.. 108
Fig. 3.53	模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	.. 109
Fig. 3.54	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	... 110
Fig. 3.55	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	... 111
Fig. 3.56	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ)	... 112
Fig. 3.57	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	... 113
Fig. 3.58	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	... 114
Fig. 3.59	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_θ)	... 115
Fig. 3.60	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	... 116
Fig. 3.61	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	... 117
Fig. 3.62	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ)	... 118
Fig. 3.63	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	... 119
Fig. 3.64	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	... 120
Fig. 3.65	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ)	... 121
Fig. 3.66	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	... 122
Fig. 3.67	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	... 123
Fig. 3.68	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ)	... 124
Fig. 3.69	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	.. 125

Fig. 3.70	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	...126
Fig. 3.71	模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ)	...127
Fig. 3.72	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	....128
Fig. 3.73	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	....129
Fig. 3.74	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	....130
Fig. 3.75	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	....131
Fig. 3.76	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	....132
Fig. 3.77	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	....133
Fig. 3.78	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	....134
Fig. 3.79	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	....135
Fig. 3.80	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	....136
Fig. 3.81	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	....137
Fig. 3.82	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	...138
Fig. 3.83	模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	...139
Fig. 3.84	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	....140
Fig. 3.85	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	....141
Fig. 3.86	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ)	....142
Fig. 3.87	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	....143
Fig. 3.88	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	....144
Fig. 3.89	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_θ)	....145
Fig. 3.90	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	....146
Fig. 3.91	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	....147
Fig. 3.92	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ)	....148
Fig. 3.93	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	....149
Fig. 3.94	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	....150
Fig. 3.95	模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ)	....151

Fig. 3.96	模型三之元素大小收斂性分析（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r）	.... 152
Fig. 3.97	模型三之元素大小收斂性分析（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z）	.... 153
Fig. 3.98	模型三之元素大小收斂性分析（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ）	.... 154
Fig. 3.99	模型三之元素大小收斂性分析（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r ）	.. 155
Fig. 3.100	模型三之元素大小收斂性分析（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z ）	156
Fig. 3.101	模型三之元素大小收斂性分析（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ ）	157
Fig. 3.102	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r）	..... 158
Fig. 3.103	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z）	..... 159
Fig. 3.104	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r）	..... 160
Fig. 3.105	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z）	..... 161
Fig. 3.106	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r）	..... 162
Fig. 3.107	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z）	..... 163
Fig. 3.108	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r）	..... 164
Fig. 3.109	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z）	..... 165
Fig. 3.110	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r）	..... 166
Fig. 3.111	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z）	..... 167
Fig. 3.112	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r）	..... 168
Fig. 3.113	模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z）	..... 169
Fig. 3.114	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r）	..... 170
Fig. 3.115	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z）	..... 171
Fig. 3.116	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ）	..... 172
Fig. 3.117	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r）	..... 173
Fig. 3.118	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z）	..... 174
Fig. 3.119	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 3Hz 之 U_θ）	..... 175
Fig. 3.120	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r）	..... 176
Fig. 3.121	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z）	..... 177

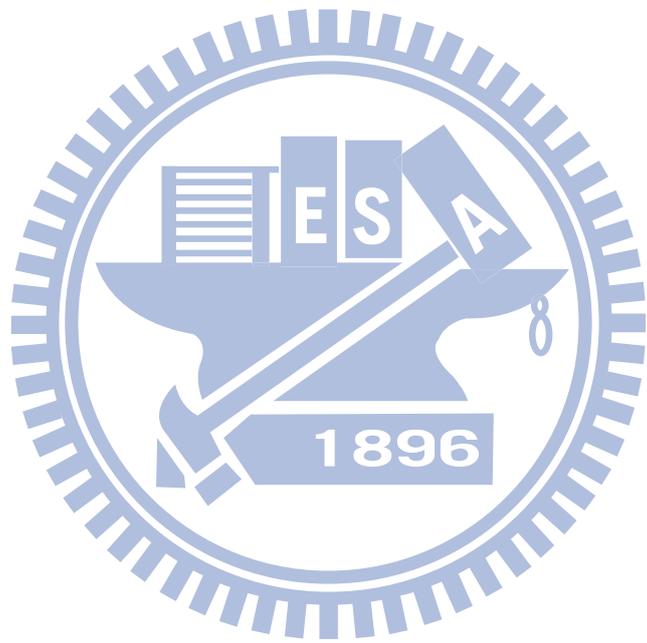
Fig. 3.122	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ ）	178
Fig. 3.123	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r ）	179
Fig. 3.124	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z ）	180
Fig. 3.125	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ ）	181
Fig. 3.126	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r ）	182
Fig. 3.127	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z ）	183
Fig. 3.128	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ ）	184
Fig. 3.129	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r ）	185
Fig. 3.130	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z ）	186
Fig. 3.131	模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ ）	187
Fig. 4.1	屏蔽隧道區之測點設置	188
Fig. 4.2	TPS-1F 平面配置圖	188
Fig. 4.3	屏蔽隧道區剖面圖	189
Fig. 4.4	七個施力點位置依序變動示意圖	189
Fig. 4.5	三維殼元素 8-node[14]	190
Fig. 4.6	殼元素的命名及其代表的意義[14]	190
Fig. 4.7	土壤無開挖之分析示意圖	191
Fig. 4.8	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_r ）	192
Fig. 4.9	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_z ）	193
Fig. 4.10	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_r ）	194
Fig. 4.11	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_z ）	195
Fig. 4.12	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_r ）	196
Fig. 4.13	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_z ）	197
Fig. 4.14	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_r ）	198
Fig. 4.15	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_z ）	199
Fig. 4.16	土壤無開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_r ）	200

Fig. 4.17	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_z)	201
Fig. 4.18	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_r)	202
Fig. 4.19	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_z)	203
Fig. 4.20	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_r)	204
Fig. 4.21	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_z)	205
Fig. 4.22	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 33m 之 U_r)	206
Fig. 4.23	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 33m 之 U_z)	207
Fig. 4.24	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 55m 之 U_r)	208
Fig. 4.25	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 55m 之 U_z)	209
Fig. 4.26	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 77m 之 U_r)	210
Fig. 4.27	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 77m 之 U_z)	211
Fig. 4.28	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_r)	212
Fig. 4.29	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_z)	213
Fig. 4.30	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 110m 之 U_r)	214
Fig. 4.31	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 110m 之 U_z)	215
Fig. 4.32	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 132m 之 U_r)	216
Fig. 4.33	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 132m 之 U_z)	217
Fig. 4.34	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 154m 之 U_r)	218
Fig. 4.35	土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 154m 之 U_z)	219
Fig. 4.36	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	220
Fig. 4.37	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	221
Fig. 4.38	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	222
Fig. 4.39	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	223
Fig. 4.40	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	224
Fig. 4.41	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	225
Fig. 4.42	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	226

Fig. 4.43	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	227
Fig. 4.44	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	228
Fig. 4.45	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	229
Fig. 4.46	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	230
Fig. 4.47	土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	231
Fig. 4.48	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	232
Fig. 4.49	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	233
Fig. 4.50	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	234
Fig. 4.51	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	235
Fig. 4.52	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	236
Fig. 4.53	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	237
Fig. 4.54	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	238
Fig. 4.55	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	239
Fig. 4.56	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	240
Fig. 4.57	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	241
Fig. 4.58	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	242
Fig. 4.59	土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	243
Fig. 4.60	土壤全開挖之分析示意圖	244
Fig. 4.61	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_r)	245
Fig. 4.62	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_z)	246
Fig. 4.63	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_r)	247
Fig. 4.64	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_z)	248
Fig. 4.65	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_r)	249
Fig. 4.66	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_z)	250
Fig. 4.67	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_r)	251
Fig. 4.68	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_z)	252

Fig. 4.69	土壤全開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_r ）	253
Fig. 4.70	土壤全開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_z ）	254
Fig. 4.71	土壤全開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_r ）	255
Fig. 4.72	土壤全開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_z ）	256
Fig. 4.73	土壤全開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_r ）	257
Fig. 4.74	土壤全開挖之分析（鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_z ）	258
Fig. 4.75	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 33m 之 U_r ）	259
Fig. 4.76	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 33m 之 U_z ）	260
Fig. 4.77	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 55m 之 U_r ）	261
Fig. 4.78	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 55m 之 U_z ）	262
Fig. 4.79	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 77m 之 U_r ）	263
Fig. 4.80	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 77m 之 U_z ）	264
Fig. 4.81	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_r ）	265
Fig. 4.82	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_z ）	266
Fig. 4.83	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 110m 之 U_r ）	267
Fig. 4.84	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 110m 之 U_z ）	268
Fig. 4.85	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 132m 之 U_r ）	269
Fig. 4.86	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 132m 之 U_z ）	270
Fig. 4.87	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 154m 之 U_r ）	271
Fig. 4.88	土壤全開挖之分析（水平方向施力點距中心 154m 之 U_z ）	272
Fig. 4.89	土壤全開挖之分析（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r ）	273
Fig. 4.90	土壤全開挖之分析（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z ）	274
Fig. 4.91	土壤全開挖之分析（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r ）	275
Fig. 4.92	土壤全開挖之分析（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z ）	276
Fig. 4.93	土壤全開挖之分析（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r ）	277
Fig. 4.94	土壤全開挖之分析（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z ）	278

Fig. 4.95	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	279
Fig. 4.96	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	280
Fig. 4.97	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	281
Fig. 4.98	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	282
Fig. 4.99	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	283
Fig. 4.100	土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	284
Fig. 4.101	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)	285
Fig. 4.102	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)	286
Fig. 4.103	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)	287
Fig. 4.104	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)	288
Fig. 4.105	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)	289
Fig. 4.106	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)	290
Fig. 4.107	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)	291
Fig. 4.108	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)	292
Fig. 4.109	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)	293
Fig. 4.110	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)	294
Fig. 4.111	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)	295
Fig. 4.112	土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)	296
Fig. 5.1	加速器環館測點之設置	297
Fig. 5.2	施力點位置示意圖	297
Fig. 5.3	土壤半開挖分析之示意圖	298



第一章 緒論

1.1 研究背景

隨著科技的進步，台灣在同步加速器光源及其科學應用皆有大幅成長，而為了提昇國內的研究環境，NSRRC 董事會於 2004 年 7 月決議推動新加速器光源之籌建，向政府提出「台灣光子源 (Taiwan Photon Source, TPS) 跨領域實驗設施興建計畫」，此計畫為在原有基地上興建一座「台灣光子源」同步加速器，將是有史以來規模最大的跨領域共用實驗設施，其微振動抑制之高更勝於半導體廠。

其中同步加速器光源能否穩定運轉，振動問題將會是重要的關鍵之一，而振動的來源一方面是外在的環境，例如交通的影響、機器設備的振動等；另一方面的來源是來自地表的震動[1]。為了提供穩定的實驗環境，所以有必要對其振動問題加以研究，以滿足嚴苛的微振動抑制之需求。

目前在分析波傳所產生的振動問題，主要可分為現地實驗及數值模擬兩種。就分析方法的比較，現地實驗的結果較符合實際情況，但須耗費相當大的人力與物力，且結果往往有地區性的限制；而數值模擬分析繼經濟簡便又適用性良好，但受限於計算機的處理能力，常存在著運算時間過長的問題，不過近年來由於計算機的軟硬體快速進步，已能逐漸克服此項缺點，因此也使得數值模擬分析成為較常被採用的分析方法。

目前應用最普遍的數值模擬分析方法，約可分為有限差分法 (finite difference method)、邊界元素法 (boundary element method) 及有限元素法 (finite element method)。其中有限元素法在邊界上會有反射波之問題，為了解決此問題，曾有學者配合無限元素之使用，並以高速電腦進行分析，也可得一經濟有效之數值結果。

有限元素法之分析是將整個問題直接以有限個元素建立數值模型模擬加以求解，由於有限元素法具有高度的操作彈性，特別適用於複雜的幾何形狀與土壤性質等實際情況，故本文選擇以有限元素法搭配無限元素的使用來分析半無限域之波傳問題，並探討如何選用適當的元素及網域，才能使分析結果更加的完整及正確。

1.2 研究目的與方法

本研究主要之目的為探討環境振動對於台灣光子源屏蔽隧道區之影響。

本文採用之方法為數值模擬，首先利用有限元素法套裝軟體 ABAQUS 建立一三維數值模型，並將分析所得之數值解與相同條件之解析解相互比對，藉由此問題以檢驗 ABAQUS 對於波傳問題之精確性及可行性，接著以實際案例進行數值模擬分析，其中同步加速器隧道區之幾何模型與相關參數，為參照實際之結構圖所建立，再於環境外部施予一單位之簡諧外力，經由 ABAQUS 軟體之運算，以探討環境外力在半無限域內之波傳行為所引致的位移振幅反應。

1.3 研究內容

本文共分成六章，第一章為緒論。

第二章為理論背景，介紹彈性波傳基本理論作為本文研究之基礎。

第三章為數值模擬分析，先簡介數值模擬所採用之有限元素法套裝軟體 ABAQUS 以及欲驗證此軟體其可行性之分析模型，包含模型的基本假設、材料參數與阻尼、分析模式與施力方式、邊界條件以及選用元素等，再透過網格之收斂性分析，找出近域至遠域間最佳的元素數量，以作為建立分析模型之基礎，最後以 Liou[2~5]之解析解驗證分析結果之準確性。

第四章為台灣光子源之實際案例，為本文重點所在，主要沿用第三章之土壤模型，並置加速器隧道區於上，探討若改變環境外力之位置以及不同的振動頻率之下，會對隧道區內之位移振幅反應造成何種影響。

第五章為台灣光子源之實際案例 2，同樣沿用第三章之土壤模型，並置加速器環館於上，探討若改變環境外力之位置以及不同的振動頻率之下，會對環館內之位移振幅反應造成何種影響。

第六章為研究之結論與建議，將本研究中所得到之分析結果做一總結陳述，綜合比較分析結果，討論其現象原理。

第二章 彈性波傳理論

2.1 彈性波傳簡介

一彈性體受外力作用引起應力和應變在介質內傳遞的形式。彈性介質中質點間存有互相作用之彈性力，當某一質點受到外力作用而離開平衡位置時，彈性力會使該質點發生振動，進而造成下一個質點跟著產生位移與振動，於是振動便在彈性介質中傳播，並伴隨著能量的傳遞。此種序列性的運動現象，即為波，而質點間能量之傳遞現象則稱為波傳。

波依其傳遞路徑的不同可分為兩大類，一是實體波 (body wave)，另一是表面波 (surface wave)。其中實體波又因介質中質點的振動方向與波的傳播方向分為壓力波 (primary wave) (Fig. 2.1) 及剪力波 (secondary wave) (Fig. 2.2) 兩類；而表面波亦有兩種型式，為雷利波 (Rayleigh wave) (Fig. 2.3) 與洛夫波 (Love wave)。表面波的傳遞相較於壓力波慢而強烈，是引起地震中大部分破壞的主要因素，故在相關的研究中相當受到注意。

2.2 彈性波傳控制方程式

彈性波傳控制方程式的推導已有百年以上的歷史，相關的理論與著作也都有學者編寫為參考書籍，如 Richard[6]、Kramer[7] 等人，而其著作中皆利用材料的組成律、變形諧和加上力平衡的原理，來推得彈性波傳控制方程式，本節就以推導過程詳加說明。

(1) 應變與位移的關係

在介質為均質、彈性、等向性的材料時，應變與位移的關係式定義為

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

(2) 應力與應變關係

根據廣義虎克定律 (General Hooke's law) 得知，應力與應變間的關係可表示如下

$$\sigma_i = C_{i,j} \varepsilon_j \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2.2.2)$$

勁度矩陣 $C_{i,j}$ 在本文僅考慮為均質、彈性、等向性的材料，故可用兩個拉姆常數 (Lame's constants) λ 、 μ 表示，於是彈性體應力與應變間的關係可寫為

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix}$$

$$\text{或} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \bar{\varepsilon} + 2\mu \varepsilon_{xx} \\ \lambda \bar{\varepsilon} + 2\mu \varepsilon_{yy} \\ \lambda \bar{\varepsilon} + 2\mu \varepsilon_{zz} \\ \mu \varepsilon_{xy} \\ \mu \varepsilon_{yz} \\ \mu \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

其中

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

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

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

由式 (2.2.1)、(2.2.3) 可得

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.2.4a)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.2.4b)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.2.4c)$$

$$\sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.2.4d)$$

$$\sigma_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.2.4e)$$

$$\sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.2.4f)$$

由式 (2.2.4) 可知波傳介質應變與應力之關係

(3) 力平衡方程式

根據牛頓第二運動定律，作用於一微小元素上的外力總和使元素產生為 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$

的加速度 (Fig. 2.4)，其在直角座標系的 x、y、z 方向可分開討論如下

假使忽略微體力 (body force) 之作用， $\Sigma F_x = 0$

$$\begin{aligned} \rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx \right) dy dz - \sigma_{xx} dy dz \\ &\quad + \left(\sigma_{xy} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} dy \right) dx dz - \sigma_{xy} dx dz \\ &\quad + \left(\sigma_{xz} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} dz \right) dx dy - \sigma_{xz} dx dy \end{aligned}$$

整理得

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.2.5a)$$

同理，由 $\Sigma F_y = 0$ 可得

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2.2.5b)$$

$\Sigma F_z = 0$ 可得

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.2.5c)$$

將式 (2.2.4) 代入 (2.2.5a) 可得

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \epsilon_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \epsilon_{xz})$$

或 $\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2.2.6a)$

同理，將式 (2.2.4) 分別代入 (2.2.5b)、(2.2.5c) 可得

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (2.2.6b)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (2.2.6c)$$

其中

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

式 (2.2.6) 即一般常見之彈性波傳控制方程式。而現今利用數值方法求解波傳問題常由式 (2.2.2)，先求取網格元素上之應力分佈 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{zx} ，再利用式 (2.2.5) 反求位移。

2.2.1 壓力波

壓力波為實體波的一種，其介質中質點的振動方向與波的傳播方向互相平行，藉由質點的交替壓縮與膨脹使波由震源向外傳遞。壓力波存在可承受壓力的介質中，故壓力波能在固體、液體或氣體中傳遞。

若將式 (2.2.6a)、(2.2.6b) 及式 (2.2.6c) 分別對 x 、 y 、 z 微分後相加可得

$$\rho \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial t^2} \right) = (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial z^2} \right)$$

整理後

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla^2 \bar{\varepsilon} + \mu \nabla^2 \bar{\varepsilon}$$

$$\text{或 } \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{\varepsilon} \quad (2.2.7)$$

其中定義壓力波於彈性體中的波速 v_p 為

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.2.8)$$

式 (2.2.8) 代表彈性體的膨脹量 $\bar{\varepsilon}$ 以壓力波波速 v_p 來傳遞，此種波稱為膨脹波 (dilatational wave)，又因其純由體積變化所產生，所以又稱為非旋轉波 (irrotational wave)。

2.2.2 剪力波

另一種實體波為剪力波，其介質中質點的振動方向與波的傳播方向互相垂直，靠著質點之間的剪應力來傳遞能量。如果介質無法承受剪應力則剪力波無法產生，是以剪力波通常多存在於固體中，而無法在黏滯力不足的液體或氣體中傳播。此外，由於質點的振動方向與波的傳播方向其互相垂直的方向不同，剪力波又可分為 SV 波和 SH 波。質點垂直入射面上下運動的稱為 SV 波，平行入射面左右運動稱為 SH 波。

將式 (2.2.6b) 對 z 微分及式 (2.2.6c) 對 y 微分，兩式相減後可得

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\text{或 } \frac{\partial^2 \Omega_x}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \Omega_x \quad (2.2.9)$$

其中定義剪力波於彈性體中的波速 v_s 為

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2.10)$$

Ω_x 亦可用 Ω_y 、 Ω_z 來表示， Ω_x 、 Ω_y 、 Ω_z 為繞 x 軸、y 軸、z 軸之旋轉量，其與變位的關係為

$$\Omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \right)$$

$$\Omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dz} - \frac{dw}{dx} \right)$$

$$\Omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \right)$$

式 (2.2.10) 顯示彈性體之旋轉 Ω 以剪力波波速 v_s 來傳遞，此種波稱為扭曲波 (distortional wave)，又因其純由彈性體之旋轉所產生，所以又稱為等體積波 (equivoluminal wave)。

2.2.3 雷利波

對於均質、等向性、彈性的介質，僅能產生上述之壓力波與剪力波，而對於彈性半無限域 (elastic half-space)，Lord Rayleigh 於 1885 年發現當振波沿其自由表面傳遞時，除了存在壓力波與剪力波外，還可求得另一種波—雷利波。雷利波行進時，其介質中質點在平行於震波傳遞的垂直面上沿著橢圓形軌跡作倒退的滾動。而質點之振幅隨深度的增加而衰減。

Rayleigh 考慮一作用於彈性體表面，向 x 方向前進且在 y 方向位移為零 ($v=0$) 的平面波動 (Fig. 2.5)，所有的質點運動均發生於 x-z 平面。假設兩勢能函數 Φ 、 Ψ 用來描述 x 及 z 方向之位移，定義為

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (2.2.11a)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (2.2.11b)$$

以式由 (2.2.11) 代入 $\bar{\epsilon} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{zz}$ 可得

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \Phi \quad (2.2.12)$$

又由 x-z 平面之旋轉與變位的關係可得

$$2\Omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \nabla^2 \Psi \quad (2.2.13)$$

將式 (2.2.11)、(2.2.12)、(2.2.13) 代入 (2.2.6a)、(2.2.6c) 可得

$$\rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Phi) + \mu \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Psi) \quad (2.2.14a)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Phi) - \mu \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Psi) \quad (2.2.14b)$$

將式 (2.2.14a) 對 x 做微分，式 (2.2.14b) 對 z 做微分，再進行相加可得

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \Phi = v_p^2 \nabla^2 \Phi \quad (2.2.15a)$$

將式 (2.2.14a) 對 z 做微分，式 (2.2.14b) 對 x 做微分，再進行相加可得

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \Psi = v_s^2 \nabla^2 \Psi \quad (2.2.15b)$$

若波為簡諧，頻率為 ω ，波數為 k_R ，則雷利波波速為 $v_R = \frac{\omega}{k_R}$ ，勢能函數可表

示為

$$\Phi = F(z) e^{i(\omega t - k_R x)} \quad (2.2.16a)$$

$$\Psi = G(z) e^{i(\omega t - k_R x)} \quad (2.2.16b)$$

其中 $F(z)$ 、 $G(z)$ 為描述雷利波隨深度擴張旋轉之振幅函數。將式 (2.2.16)

代回式 (2.2.15) 可得

$$-\frac{\omega^2}{v_p^2} F(z) = -k_R^2 F(z) + \frac{d^2 F(z)}{dz^2}$$

$$\frac{\omega^2}{v_s^2} G(z) = -k_R^2 G(z) + \frac{d^2 G(z)}{dz^2}$$

整理得

$$\frac{d^2 F}{dz^2} - \left(k_R^2 - \frac{\omega^2}{v_p^2} \right) F = 0 \quad (2.2.17a)$$

$$\frac{d^2 G}{dz^2} - \left(k_R^2 - \frac{\omega^2}{v_s^2} \right) G = 0 \quad (2.2.17b)$$

為 $F(z)$ 、 $G(z)$ 之二階常微分方程式。令 $q^2 = k_R^2 - \frac{\omega^2}{v_p^2}$ 、 $s^2 = k_R^2 - \frac{\omega^2}{v_s^2}$ ，則微分

方程之解為

$$F(z) = A_1 e^{-qz} + B_1 e^{qz} \quad (2.2.18a)$$

$$G(z) = A_2 e^{-sz} + B_2 e^{sz} \quad (2.2.18b)$$

式 (2.2.18) 之第二項顯示振幅隨著深度增加而加大，與真實物裡現象不符故 B_1 、 B_2 須為零，於是勢能函數 Φ 、 Ψ 最後可表示為

$$\Phi = A_1 e^{-qz + i(\omega t - k_R x)} \quad (2.2.19a)$$

$$\Psi = A_2 e^{-sz + i(\omega t - k_R x)} \quad (2.2.19b)$$

接著由自由表面的邊界條件可知，在半無限域的自由表面 $z=0$ 處應力

$$\sigma_{zz} = \lambda \bar{\varepsilon} + 2\mu \varepsilon_{zz} = \lambda \bar{\varepsilon} + 2\mu \frac{dw}{dz} = 0 \quad (2.2.20a)$$

$$\sigma_{xz} = \mu \varepsilon_{xz} = \mu \left(\frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz} \right) = 0 \quad (2.2.20b)$$

由位移 $u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z}$ 、 $w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x}$ 的定義及勢能函數式 (2.2.19) 之表示式，

可將邊界條件式 (2.2.20) 改寫為

$$\sigma_{zz}(z=0) = A_1 [(\lambda + 2\mu)q^2 - \lambda k_R^2] - 2iA_2 \mu k_R s = 0$$

$$\sigma_{xz}(z=0) = 2iA_1 k_R q + A_2 (s^2 + k_R^2) = 0$$

整理後可得

$$\frac{A_1 (\lambda + 2\mu)q^2 - \lambda k_R^2}{A_2 2i\mu k_R s} - 1 = 0 \quad (2.2.21a)$$

$$\frac{A_1 2iqk_R}{A_2 (s^2 + k_R^2)} + 1 = 0 \quad (2.2.21b)$$

將上兩式相加整理後可得

$$4q\mu sk_R^2 = (s^2 + k_R^2)[(\lambda + 2\mu)q^2 - \lambda k_R^2] \quad (2.2.22)$$

將上式等號兩邊平方後代入 $q^2 = k_R^2 - \frac{\omega^2}{v_p^2}$ 、 $s^2 = k_R^2 - \frac{\omega^2}{v_s^2}$ ，再同除 $\mu^2 k_R^8$ 得

$$16 \left(1 - \frac{\omega^2}{v_p^2 k_R^2}\right) \left(1 - \frac{\omega^2}{v_s^2 k_R^2}\right) = \left(2 - \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} \frac{\omega^2}{v_p^2 k_R^2}\right)^2 \left(2 - \frac{\omega^2}{v_s^2 k_R^2}\right)^2 \quad (2.2.23)$$

定義 $K_{Rs} = \frac{v_R}{v_s} = \frac{\omega}{v_s k_R}$ 為雷利波與剪力波波速比，則雷利波與壓力波之波速比為

$$\frac{v_R}{v_p} = \frac{\omega}{v_p k_R} = \frac{\omega}{v_s k_R \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\mu}} = \alpha' K_{Rs} \text{ 則式 (2.2.23) 可寫為}$$

$$16(1 - \alpha'^2 K_{Rs}^2)(1 - K_{Rs}^2) = \left(2 - \frac{1}{\alpha'^2} \alpha'^2 K_{Rs}^2\right)^2 (2 - K_{Rs}^2)^2$$

展開後

$$K_{Rs}^6 - 8K_{Rs}^4 + (24 - 16\alpha'^2)K_{Rs}^2 + 16(\alpha'^2 - 1) = 0 \quad (2.2.24)$$

其中

$$\alpha' = \sqrt{\mu/(\lambda + 2\mu)} = \sqrt{(1-2\nu)/(2-2\nu)}$$

若介質 ν 已知，則可求得 α' 再代入式 (2.2.24) 便可得 K_{Rs} 之正實數解，即可得雷利波波速 $v_R = K_{Rs} v_s$ 。

2.2.4 波速比較

由式 (2.2.8)、(2.2.10) 可知壓力波與剪力波波速比為

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (2.2.25)$$

再由式 (2.2.24) 所得之 K_{Rs} ，可得知在柏松比 (Poisson ratio) ν 為 0~0.5 時，壓力波、剪力波與雷利波波速的關係 (Fig. 2.6)。由圖可以觀察到雷利波波速略小於剪力波，且約為剪力波之 0.9 倍，而壓力波波速在柏松比接近 0.5 時，會遠大於剪力波和雷利波。三者之間的大小關係為

$$v_p > v_s > v_R \quad (2.2.24)$$

由 Miller 與 Pursey 於 1955 年的研究可知，在點振源作用下，上述三種波所攜帶的能量分配為：雷利波佔總能量的 67%，剪力波佔 26%，而壓力波僅佔 7% (Fig. 2.7)，亦即其總能量有三分之二是由雷利波向外傳遞，又雷利波衰減的速度最慢，所以當振波傳遞一定距離後，雷利波所產生之地表振幅遠大於壓力波與剪力波。因此，在相關研究中可推知雷利波對於振波行為為主要控制。



第三章 數值模擬分析

本文所分析之幾何模型，其部分相關設定參數為參考前人[8~10]以 ABAQUS 所建立之模型組。本章所模擬分析之例子共有三種，並以第一種例子（簡諧外力作用於剛性基礎上，半徑 12.5m）所得之地表位移反應與 Liou[2~5]之解析解相互比較，作為驗證此模型之可靠性。

首先先介紹有限元素套裝軟體 ABAQUS，接著以此軟體模擬分析三維數值模型，其幾何模型之相關參數設定於 3.2 節說明之，並於 3.3 至 3.5 節探討三種例子其各別網域與元素之收斂行為，找出最佳的模型/元素組合，再以 3.7 節驗證模型之可行性，最後於 3.8 節作一小結論。

3.1 分析軟體簡介

本文採用之分析軟體 ABAQUS，是以有限元素法理論為基礎。它的應用範圍相當廣泛，從大型線性結構分析到非線性的材料變形反應等各種力學問題，都可利用 ABAQUS 解決。

ABAQUS 之分析原理為將一連續的物理區間，分割成有限個數的元素，而元素與元素之間以節點相連接，再由適當的形狀函數代入控制方程式，以求得區域內各節點之物理量，進而推知整個區域之數值解。以 ABAQUS 分析問題，必須先將問題簡化後才能進行模型的建立，其分析流程如下[11]：

- (1) 建立部件 (Part)：繪製欲分析模型之幾何形狀。
- (2) 建立材料 (Property)：定義材料參數和截面性質。
- (3) 定義裝配 (Assembly)：選定欲分析之模型，若有數個模型時，可將各模型組合成為一個分析模型。
- (4) 設置分析過程 (Step)：在此指定模型的分析狀況。
- (5) 在模型上施加邊界條件和負載 (Load)：邊界條件及外力狀況皆可以直接施加於有限元素模型上。
- (6) 模型的網格分割 (Mesh)：在模型上劃分所需之網格樣式與數目，並選擇元素的種類。

- (7) 建立一個分析作業 (Job)：建立分析工作資料，並進行分析。
- (8) 用 ABAQUS/CAE 進行後處理 (Visualization)：可觀察模型變形的過程或各種應力分佈的狀態等。

使用 ABAQUS 輸入參數時，須注意先將各參數單位統一之後再行輸入。常用的單位系統如 Table 3.1 所示，本文選定的單位系統為 SI 制。

3.2 基本模型

本章共採用三種例子進行模擬分析，第一種例子為簡諧外力作用於剛性基礎上（半徑 12.5m）簡稱為模型一，第二種例子為簡諧外力作用於剛性基礎上（半徑 25m）簡稱為模型二，第三種例子為簡諧外力直接作用於半無限域上簡稱為模型三。

3.2.1 材料參數與土壤阻尼

(一) 材料參數

本文欲分析之土壤模型，假設其剪力波波速 v_s 為 $300m/s$ ，密度 ρ_s 為 $2000kg/m^3$ ，柏松比 ν_s 為 0.33，阻尼比 (damping ratio) ξ_s 為 0.05。由以上參數代入式 (2.2.10)，計算出剪力模數 (shear modulus) G 為 $1.8 \times 10^5 kPa$ ，再利用前一章所提到材料力學之公式 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ，則可得楊氏模數 (Young's modulus) E_s 為 $4.8 \times 10^5 kPa$ 。

同樣地，壓力波波速 v_p 則可由式 (2.2.8) 求得為 $596m/s$ ，另外從 Fig. 2.6 中，得知雷利波與剪力波波速之比例關係，便可以此推知雷利波波速 v_R 約為 $280m/s$ 。

(二) 土壤阻尼

若不考慮阻尼之情況，則能量在系統中的消散會非常緩慢，亦即在有限的分析域內，震波會經過多次的來回反射而影響分析結果的合理性。在 ABAQUS 軟體中，是採用雷利阻尼 (Rayleigh damping) 來模擬，其阻尼矩陣主要由質量矩陣 (mass matrix) 和勁度矩陣 (stiffness matrix) 組成，即：

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.2.1)$$

式中 α 為和質量有關的阻尼係數， β 為和勁度有關的阻尼係數。

此阻尼屬於黏滯阻尼（viscous damping）的一種，阻尼會隨頻率而改變，其阻尼力與速度成比例關係，其運動方程式可表示為：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (3.2.2)$$

但對於大地工程之分析中，遲滯阻尼（hysteretic damping）較能符合土壤動力性質的模擬，其特性為不隨頻率變化，且阻尼力與位移成正比，其運動方程式可表示為：

$$M\ddot{u} + (1 + i2\xi)Ku = P \quad (3.2.3)$$

若考慮施加之外力為單頻的簡諧振動力，則可利用 ABAQUS 軟體中以頻率域求解穩態解之分析方法。在土壤結構系統受某一特定頻率 ω 之簡諧外力作用下，系統的位移反應可寫成：

$$u = U \times e^{i\omega t} \quad (3.2.4)$$

將 u 對時間微分，可得到其速度反應：

$$\dot{u} = i\omega \times (U \times e^{i\omega t}) = i\omega \times u \quad (3.2.5)$$

令雷利阻尼之 $\alpha = 0$ ，可得到單純與勁度有關之阻尼：

$$C = \beta K \quad (3.2.6)$$

接著將式 (3.2.5)、(3.2.6) 代入式 (3.2.2)，可得到如下式：

$$M\ddot{u} + (1 + i\omega\beta)Ku = P \quad (3.2.7)$$

由式 (3.2.1) ~ (3.2.7)，令 $\omega\beta = 2\xi$ 可得到：

$$\begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = \frac{2\xi}{\omega} = \frac{\xi}{\pi f} \end{cases} \quad (3.2.8)$$

由式 (3.2.8) 可得知，若令 $\alpha = 0$ ， β 則隨所施加之外力頻率改變，即在 ABAQUS 軟體中，當阻尼比 ξ 為已知常數時，就能以此式模擬出遲滯阻尼不隨頻率改變之特性。

3.2.2 分析模式與施力方式

本文採動力分析模式，針對簡諧力作用下的強迫振動進行數值模擬，外力為一單位之簡諧載重，係以點荷重之方式直接加載於模型上，再以頻率域法分析求取穩態解，直接輸出欲分析頻率下各節點之位移振幅。

因為欲分析之土壤受到動態擾動下之行為，故考慮 1~10Hz 之頻率變化，而本文只取 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 和 10Hz 作分析。

3.2.3 採用元素與邊界條件

本文所模擬之彈性半無限空間分為近域及遠域兩部分。在近域之分析範圍中，模型的幾何形狀為一圓柱體，由於吾人係以放射狀之方式劃分網格，故在近域中所劃分之元素將分為兩類，圓心部分為扇形柱，採用三維十五節點 C3D15 (Fig. 3.1) 之實體元素，而其餘部分皆為六面體，係採用三維二十節點 C3D20R (Fig. 3.2) 之實體元素。

遠域部分，由於土壤的波傳屬於無限域之問題，在有限的電腦資源下，並不能真實模擬出無限空間，遂在遠域的土壤採用三維十二節點 CIN3D12R (Fig. 3.3) 之無限元素以模擬無限空間，即當波傳遞至遠域時，能使波傳行為延續下去，而不會有大量的反射再傳回至土壤之近域。其元素命名代號可參考 Fig. 3.4。

另外，本章所建立之全模型是為軸對稱模型，故能以四分之一對稱模型簡化之(如 Fig. 3.5 所示)，還可達到節省電腦資源之效果，而其邊界條件之設置為(座標系統如 Fig. 3.5 左上角所示)，對於鉛垂方向上施加一單位簡諧力時，X、Z 軸皆為對稱軸；對於水平方向上施加一單位簡諧力時，X 軸為反對稱軸，Z 軸為對稱軸。

至於剛性無質量之圓形基礎版之建立，係以範圍內所包含之節點全部鎖住之方式，即令其各節點之位移皆相同。

3.3 簡諧外力作用於剛性基礎上 (半徑 12.5m)

本節所分析之問題為一剛性無質量之圓形基礎版，半徑為 12.5m，置於半無

限域之表面上，並在基礎中心施加一單位之簡諧外力，力分為鉛垂方向及水平方向，而其半無限域之基本假設為一均質、等向性、彈性之單層土壤，應力應變關係為完全彈性。

3.3.1 收斂性探討

對於半無限域的動力分析問題，有限元素網格所取的範圍，至少要能完整的描述一個波才能獲得較可信的結果，所以本小節之目的係以找出最佳的數值模型，作為第四章案例分析的標準。

根據有限元素法得知，當元素網格切得夠遠，即網域夠大時，位移應可收斂至一固定值，但因電腦資源的有限，不可能將分析的範圍無限延伸，故本文選用混合模式法，即以有限元素搭配無限元素的使用作數值分析，而 ABAQUS 所提供之無限元素在使用上仍存有疑慮，為了有效模擬出混合模式法之遠域效果，因此在數值模型中則利用增加有限元素網格的方式，來降低無限元素邊界對近域造成之影響。

使用有限元素法作數值模型分析，其元素網格通常必須考量兩個重要的問題：第一個問題是須定義被模擬對象的主要幾何尺寸細節，即適當的選用網域範圍；而第二個問題則為元素尺寸必須小到讓近似誤差保持在可以接受的範圍內。基於此，在驗證模型的正確性之前，須以模型的收斂性分析來討論這兩個問題。

其收斂性分析一開始所劃分網格的基準，係以楊永斌[12]的研究為參考，將其所選用的網域範圍及元素大小作適當的調整以為本節使用。

3.3.2 網域範圍探討

已假定土壤模型之剪力波速為 300m/s ，並令元素劃分之長度為 $\lambda_s/12$ ，即在 1Hz 時，將元素長度定為 25m ，探討在不同的網域範圍之下，其測線上位移振幅之收斂情形。測線係指自由表面上 $\theta=0^\circ$ 之 r 方向（圓柱座標系統示意圖，參照 Fig. 3.6 所示），當簡諧載重為鉛垂向時，觀察測線上之 U_r 與 U_z ；若為水平向時，則分為施力於 $\theta=0^\circ$ 之 r 方向以及 $\theta=90^\circ$ 之 r 方向，前者為觀察測線上之 U_r 與 U_z ，

後者為 U_0 。

本小節網域範圍之變化為選用模型 200、300、450、600、900 及 1200，即 $2/3\lambda_s \sim 4\lambda_s$ 之間，在這邊先認定 $4\lambda_s$ 為一很大的範圍以作為收斂之基準，並以此基準來推估當網域範圍取到多大時，能以有限網格與無限網格的搭配，來模擬半無限域之反應。其比較結果如下：

(一) 單位鉛垂向簡諧載重之反應

如 Fig. 3.7、3.8 所示，施加鉛垂向簡諧載重於剛性基礎上，觀察其測線上之 U_r 與 U_z ，不論在實部或虛部上，除了模型 200 之位移振幅會有些微偏離實線之情形外，其餘模型則已開始漸漸地接近至實線，而從圖中研判，在 U_r 實部時，模型 300 仍有較大偏差，故判斷選用模型 450 較為適宜。

(二) 單位水平向簡諧載重之反應

如 Fig. 3.9 至 3.11 所示，施加水平向簡諧載重於剛性基礎上，觀察其測線上之 U_r 、 U_z 與 U_0 ，不論在實部或虛部上，除了模型 200 之位移振幅會有些微偏離實線之情形外，其餘模型則已開始漸漸地接近至實線，而從圖中研判，在 U_z 實部時，模型 300 仍有較大偏差，故判斷選用模型 450 較為適宜。

(三) 結果討論

綜合以上之分析，吾人可發現約在模型 300 時，已有開始接近至實線之結果，但在單位鉛垂向簡諧載重之反應，其 U_r 實部仍可看出較大偏差；而水平向之反應，則在 U_z 實部有較大偏差。從整體研判，最佳之網域範圍最好大於模型 300，而模型 450 後之結果其實與模型 600 所得之結果差異不大，故在此選擇模型 450 為最佳之網域範圍，表示在此三維數值模型中採用無限元素來模擬安靜邊界 (quiet boundary) 時，需在無限元素網格邊界前至少再延伸 450m (1.5 倍剪力波長)，方能得到較佳之模擬效果。由此結果顯示，在本研究分析採用之模型中，若所施加之簡諧載重其振動頻率為 3Hz 時，由於土壤之剪力波速為 300m/s，因此在所研究之範圍外，尚需延伸 100m 之距離配合無限元素，方能達到較佳之模擬效果。而在下一小節探討元素大小時，將依振動頻率之高低來改變模型尺寸之大小。

3.3.3 元素大小探討

依上一小節所討論出來之結果，可判斷在不同的振動頻率之下，其模型所需之尺寸，故本小節將先固定模型尺寸後，再改變元素長度，並分別比較測線上位移振幅之收斂情形，以探討在不同的振動頻率下所適用之元素長度。其中元素長度依序劃分為 25m、12.5m、6.25m 及 3.125m，簡諧載重之振動頻率則分為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 和 10Hz。比較結果如下：

(一) 單位鉛垂向簡諧載重之反應

1Hz 選用模型 450，接著改變元素長度，分別為 25m、12.5m 及 6.25m，如 Fig. 3.12、3.13 所示。以模型尺寸 450，元素長度為 25m 與 12.5m 相比，除了 U_r 在基礎與土壤之交界處後的位移反應（12.5~50m 處）以及 U_z 在剛性基礎的位置（0~12.5m 處）難以收斂外，其餘結果大致吻合且趨勢相符，進而以元素長度為 12.5m 與 6.25m 相比，從圖中可看出選用 12.5m 會比 25m 更為適宜，故判斷最佳模型/元素為 450/12.5。

3Hz 選用模型 200，而由上述結果可知，元素長度為 25m 時已不適用，故改變元素長度分別為 12.5m、6.25m 及 3.125m，如 Fig. 3.14、3.15 所示。以模型尺寸 200，元素長度為 12.5m、6.25m 與 3.125m 相比，除了 U_r （12.5~37.5m 處）及 U_z （0~12.5m 處）會較難收斂之外，其餘結果大致吻合且趨勢相符，但選用 6.25m 會比 12.5m 更為適宜，故判斷其最佳模型/元素可採用 200/6.25 作分析。

5Hz 選用模型 150，元素長度分別採用 12.5m、6.25m 及 3.125m，如 Fig. 3.16、3.17 所示。以模型尺寸 150，元素長度為 12.5m 與 6.25m 相比，不論在實部或虛部上，其位移振幅會有多處趨勢不相符之情況發生，進而以元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結果誤差大幅減少且趨勢也相符，故判斷其最佳模型/元素可選用 150/6.25。

7Hz 選用模型 150，由上述結果可知元素長度為 12.5m 時已不適用，故改變元素長度分別為 6.25m 及 3.125m，如 Fig. 3.18、3.19 所示。以模型尺寸 150，元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結果誤差不大且趨勢相符，惟在 U_r （12.5~25m 處）有些微偏差，而後因資源問題，若欲使用更小之元素相比，如 1.5625m 之元

素長度，已超過現有資源上限無法運算，遂採用混合元素之方法作分析，其處理方式為在剛性基礎位置作較小之元素劃分，再以漸進的方式增大至可適用之元素，即元素之邊長從 1.5625m 漸進地增大至 6.25m，相比之下其結果誤差也不大，故判斷其最佳模型/元素可採用 150/3.125 作分析。

9Hz 和 10Hz 則分別選用模型 150 和 125，元素長度採用 6.25m、3.125m 及混合方式，如 Fig. 3.20 至 3.23 所示。9Hz 以模型尺寸 150，元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結果誤差較大的地方發生在 U_r (12.5~25m 處)，進而以元素長度為 3.125m 與混合方式相比，其結果誤差不大；10Hz 以模型尺寸 125，元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結論同 9Hz，故判斷最佳模型/元素可分別採用 150/3.125 和 125/3.125 作分析。

(二) 單位水平向簡諧載重之反應

1Hz 選用模型 450，接著改變元素長度，其分別為 25m、12.5m 及 6.25m，如 Fig. 3.24 至 3.26 所示。以模型尺寸 450，元素長度為 25m 與 12.5m 相比，在 U_r 及 U_θ 剛性基礎的位置 (0~12.5m 處) 其結果誤差較大，甚至在 U_z (12.5~50m 處) 有趨勢較不相符的情況發生，進而以元素長度為 12.5m 與 6.25m 相比，其結果誤差大幅減小且趨勢也相符，故判斷其最佳模型/元素可採用 450/12.5 作分析。

3Hz 選用模型 200，改變元素長度分別為 12.5m、6.25m 及 3.125m，如 Fig. 3.27 至 3.29 所示。以模型尺寸 200，元素長度為 12.5m、6.25m 與 3.125m 相比，其結果誤差不大且趨勢相符，但由圖可知元素長度選用 6.25m 會比 12.5m 更為適宜，故判斷其最佳模型/元素可採用 200/6.25 作分析。

5Hz 選用模型尺寸 150，改變元素長度分別為 12.5m、6.25m 及 3.125m，如 Fig. 3.30 至 3.32 所示。以模型尺寸 150，元素長度為 12.5m 與 6.25m 相比，不論在實部或虛部上，其位移振幅會有多處趨勢不相符之情況發生，進而以元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結果誤差大幅縮小且趨勢也相符，故判斷其最佳模型/元素可採用 150/6.25 作分析。

7Hz 選用模型 150，改變元素長度分別為 6.25m 及 3.125m，如 Fig. 3.33 至 3.35 所示。以模型尺寸 150，元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結果誤差不大，惟

在 U_z (12.5~25m 處) 有些微偏差，進而以元素長度為 3.125m 與混合元素之方式作比較，其結果相比之下可判斷其最佳模型/元素為 150/3.125。

9Hz 和 10Hz 分別選用模型 150 和 125，改變元素長度為 6.25m、3.125m 及混合元素之方式，如 Fig. 3.36 至 3.41 所示。9Hz 以模型尺寸 150，元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結果誤差較大的地方發生在 U_z (12.5~25m 處)，進而以元素長度為 3.125m 與混合元素之方法相比，其結果誤差不大且趨勢相符；10Hz 以模型尺寸 125，元素長度為 6.25m 與 3.125m 相比，其結論同 9Hz，故判斷最佳模型/元素可分別採用 150/3.125 和 125/3.125 作分析。

(三) 結果討論

由以上分析之結果，大致可將振動頻率粗分為 1Hz (低頻)、3Hz 和 5Hz (中低頻)、7Hz (中高頻)、9Hz 和 10Hz (高頻)，吾人發現最佳的元素長度會相依於波長，其波長又與振動頻率有關，故當振動頻率較低時，波長較長，所需的網域範圍較大；而當頻率較高時，波長較短，所需的元素長度較小，而其所需的網域範圍也可較小。結果之整理如 Table 3.2 所示。

3.4 簡諧外力作用於剛性基礎上 (半徑 25m)

本節將探討若改變基礎大小其位移收斂情形會有何影響。本模型令剛性圓盤基礎之半徑增加至 25m，其餘基本假設以及模型/元素之選用同 3.3 節。

3.4.1 分析結果與探討

(一) 單位鉛垂向簡諧載重之反應

在 1Hz 時，分別採用 450/25、450/12.5 及 450/6.25 作比較，如 Fig. 3.42、3.43 所示。不論在實部或虛部上， U_r 在基礎與土壤之交界處後的位移反應 (25~50m 處) 以及 U_z 在剛性基礎的位置 (0~25m 處) 會有較大的誤差外，其餘結果誤差不大且趨勢相符。

3Hz 時則採用 200/12.5、200/6.25 及 200/3.125 作比較，如 Fig. 3.44、3.45 所示。不論在實部或虛部上， U_r (25~37.5m 處) 以及 U_z (0~25m 處) 皆會有較大

的誤差，而其餘結果大致吻合且趨勢相符。

5Hz 時採用 150/12.5、150/6.25 及 150/3.125 作比較，如 Fig. 3.46、3.47 所示。其結論同 3Hz，會在 U_r （25~37.5m 處）以及 U_z （0~25m 處）出現較大誤差。

7Hz 時採用 150/6.25、150/3.125 及 150/mix 作比較，如 Fig. 3.48、3.49 所示。不論在實部或虛部上，其結果誤差出現在 U_r （25~31.25m 處）以及 U_z （0~25m 處）。

9Hz 和 10Hz 時分別以 150/6.25、150/3.125、150/mix 和 125/6.25、125/3.125、125/mix 作比較，如 Fig. 3.50 至 3.53 所示。其結論同 7Hz，誤差出現在 U_r （25~31.25m 處）以及 U_z （0~25m 處）。

(二) 單位水平向簡諧載重之反應

1Hz 時採用 450/25、450/12.5 及 450/6.25 作比較，如 Fig. 3.54 至 3.56 所示。不論在實部或虛部上， U_r 、 U_θ 在剛性基礎的位置（0~25m 處）和 U_z 在基礎與土壤之交界處後的位移反應（25~50m 處）會有較大的誤差。

3Hz 時採用 200/12.5、200/6.25 及 200/3.125 作比較，如 Fig. 3.57 至 3.59 所示。不論在實部或虛部上， U_r 、 U_θ （0~25m 處）和 U_z （25~37.5m 處）會有較大的誤差外，其餘結果誤差不大且趨勢相符。

5Hz 時採用 150/12.5、150/6.25 及 150/3.125 作比較，如 Fig. 3.60 至 3.62 所示。其結論同 3Hz，會在 U_r 、 U_θ （0~25m 處）和 U_z （25~37.5m 處）發生較大之誤差。

7Hz 時採用 150/6.25、150/3.125 及 150/mix 作比較，如 Fig. 3.63 至 3.65 所示。不論在實部或虛部上，其誤差較大的地方出現在 U_r 、 U_θ （0~25m 處）和 U_z （25~31.25m 處）。

9Hz 和 10Hz 時採用 150/6.25、150/3.125、150/mix 和 125/6.25、125/3.125、125/mix 作比較，如 Fig. 3.66 至 3.71 所示。其結論同 7Hz，誤差出現在 U_r 、 U_θ （0~25m 處）和 U_z （25~31.25m 處）。

3.5 簡諧外力作用於半無限域上

本節將探討若無基礎其位移收斂情形會有何影響。本模型以簡諧外力直接作

用於半無限域上，其餘基本假設以及模型/元素之選用同 3.3 節。

3.5.1 分析結果與探討

(一) 單位鉛垂向簡諧載重之反應

在 1Hz 時，以 450/25、450/12.5 及 450/6.25 作比較，如 Fig. 3.72、3.73 所示。不論在實部或虛部上， U_r 在施力點後的位移反應（0~50m 處）以及 U_z 在施力點的位置（0m 處）會有較大的誤差外，其餘結果誤差不大且趨勢相符。

3Hz 時採用 200/12.5、200/6.25 及 200/3.125 作比較，如 Fig. 3.74、3.75 所示。不論在實部或虛部上， U_r （0~25m 處）以及 U_z （0m 處）會有較大的誤差。

5Hz 時採用 150/12.5、150/6.25 及 150/3.125 作比較，如 Fig. 3.76、3.77 所示。其結論同 3Hz，誤差出現在 U_r （0~25m 處）以及 U_z （0m 處）。

7Hz 時採用 150/6.25、150/3.125 及 150/mix 作比較，如 Fig. 3.78、3.79 所示。不論在實部或虛部上，其誤差出現在 U_r （0~12.5m 處）以及 U_z （0m 處）。

9Hz 和 10Hz 時分別以 150/6.25、150/3.125、150/mix 和 125/6.25、125/3.125、125/mix 作比較，如 Fig. 3.80 至 3.83 所示。其結論同 7Hz，在 U_r （0~12.5m 處）以及 U_z （0m 處）會有較大之結果誤差。

(二) 單位水平向簡諧載重之反應

1Hz 時採用 450/25、450/12.5 及 450/6.25 作比較，如 Fig. 3.84 至 3.86 所示。不論在實部或虛部上， U_r 、 U_θ 在施力點的位置（0m 處）和 U_z 在施力點後的位移反應（0~50m 處）會有較大的誤差外，其餘結果誤差不大且趨勢相符。

3Hz 時分別選用 200/12.5、200/6.25 及 200/3.125 作比較，如 Fig. 3.87 至 3.89 所示。不論在實部或虛部上， U_r 、 U_θ （0m 處）和 U_z （0~25m 處）會有較大的誤差。

5Hz 時分別選用 150/12.5、150/6.25 以及 150/3.125 作比較，如 Fig. 3.90 至 3.92 所示。其結論同 3Hz，誤差出現在 U_r 、 U_θ （0m 處）和 U_z （0~25m 處）。

7Hz 時分別選用 150/6.25、150/3.125 及 150/mix 作比較，如 Fig. 3.93 至 3.95 所示。不論在實部或虛部上，其誤差較大的地方出現在 U_r 、 U_θ （0m 處）和 U_z

(0~12.5m 處)。

9Hz 和 10Hz 時分別以 150/6.25、150/3.125、150/mix 和 125/6.25、125/3.125、125/mix 作比較，如 Fig. 3.96 至 3.101 所示。其結論同 7Hz，在 U_r 、 U_θ (0m 處) 和 U_z (0~12.5m 處) 會有較大之結果誤差出現。

(三) 結果討論

綜合 3.3 節至 3.5 節之分析結果，對於鉛垂向簡諧外力，振動頻率為 1Hz 時，模型一之 U_r ，其誤差影響範圍約在 12.5~50m，模型二為 25~50m，模型三為 0~50m，3Hz 和 5Hz 時，模型一為 12.5~37.5m，模型二為 25~37.5m，模型三為 0~25m，7Hz、9Hz 和 10Hz 時，模型一為 12.5~25m，模型二為 25~31.25m，模型三為 0~12.5m。而上述誤差影響範圍雖為粗略估計，但可以確認的是， U_r 之誤差皆出現在基礎與土壤之交界處或施力點後， U_z 之位移誤差則出現在剛性基礎或施力點的位置；對於水平向簡諧外力， U_z 之誤差皆出現在基礎與土壤之交界處或施力點後， U_r 以及 U_θ 之位移誤差出現在剛性基礎或施力點的位置。

3.6 所需電腦資源

從有限元素之基本理論得知，若欲分析之模型中網格密度越高，其數值計算越準確，然而元素、節點數目越多，也會造成模型過大、運算時間過長或所需記憶空間太大，所以模型網格密度的訂定，哪些需要高密度，哪些只需要低密度網格，已經由 3.3 節之收斂測試予以驗證。

各模型元素與節點數目整理如 Table 3.3 所示，所需之運算時間則如 Table 3.4 所示。以現有資源來說，當元素個數達 16 萬個時，所耗費之時間為 3 天又 7 個小時，極不符合效益，倘若元素個數增加到 26 萬個，則一般的個人電腦已無法運算，除了 CPU 與記憶體會直接影響運算時間過長，其最主要的因素為硬碟空間不足，造成大量的運算資料無法暫存，故只能尋求更高的運算資源才能滿足。表中只記錄到 8 萬個元素 (300/3.125)，其所耗費之時間約為 7 個小時。

如果我們的目的僅是在計算單一振動頻率下之反應，對於不同的頻率而言，其所需之元素總數是固定的，故當我們在作分析時，為了兼顧經濟性與準確性，

惟有依振動頻率來調整選用之模型/元素，才能適應於不同頻率之需求。

3.7 模型驗證

本章所前述之各節皆為本文主要的理論基礎，以作為第四章分析結果的可靠性。本節將以 Liou[2~5]使用 Fortran 程式所寫之解析解作驗證，詳可參考文獻中之介紹。

解析解所分析之對象同模型一，為一剛性無質量之圓形基礎版，半徑為 12.5m，置於半無限域之表面上，並在基礎中心施加一單位之簡諧外力，力分為鉛垂方向及水平方向，觀察其地表位移振幅之衰減情形，而振動頻率只採用 1Hz (低頻)、3Hz 和 5Hz (中低頻)、7Hz (中高頻)、9Hz 和 10Hz (高頻) 予以比對。

而解析解所分析之位移振幅皆以無因次化之結果來表示，故在以 ABAQUS 軟體之數值解予以比對時，須將解析解除以一倍數才能同數值解相互比較，吾人係以 5.76×10^{10} 作為調適之倍數。其比較之結果如 Fig. 3.102 至 3.131 所示，圖中實線部分為 Liou[2~5]之解析解，方塊部分則為數值解。結論之整理如下：

(一) 鉛垂向振動之 U_r

如 Fig. 3.102、3.104、3.106、3.108、3.110、3.112 所示，1Hz 選用模型/元素為 450/12.5，除了在基礎與土壤之交界處後的位移反應 (12.5~25m 處) 誤差較大外，其餘結果只有些微誤差；3Hz 和 5Hz 則分別選用 200/6.25 和 150/6.25，其誤差皆出現在基礎與土壤之交界處後的位移反應 (12.5~18.75m 處) 以及波峰處；7Hz 選用 150/3.125，其誤差為在基礎與土壤之交界處後的位移反應 (12.5~15.625m 處)；9Hz 和 10Hz 則分別選用 150/3.125 和 125/3.125，其誤差皆在基礎與土壤之交界處。

(二) 鉛垂向振動之 U_z

如 Fig. 3.103、3.105、3.107、3.109、3.111、3.113 所示，其模型/元素之選用同(一)，在 1Hz 時，除了在實部部分剛性基礎的位置 (0~12.5m 處) 有較大的落差外，其餘結果誤差不大且趨勢相符；3Hz 和 5Hz 時，3Hz 與解析解相比其結果相當吻合，而 5Hz 其結論同 1Hz；7Hz 時，其結果也與解析解相當吻合；9Hz 和

10Hz 時，其實部部分皆在第一個波谷處有些微誤差。值得注意的是，鉛垂向振動之 U_z 其結果皆在交界處無法吻合。

(三) 水平向振動之 U_r

如 Fig. 3.114、3.117、3.120、3.123、3.126、3.129 所示，其模型/元素之選用同(一)，在 1Hz 時，不論在實部或虛部上，其剛性基礎的位置皆有較大的落差，此外，在虛部部分其前段趨勢會有些微偏離；3Hz 和 5Hz 時，3Hz 惟在虛部部分之剛性基礎的位置有較大的落差，而 5Hz 則不論在實部或虛部上，其剛性基礎的位置皆出現誤差；7Hz、9Hz 和 10Hz 時，其整體誤差皆較小。相同地，水平向振動之 U_r 其結果皆在交界處無法吻合。

(四) 水平向振動之 U_z

如 Fig. 3.115、3.118、3.121、3.124、3.127、3.130 所示，其模型/元素之選用同(一)，在 1Hz 時，不論在實部或虛部上，皆在波峰或波谷處有較大誤差，尤其是在虛部部分，但整體趨勢是相符的；3Hz 和 5Hz 時，其誤差皆出現在波峰或波谷處；7Hz、9Hz 和 10Hz 時，不論在實部或虛部上，其誤差皆出現在第一個波谷處。水平向振動之 U_z 其結果皆在交界處無法吻合。

(五) 水平向振動之 U_θ

如 Fig. 3.116、3.119、3.122、3.125、3.128、3.131 所示，其模型/元素之選用同(一)，在 1Hz 時，不論在實部或虛部上，剛性基礎的位置皆有較大的誤差，且在虛部部分其前段之趨勢會有些許偏離；3Hz 和 5Hz 時，3Hz 除了在虛部部分之剛性基礎的位置有較大的落差，而 5Hz 則不論在實部或虛部上，其剛性基礎的位置皆會出現落差；7Hz 時，其虛部部分之剛性基礎的位置有些微的誤差；9Hz 和 10Hz 時，其誤差皆出現在實部部分第一個波谷處。水平向振動之 U_θ 其結果皆在交界處無法吻合。

3.8 小結

綜合以上數據結果可歸納出以下結論：

1. 網域的範圍最好大於 λ_s 。

2. 元素之邊長若小於 $\lambda_s/10$ 則可獲得不錯之模擬結果。
3. 由收斂性分析得知，當剛性基礎半徑愈大時，其位移誤差影響範圍愈小；當頻率愈高時，其位移誤差影響範圍愈小。
4. 由模型驗證可知，對於鉛垂向之簡諧外力， U_r 之誤差多出現在基礎與土壤之交界處後的位移反應， U_z 則在剛性基礎的位置；對於水平向之簡諧外力，皆在 1Hz 時出現較大的偏離誤差， U_r 和 U_θ 為剛性基礎的位置， U_z 則多出現在波峰或波谷處。另外，頻率愈高，其數值解和解析解也愈吻合。

剛性基礎的位置或基礎與土壤之交界處後的位移反應常常是誤差最大的地方，其推測有二，一為從本章三種例子之收斂行為可以判斷，ABAQUS 在此模型中之特定位置是較為不準的；二為解析解會有奇異 (singularity) 值的問題，以致於無法得到足夠之精度，而以 ABAQUS 之數值解來看，其趨勢所表現出的物理現象反而較為合理，故這類誤差是可以相信且接受的。

5. 採用有限元素網格搭配無限元素網格所建構之三維數值模型進行分析，雖然並非完全準確，但隨著波行進一段距離後，可以得到和解析解相近之趨勢及反應的數值分析之結果，由此可見本文所用之方法的可靠度。

第四章 案例分析

近年來興建低束散度、中能量同步加速器設施已成為國際趨勢，其既能符合經濟效益，又可達到高能量設施具有的高亮度特性。而我國現有之同步加速器光源為二十多年前之設計，電子束能量低、發射度高，已無法與國際先進設施競爭，倘若不能儘速設計、建造更先進的光源，將無法開創嶄新的實驗技術，拓展科學研究領域，而多年來所發展的多項尖端科學研究勢必被淘汰，進而大大影響國內科技研究與發展。

為能達到電子束低束散度及光源高亮度的目標，必須維持加速器各子系統的穩定性，而建築物地基及結構是影響加速器所有元件位置穩定性的主要因素，因此有必要針對未來在中心現址建造同步加速器可能產生的地表振動問題加以研究。在前一章節已驗證過模型的適用性，故才能假設本章所建立之模型為可信的，而最後將以此案例模型作分析與討論。

4.1 基本模型

本章主要在模擬台灣光子源同步加速器隧道區之位移反應，研究中所分析之模型共有四種，無開挖之土壤、無開挖之土壤（含屏蔽隧道區）、全開挖之土壤、全開挖之土壤（含屏蔽隧道區），並將上述四種模型分為三個主題來進行探討，比較環境外力對於隧道區內測點之變化情形，其主題一為在無開挖之土壤上有無放置屏蔽隧道區之比較；主題二為全開挖之土壤上有無放置屏蔽隧道區之比較；主題三則為前兩個主題之延伸，屏蔽隧道區放置於有無開挖之土壤之比較。測點係指以土壤中心為原點，在 $\theta=0^\circ$ 、 $r=93.5m$ （即屏蔽隧道區中心）上設置第一個測點，接著每 11.25° 取一點，由於模型為二分之一對稱，故只需觀察屏蔽隧道區 $0^\circ\sim 180^\circ$ 之間共 17 個測點，如 Fig. 4.1 所示。

加速器隧道區是根據結構圖上之實際大小與幾何配置簡化而建立，其外觀為一環形之混凝土結構物（如 Fig. 4.2、4.3 所示），內徑為 88m，外徑為 99m，坐落於土壤中心。而屏蔽隧道區之斷面是由四片混凝土板組合而成之箱形斷面，其尺寸為寬 11m，高 5.6m，厚度除了地板基礎為 1.6m 厚之外，其餘三片混凝土板

皆為 1m 厚。

在材料組成方面，視混凝土結構物為彈性材料，其楊氏模數 E_c 為 $2.5 \times 10^7 \text{ kPa}$ ，密度 ρ_c 為 2400 kg/m^3 ，柏松比 ν_c 為 0.22，阻尼比 ξ_c 為 0.05。而土壤基本材料參數則沿用第三章之假設。

至於施力方式部分，為一單位之簡諧外力以點荷重之方式直接加載於模型上，其施力點位於 $\theta = 0^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 33m、55m、77m、93.5m（屏蔽隧道區中心）、110m、132m 及 154m 共七個位置依序變動（如 Fig. 4.4 所示），而考量於資源之有限，施力點將不再繼續往下延伸。振動頻率一樣只取 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 作分析，其中土壤之模型/元素將以第三章之結論作適當的調整，當振動頻率為 1Hz 時，模型/元素採用 605/11；3Hz 及 5Hz 時，模型/元素採用 308/5.5；7Hz、9Hz 以及 10Hz 時，模型/元素採用 220/2.75。

最後為採用元素與邊界條件，屏蔽隧道區為採用三維八節點 S8R（Fig. 4.5）之殼元素作模擬，其元素命名代號可參考 Fig. 4.6。此外，研究中所分析之模型皆假設結構物與土壤無相對位移，故不使用介面元素，即結構物與土壤之間為完全連結之狀況。

4.2 土壤無開挖之分析

本節將探討無開挖之土壤在放置屏蔽隧道區（如 Fig. 4.7 所示）之後，簡諧力會對測點之位移反應有何影響。觀察在不同振動頻率下，其測點隨著施力位置的改變之位移振幅變化情形。

4.2.1 分析結果與探討

(一) 不同振動頻率之比較

1、單位鉛垂向簡諧載重之反應

當簡諧載重為鉛垂向時，分別在距土壤中心 33m、55m、77m、93.5m、110m、132m 及 154m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同其變化之情形，如 Fig. 4.8~4.21 所示。從圖中可看出， U_r 與 U_z 之曲線變化皆會隨著頻率的增加

而出現上下跳動之情形。

對於 U_r 之反應，除了在施力點距土體中心 93.5m ($\theta=0^\circ$ 的位置，振動頻率為 1Hz、3Hz 及 5Hz)、110m ($\theta=33.75^\circ$ 的位置)、132m ($\theta=45^\circ$ 的位置) 以及 154m ($\theta=56.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz 及 7Hz) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應對於無放置屏蔽隧道區會呈現嚴重放大情形之外，其餘有放置屏蔽隧道區之位移反應大致上會較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，除了振動頻率為 1Hz 時，整體之變化皆不顯著外，其餘有放置屏蔽隧道區之位移反應大致上皆較小。

2、單位水平向簡諧載重之反應

當簡諧載重為水平向時，分別在距土壤中心 33m、55m、77m、93.5m、110m、132m 及 154m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同之變化情形，如 Fig. 4.22~4.35 所示。其 U_r 與 U_z 之曲線變化幅度較鉛垂向劇烈。

對於 U_r 之反應，在施力點距土壤中心 33m ($\theta=112.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 7Hz)、55m ($\theta=180^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、77m ($\theta=123.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 5Hz)、93.5m ($\theta=78.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 1Hz)、110m ($\theta=135^\circ$ 的位置，振動頻率為 7Hz)、132m ($\theta=11.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 7Hz) 以及 154m ($\theta=157.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有明顯放大之現象，且實際上有局部放大的位置不只一處，上述只是舉出最為明顯的位置，若從整體來討論的話，除了振動頻率為 1Hz 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會較大之外，其餘之位移反應皆較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，除了在施力點距土壤中心 33m ($\theta=67.5^\circ$ 的位置)、55m ($\theta=56.25^\circ$ 的位置)、77m ($\theta=33.75^\circ$ 的位置)、93.5m ($\theta=0^\circ$ 的位置，振動頻率為 3Hz 以及 5Hz) 以及 110m ($\theta=0^\circ$ 的位置，振動頻率為 1Hz) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有局部放大之情形外，其餘之位移反應整體上皆較無放置屏蔽隧道區小。

(二) 改變施力位置之比較

1、單位鉛垂向簡諧載重之反應

當簡諧載重為鉛垂向時，分別在振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 之情形下，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨施力位置不同之變化情形，如 Fig. 4.36~4.47 所示。

對於 U_r 之反應，在振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、10Hz ($\theta=45^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 132m) 以及 9Hz ($\theta=33.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 110m) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有局部放大之情形，相同地，上述只舉出最為明顯的位置，而大致上有放置屏蔽隧道區之位移反應還是會較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，其有放置屏蔽隧道區之位移反應明顯較無放置屏蔽隧道區小。

2、單位水平向簡諧載重之反應

當簡諧載重為水平向時，分別在振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 之情形下，觀察 U_r 與 U_z 隨施力位置不同之變化情形，如 Fig. 4.48~4.59 所示。當頻率愈高時，其 U_r 與 U_z 之曲線變化愈劇烈。

對於 U_r 之反應，在振動頻率為 1Hz ($\theta=78.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m)、5Hz ($\theta=123.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 77m)、7Hz ($\theta=101.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 33m)、9Hz ($\theta=180^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 55m) 以及 10Hz ($\theta=157.5^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 154m) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有局部放大之現象，而上述同樣只舉出較明顯的位置，整體而言，有放置屏蔽隧道區之位移反應會較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，除了在振動頻率為 1Hz、9Hz ($\theta=56.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 55m)、3Hz、5Hz、7Hz 以及 10Hz ($\theta=33.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 77m) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應有局部放大之情形，而其餘之位移反應大致上皆較無放置屏蔽隧道區小。

4.3 土壤全開挖之分析

本節將探討全開挖之土壤在放置屏蔽隧道區 (如 Fig. 4.60 所示) 之後，簡諧

力會對測點之位移反應有何影響，而開挖方式是以土壤中心為圓心，畫一半徑 99m 之圓，向下挖掘 11m。觀察在不同振動頻率下，其測點隨著施力位置的改變之位移振幅變化情形。

4.3.1 分析結果與探討

(一) 不同振動頻率之比較

1、單位鉛垂向簡諧載重之反應

當簡諧載重為鉛垂向時，分別在距土壤中心 33m、55m、77m、93.5m、110m、132m 及 154m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同之變化情形，如 Fig. 4.61~4.74 所示。 U_r 與 U_z 之曲線變化皆會隨著頻率的增加而有上下跳動之現象。

對於 U_r 之反應，除了在施力點距土壤中心 93.5m ($\theta=22.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 3Hz)、132m ($\theta=45^\circ$ 的位置，振動頻率為 1Hz) 以及 154m ($\theta=146.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應對於無放置屏蔽隧道區會有明顯放大之情形外，其餘之位移反應大致上為有放置屏蔽隧道區較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，除了在施力點距土壤中心 110m ($\theta=168.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有放大之情形外，其餘之位移反應皆較無放置屏蔽隧道區小。

2、單位水平向簡諧載重之反應

當簡諧載重為水平向時，分別在距土壤中心 33m、55m、77m、93.5m、110m、132m 及 154m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同之變化情形，如 Fig. 4.75~4.88 所示。其 U_r 與 U_z 之曲線跳動幅度相當劇烈。

對於 U_r 之反應，在施力點距土壤中心 55m ($\theta=180^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、93.5m ($\theta=78.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 1Hz)、110m ($\theta=90^\circ$ 的位置，振動頻率為 5Hz)、132m ($\theta=11.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 7Hz) 以及 154m ($\theta=78.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有明顯放大之現

象，不過總體而言，除了振動頻率為 1Hz 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會較大之外，其餘之位移反應有放置屏蔽隧道區會較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，除了在施力點距土壤中心 33m ($\theta=67.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、55m ($\theta=56.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz)、77m ($\theta=0^\circ$ 的位置，振動頻率為 1Hz)、93.5m ($\theta=22.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 3Hz)、132m ($\theta=146.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 以及 154m ($\theta=168.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 7Hz) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有放大之情形外，其餘之位移反應大體而言皆較無放置屏蔽隧道區小。

(二) 改變施力位置之比較

1、單位鉛垂向簡諧載重之反應

當簡諧載重為鉛垂向時，分別在振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 之情形下，觀察 U_r 與 U_z 隨施力位置不同之變化情形，如 Fig. 4.89~4.100 所示。

對於 U_r 之反應，在振動頻率為 1Hz ($\theta=45^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 132m)、3Hz ($\theta=22.5^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m) 以及 10Hz ($\theta=146.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 154m) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應會有放大之情形，而大致上可發現，有放置屏蔽隧道區之位移反應會較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，除了在振動頻率為 10Hz ($\theta=168.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 110m) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應有放大之情形外，其餘之位移反應大致上皆較無放置屏蔽隧道區小。

2、單位水平向簡諧載重之反應

當簡諧載重為水平向時，分別在振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 之情形下，觀察 U_r 與 U_z 隨施力位置不同之變化情形，如 Fig. 4.101~4.112 所示。

對於 U_r 之反應，除了在振動頻率為 1Hz ($\theta=78.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m)、5Hz ($\theta=90^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 110m)、7Hz ($\theta=11.25^\circ$ 的

位置，施力點距土壤中心 132m)、9Hz ($\theta=180^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 55m) 以及 10Hz ($\theta=22.5^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 154m) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應明顯較大之外，大致上來說，有放置屏蔽隧道區之位移反應還是會較無放置屏蔽隧道區小。

對於 U_z 之反應，除了在振動頻率為 1Hz ($\theta=0^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 77m)、3Hz ($\theta=22.5^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m)、5Hz ($\theta=45^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 55m)、7Hz ($\theta=168.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 154m)、9Hz ($\theta=67.5^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 33m) 以及 10Hz ($\theta=146.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 132m) 時，有放置屏蔽隧道區之位移反應有放大之情形外，其餘之位移反應大致上有放置屏蔽隧道區還是會較無放置屏蔽隧道區小。

4.4 綜合分析

本節為 4.2 節及 4.3 節之延伸，探討屏蔽隧道區放置於有無開挖之土壤之比較。觀察在不同振動頻率下，其測點隨著施力位置的改變之位移振幅變化情形。

4.4.1 分析結果與探討

(一) 不同振動頻率之比較

1、單位鉛垂向簡諧載重之反應

當簡諧載重為鉛垂向時，分別在距土壤中心 33m、55m、77m、93.5m、110m、132m 及 154m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同之變化情形。其 U_r 與 U_z 之曲線變化皆會隨著頻率的增加而產生劇烈的跳動。

對於 U_r 之反應，在施力點距土壤中心 33m ($\theta=0^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、55m ($\theta=123.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz)、77m ($\theta=78.75^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、93.5m ($\theta=11.25^\circ$ 的位置)、110m ($\theta=0^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz)、132m ($\theta=112.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 以及 154m ($\theta=56.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 時，全開挖之土壤之位移反應對於無開挖之土壤會有放大之情形，而上述也是只舉出最為明顯的位置，尤其在振動頻率較高時，放大的位置常常不

只一處，不過就整體上看來，全開挖之土壤其位移反應會較無開挖之土壤小。

對於 U_z 之反應，在施力點距土壤中心 93.5m ($\theta=101.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、110m ($\theta=90^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz)、132m ($\theta=180^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 以及 154m ($\theta=180^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 時，全開挖之土壤之位移反應會有明顯放大之情形，但其變化曲線相較於 U_r 是稍微平緩的，而從整體來說，當施力位置與測點同高時，全開挖之土壤之位移反應大致上是較小的，若施力位置較測點高時，全開挖之土壤之位移反應會有局部放大之情形。

2、單位水平向簡諧載重之反應

當簡諧載重為水平向時，分別在距土壤中心 33m、55m、77m、93.5m、110m、132m 及 154m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同之變化情形。同樣地，其曲線變化皆會隨著頻率的增加而產生劇烈的跳動。

對於 U_r 之反應，在施力點距土壤中心 33m ($\theta=157.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz)、55m ($\theta=90^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、77m ($\theta=67.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 7Hz)、93.5m ($\theta=168.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 7Hz)、132m ($\theta=22.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 5Hz) 以及 154m ($\theta=112.5^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 時，全開挖之土壤之位移反應是較大的，而從整體來看，全開挖之土壤之位移反應會較無開挖之土壤小。

對於 U_z 之反應，在施力點距土壤中心 93.5m ($\theta=11.25^\circ$ 的位置)、110m ($\theta=101.25^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz)、132m ($\theta=45^\circ$ 的位置，振動頻率為 9Hz) 以及 154m ($\theta=180^\circ$ 的位置，振動頻率為 10Hz) 時，全開挖之土壤之位移反應明顯較大，而整體看來，當施力位置與測點同高時，其全開挖之土壤之位移反應較無開挖之土壤小，若施力位置較測點高時，其曲線變化會變得相當凌亂，即全開挖之土壤之位移反應會有多處局部放大之情形。

(二) 改變施力位置之比較

1、單位鉛垂向簡諧載重之反應

當簡諧載重為鉛垂向時，分別在振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 之情形下，觀察 U_r 與 U_z 隨施力位置不同之變化情形。

對於 U_r 之反應，在振動頻率為 1Hz ($\theta=0^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m)、3Hz、5Hz ($\theta=11.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m)、7Hz、9Hz 以及 10Hz ($\theta=11.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m) 時，全開挖之土壤之位移反應會有放大之情形，而當頻率較高時，其曲線變化會變得凌亂，但大致上可發現，全開挖之土壤其位移反應會較無開挖之土壤小。

對於 U_z 之反應，在振動頻率為 9Hz ($\theta=101.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m) 以及 10Hz ($\theta=90^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 110m) 時，全開挖之土壤之位移反應會有明顯放大之情形，就整體看來，有嚴重位移放大之情形皆發生在頻率較高時，其中又以施力位置較測點高時最為明顯，即全開挖之土壤之位移反應可明顯看出有局部放大之情形，而其餘之位移反應全開挖之土壤是較小的。

2、單位水平向簡諧載重之反應

當簡諧載重為水平向時，分別在振動頻率為 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 之情形下，觀察 U_r 與 U_z 隨施力位置不同之變化情形。

對於 U_r 之反應，在振動頻率為 5Hz ($\theta=146.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 55m)、7Hz ($\theta=67.5^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 77m)、9Hz ($\theta=90^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 55m) 以及 10Hz ($\theta=157.5^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 33m) 時，全開挖之土壤之位移反應會有局部放大之現象，而從中高頻開始，其曲線變化漸漸變得凌亂，但就整體而言，全開挖之土壤其位移反應會較無開挖之土壤小。

對於 U_z 之反應，在振動頻率為 1Hz ($\theta=0^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m)、3Hz、7Hz、9Hz、10Hz ($\theta=11.25^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 93.5m) 以及 5Hz ($\theta=78.75^\circ$ 的位置，施力點距土壤中心 132m) 時，全開挖之土壤之位移反應會有明顯放大之情形，相同地，從中高頻開始，其曲線變化就抖動的相當劇烈，不過整體而言，除了當振動頻率為 1Hz，施力位置較測點高時，可明顯看出全開挖之土壤其位移反應會較大外，其餘之位移反應全開挖之土壤是較小的。

4.5 小結

根據前述之比較，得到以下之結論：

1. 當外力直接作用於測點上時，鉛垂向簡諧載重之 u_z 會等於水平向簡諧載重之 u_x ，此種現象可由結構學中之能量法作解釋，而其先決條件有二，一為當結構體受外力作用時，達力平衡之狀態；二為導入微小變形之假設。其證明如下：

假設單位鉛垂向簡諧外力為 F_z ，水平向為 F_r ，並定義位移的第一個下標表示點的位置，第二個下標表示產生此位移的力。

a. 在結構體上先作用 F_z ，再作用 F_r ， $U_z = W_z = \frac{1}{2} F_z u_{zz} + \frac{1}{2} F_r u_{rr} + F_z u_{rz}$

b. 在結構體上先作用 F_r ，再作用 F_z ， $U_r = W_r = \frac{1}{2} F_r u_{rr} + \frac{1}{2} F_z u_{zz} + F_r u_{rz}$

由於 $U_z = U_r$ 所以 $F_z u_{rz} = F_r u_{rz}$

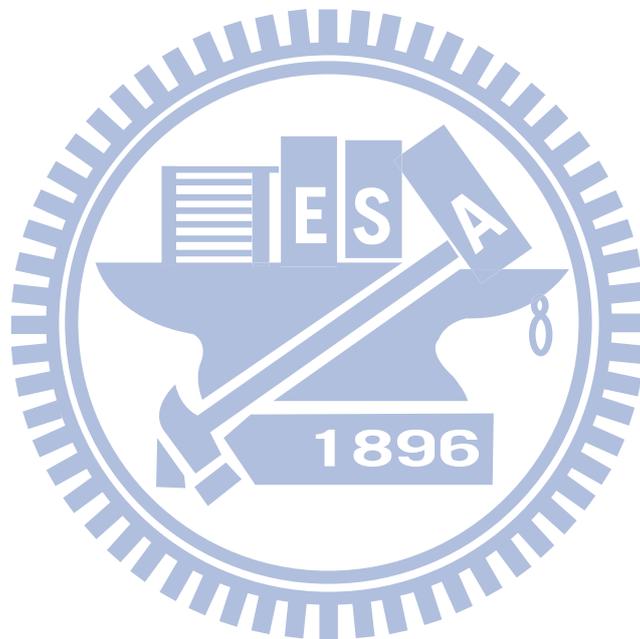
上述表示， F_z （第一組廣義力）在由 F_r （第二組廣義力）所引起的位移上做的功，等於 F_r （第二組廣義力）在由 F_z （第一組廣義力）所引起的位移上做的功。即為功的互等定理。（reciprocal theorem of work）。

而如果再進一步假設 $F_z = F_r$ ，則可得到 $u_{rz} = u_{rz}$

上述可以解釋為，一個力作用於點（r）時在點（z）引起的位移，等於同一個力作用於點（z）時在點（r）引起的位移。是為位移的互等定理（reciprocal theorem of displacement）。

2. 對於無開挖之土壤在放置屏蔽隧道區之後，其測點之位移變化就分析結果而言，鉛垂向振動所產生之位移大致上為變小；而水平向振動所產生之位移，除了 U_r 在振動頻率為 1Hz 以及 U_z 在振動頻率為 3Hz 和 5Hz 時，會有明顯變大之外，其餘之位移變化則為變小。
3. 對於全開挖之土壤在放置屏蔽隧道區之後，其結論也類似，雖部分頻率之測點位移會有變大之情形，但整體而言，在放置屏蔽隧道區之後，其測點位移是變小的。
4. 對於屏蔽隧道區放置於有無開挖之土壤比較，其分析結果顯示，不論是鉛垂向還是水平向振動所產生之位移， U_r 之反應，大致上屏蔽隧道區放置於全開挖之土壤會較小， U_z 之反應，其位移變化抖動地相當劇烈，亦即位移變大之

情形不僅僅只有一處，但從整體來看，也是屏蔽隧道區放置於全開挖之土壤之位移是較小的。



第五章 案例分析 2

本章是以台灣光子源加速器環館為分析對象，不同於前一章只考慮環館內之屏蔽隧道區，其為一圍繞現有行政及研光大樓之巨大環形建築物，半埋半露的依傍在新竹科學園區西北角的小山丘上。而為了較符合真實之地貌，土壤模型之建立將以半開挖之形式作處理，但其實際開挖之情形卻難以準確的量測，故是以加速器環館之結構圖中，其擋土牆之高程為參考依據，作為真實地貌之簡化標準，相較於前一章之土壤模型都為平坦之地形，本章便顯得較為複雜。

根據第三章收斂性探討之結果，由於已建立大量的模型與解析解相互比對，故認為其分析之結果是有相當之精度，才能假設後續部份之模型為正確、可信的，並作此後續部份之分析與討論。而研究中，此部份並無解析解可以比對，故對值之收斂需要特別注意。

以下將分成三節作討論，第一部分先作模型設定的基本介紹，第二部分為收斂性分析，第三部分則為討論簡諧外力對加速器環館之影響。

5.1 基本模型

本章主要在模擬台灣光子源加速器環館之位移反應，研究中是以兩種模型相互比較，分別為半開挖之土壤以及半開挖之土壤（含板），探討環境外力對於加速器環館內測點之變化情形。其中測點之設置將分為兩個 case，其一是以土壤中心為原點，在 $\theta=0^\circ$ 、 $r=84m$ （即板中心）處設為測點 A；另一同樣以土壤中心為原點，在 $\theta=180^\circ$ 、 $r=84m$ （即板中心）處設為測點 B，如 Fig. 5.1 所示。

台灣光子源加速器環館則是根據結構圖上之實際大小與幾何配置，簡化為一環形之混凝土板。其內徑為 64m，外徑為 104m，板寬為 40m，厚度為 1.6m。另外，為了考慮真實沉埋之情況，土壤模型將以半開挖之方式作處理，其 x-y 剖面圖是一三層階梯之幾何形狀，第一層階梯為最左側之土壤（即 $\theta=180^\circ$ 、 $r=104m$ 至左邊界之範圍），若假設以此層為基準面，則其高程為 0m；第二層階梯為中間之土壤（即 $\theta=0^\circ$ 、 $r=104m$ 至 $\theta=180^\circ$ 、 $r=104m$ 之範圍），其高程為 9m；第三層階梯為最右側之土壤（即 $\theta=0^\circ$ 、 $r=104m$ 至右邊界之範圍），其高程為 13.3m。

而加速器環館坐落於土壤中心，高程為 0m 之基準面上。

而加速器環館之建立方法，為將基礎板上之環館簡化成均布載重，故只須改變基礎板之密度設置，便可達到簡化之目的。所以在基礎板的材料組成方面，除了密度 ρ_c 為 $4200\text{kg}/\text{m}^3$ （混凝土自身密度 $2400\text{kg}/\text{m}^3$ 以及加速器環館之密度 $1800\text{kg}/\text{m}^3$ ）之外，其餘材料參數則同第四章之假設。土壤之基本材料參數則沿用第三章之假設。

至於施力方式部分，為一單位之簡諧外力以點荷重之方式直接加載於模型上。其施力點是依觀測點作改變，當要觀察測點 A 時，則將施力點施於 $\theta=0^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 處（即測點 A 右側 40m 處）；而若要觀察測點 B 時，則將施力點施於 $\theta=180^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 處（即測點 B 左側 40m 處），如 Fig. 5.2 所示。振動頻率一樣只取 1Hz、3Hz、5Hz、7Hz、9Hz 及 10Hz 作分析。

最後為採用元素與邊界條件，加速器環館為採用三維八節點 S8R 之殼元素作模擬。此外，研究中所分析之模型皆假設結構物與土壤無相對位移，故不使用介面元素，即結構物與土壤之間為完全連結之狀況。

5.2 收斂性分析

本節為探討簡諧力對於無放置加速器環館之半開挖土壤，其測點上位移之收斂性。其中土壤之模型/元素同樣以第三章之結論作適當的調整，當振動頻率為 1Hz 時，模型/元素選用 574/10 與 574/8 之結果相互比較；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為選用 274/5 與 274/4 之結果相互比較；而 7Hz、9Hz 以及 10Hz 時，模型/元素則選用 189/2.5 與 189/2 之結果相互比較，以此作出收斂性之探討。

5.2.1 分析結果與探討

(一) 單位鉛垂向簡諧載重之反應

1、測點 A

當簡諧載重為鉛垂向時，在 $\theta=0^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z ，在不同之振動頻率下其收斂行為，如 Table 5.1 所示。

對於 U_r 之反應，在 1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 5.9%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.1%與 0.5%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.1%、0.0%與 0.1%。整體看來，除了 1Hz 之誤差較大之外，其餘頻率皆可控制在 1% 以下。

對於 U_z 之反應，1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 0.8%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.0%與 0.3%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.2%、0.8%與 6.7%。整體看來，除了 10Hz 之誤差較大之外，其餘頻率皆可控制在 1% 以下。

2、測點 B

當簡諧載重為鉛垂向時，在 $\theta=180^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z ，在不同之振動頻率下其收斂行為，如 Table 5.2 所示。

對於 U_r 之反應，1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 1.2%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.1%與 1.2%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.1%、0.7%與 0.5%。整體看來，所有頻率之誤差皆可控制在 1% 上下。

對於 U_z 之反應，1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 3.5%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.0%與 0.5%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.3%、0.5%與 0.5%。整體看來，除了 1Hz 之誤差稍大之外，其餘頻率皆可控制在 1% 以下。

(二) 單位水平向簡諧載重之反應

1、測點 A

當簡諧載重為水平向時，在 $\theta=0^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z ，在不同之振動頻率下其收斂行為，如 Table 5.3 所示。

對於 U_r 之反應，1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 1.4%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.4%與 0.9%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.3%、0.7%與 0.8%。整體看來，除了 1Hz 的誤差較大之外，其餘頻率皆可控制在 1% 以下。

對於 U_z 之反應，1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 1.9%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.1%與 0.1%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.5%、0.2%與 0.1%。整體看來，所有頻率之誤差皆可控制在 2% 以下。

2、測點 B

當簡諧載重為水平向時，在 $\theta=180^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z ，在不同之振動頻率下其收斂行為，如 Table 5.4 所示。

對於 U_r 之反應，1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 1.6%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.6%與 2.1%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.3%、0.1%與 0.4%。整體看來，所有頻率之誤差皆可控制在 2% 上下。

對於 U_z 之反應，1Hz 時，模型/元素為 574/10 與 574/8 之誤差為 1.7%；3Hz 與 5Hz 時，模型/元素為 274/5 與 274/4 之誤差分別為 0.5%與 1.0%；7Hz、9Hz 與 10Hz 時，模型/元素為 189/2.5 與 189/2 之誤差分別為 0.6%、0.4%與 0.7%。整體看來，所有頻率之誤差皆可控制在 2% 以下。

(三) 結果討論

由上述分析之結果可知，對於鉛垂向簡諧載重，所有頻率之誤差可控制在 7% 以下；對於水平向簡諧載重，所有頻率之誤差可控制在 2% 上下。而其中誤差較大的部分皆在鉛垂向簡諧載重，如測點 A，振動頻率為 10Hz 之 U_z ，其原因可能是其值之級數太小，若忽略這部分，其誤差甚至皆可控制在 2% 上下，但整體來說其收斂性已經相當良好。

5.3 土壤半開挖之分析

本節將探討半開挖之土壤在放置加速器環館（如 Fig. 5.3 所示）之後，簡諧力會對測點之位移反應有何影響。觀察在不同振動頻率下，其測點隨著施力位置的改變之位移振幅變化情形。

5.3.1 分析結果與探討

(一) 單位鉛垂向簡諧載重之反應

1、測點 A

當簡諧載重為鉛垂向時，在 $\theta=0^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同其變化之情形，如 Table 5.5 所示。

對於 U_r 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 50.1%；在 3Hz 時，位移減少了 56.0%；在 5Hz 時，位移減少了 61.5%；在 7Hz 時，位移減少了 76.5%；在 9Hz 時，位移減少了 74.7%；在 10Hz 時，位移減少了 73.0%。整體看來，其位移反應在放置加速器環館之後，皆減少了 50% 以上。

對於 U_z 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 1.8%；在 3Hz 時，位移增加了 6.1%；在 5Hz 時，位移增加了 30.4%；在 7Hz 時，位移增加了 96.3%；在 9Hz 時，位移增加了 290.4%；在 10Hz 時，位移增加了 1042.6%。整體看來，除了振動頻率為 1Hz 之外，其餘位移反應都在放置加速器環館之後放大，且當頻率愈高時，位移增加之幅度也愈大。

2、測點 B

當簡諧載重為鉛垂向時，在 $\theta=180^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同之變化情形，如 Table 5.6 所示。

對於 U_r 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 42.7%；在 3Hz 時，位移減少了 70.6%；在 5Hz 時，位移減少了 85.6%；在 7Hz 時，位移減少了 88.8%；在 9Hz 時，位移減少了 72.0%；在 10Hz 時，位移減少了 73.2%。整體看來，其位移反應在放置加速器環館之後，皆減少了 42% 以上。

對於 U_z 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 2.7%；在 3Hz 時，位移增加了 0.1%；在 5Hz 時，位移增加了 0.8%；在 7Hz 時，位移增加了 0.8%；在 9Hz 時，位移減少了 12.0%；在 10Hz 時，位移減少了 18.3%。整體看來，其位移反應在放置加速器環館之後，惟有在高頻之反應較為明顯，位移減少 12% 以上。

(二) 單位水平向簡諧載重之反應

1、測點 A

當簡諧載重為水平向時，在 $\theta=0^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同其變化之情形，如 Table 5.7 所示。

對於 U_r 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 16.7%；在 3Hz 時，位移減少了 29.6%；在 5Hz 時，位移減少了 11.8%；在 7Hz 時，位移減少了 37.8%；在 9Hz 時，位移減少了 85.6%；在 10Hz 時，位移減少了 96.1%。整體看來，其位移反應在放置加速器環館之後，皆減少了 11% 以上。

對於 U_z 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 20.3%；在 3Hz 時，位移減少了 7.4%；在 5Hz 時，位移減少了 3.6%；在 7Hz 時，位移增加了 18.3%；在 9Hz 時，位移增加了 27.3%；在 10Hz 時，位移增加了 50.2%。整體看來，其位移反應在放置加速器環館之後會出現兩種情況，在低頻時，其位移反應為減少；在高頻時，其位移反應則為放大。

2、測點 B

當簡諧載重為水平向時，在 $\theta=180^\circ$ 之 r 方向，距土壤中心 124m 位置上施力，觀察測點之 U_r 與 U_z 隨振動頻率不同之變化情形，如 Table 5.8 所示。

對於 U_r 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 29.4%；在 3Hz 時，位移減少了 42.3%；在 5Hz 時，位移減少了 29.7%；在 7Hz 時，位移減少了 8.7%；在 9Hz 時，位移減少了 75.2%；在 10Hz 時，位移減少了 91.1%。整體看來，其位移反應在放置加速器環館之後，皆減少了 8% 以上。

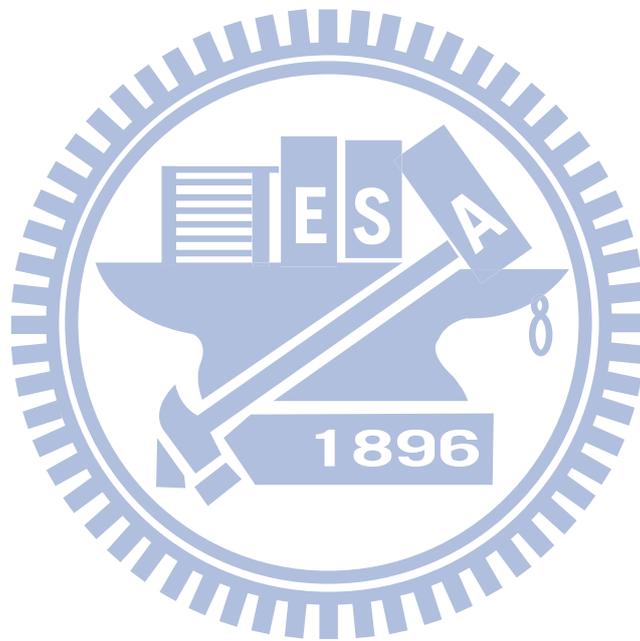
對於 U_z 之反應，在 1Hz 時，位移減少了 35.5%；在 3Hz 時，位移增加了 13.6%；在 5Hz 時，位移增加了 4.1%；在 7Hz 時，位移增加了 6.1%；在 9Hz 時，位移增加了 8.4%；在 10Hz 時，位移增加了 17.1%。整體看來，除了振動頻率為 1Hz 之外，其餘位移反應都在放置加速器環館之後放大。

5.4 小結

根據前述之比較，得到以下之結論：

1. 對於半開挖之土壤在放置加速器環館之後，若忽略 5% 以下之微小位移變化，

在鉛垂向振動所產生之位移，其測點 A 之 U_r 會變小， U_z 為變大，而測點 B 之位移則皆為變小；在水平向振動所產生之位移，其測點 A 之 U_r 變小， U_z 則會有兩種情況，在低頻時變小，高頻時變大，而測點 B 之結論也同測點 A，其 U_r 會變小， U_z 在低頻時變小，高頻時變大。



第六章 結論與建議

本文以有限元素法套裝軟體 ABAQUS 來模擬波傳之問題，首先進行收斂測試找出最佳之模型/元素，再將模擬所得之分析結果與解析解相互比對，便能藉此問題驗證 ABAQUS 軟體對於波傳問題之適用性。但在真實的情況下，基礎並非是剛性無質量的，所以最後將針對非剛性且具質量的基礎作研究，探討在特定頻率振動之下，隨著施力位置的改變，其測點位移之變化情形。以下為對本文分析所得之數據作一總結。

6.1 結論

- (1) 根據收斂性測試之結果得知，模型尺寸係以波長控制，波長又與振動頻率有關，故當振動頻率較低時，波長較長，所需的網域範圍較大；而當頻率較高時，波長較短，所需的元素大小較小，其所需的網域範圍也可較小。其中若選用之網域範圍大於 λ_s 、元素邊長小於 $\lambda_s/10$ ，將可得到令人滿意之模擬結果。
- (2) 對於有限元素法套裝軟體 ABAQUS 求解波傳之問題，本文以 Liou[2~5]之解析解相互比對。根據結果顯示，雖然在部分頻率之分析上會有些微差異，但只要分析模型/元素選用適當，即可得到與解析解相近之趨勢及反應，故可知 ABAQUS 軟體在求解波傳問題之適用性。
- (3) 由實際案例之分析結果顯示，對於無開挖之土壤在放置屏蔽隧道區之後，鉛垂向振動所產生之測點位移變化，大致上為變小；而水平向振動所產生之測點位移變化，整體來說也是變小之情形。

對於全開挖之土壤在放置屏蔽隧道區之後，其結論也類似，雖部分頻率之測點位移會有變大之情形，但整體而言，在放置屏蔽隧道區之後，其測點位移是變小的。

對於屏蔽隧道區放置於有無開挖之土壤比較，不論是鉛垂向還是水平向振動所產生之測點位移，從整體來看，屏蔽隧道區放置於全開挖之土壤會是較小的。

- (4) 由實際案例 2 之分析結果顯示，對於半開挖之土壤在放置加速器環館之後，在鉛垂向振動所產生之位移，其測點 A 之 U_r 會變小， U_z 為變大，而測點 B 之位移則皆為變小；在水平向振動所產生之位移，不論是在測點 A 還是測點 B，其 U_r 皆會變小， U_z 則會有兩種情況，在低頻時變小，高頻時變大。

6.2 建議

根據本研究所得之結論，將針對未來從事相關之數值模擬提出以下幾點建議：

- (1) 本文所採用之阻尼形式為雷利阻尼，而此部分之參數設定仍有需要改進的地方，例如阻尼比與阻尼係數的選取。
- (2) 可以嘗試其他不同類型的網格劃分方式，以圓柱體來說，除了本文所採的放射狀類型外，也有內圓外方形似銅錢幣類型之網格劃分方式。
- (3) 以 ABAQUS 軟體作分析，若欲得到較可信的數值解，勢必要增加網格密度，然而元素、節點數目過多，將造成運算時間過長，故需要尋求更高的電腦資源才能運算。
- (4) 對於 ABAQUS 求解波傳問題之適用性，可以再分析其他目前已有理論解之例子，例如半球型剛性基礎埋置於均勻半無限域內；或以其他有限元素法軟體對其數值解再作印證，例如 ANSYS。
- (5) 本文所建立實際案例之模型，由於分析區域廣大，故將其土壤參數以及地形外貌加以簡化建立之，而若能真實地模擬出實際的沉埋狀況，相信會使分析的成果更加完善。

REFERENCE

- [1] 陳建德，「劃時代的科學研究利器—超高亮度的「台灣光子源」」，物理雙月刊，第 33 卷第 1 期，50~63 頁，民國 100 年。
- [2] Sezawa, K., “Further Studies on Rayleigh-waves having Some Azimuthal Distribution,” Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 6, 1-18, 1929.
- [3] Liou, G. S., “Analytic solutions for soil-structure interaction in layered media,” Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 667-686, 1989.
- [4] Liou, G. S., Lee, G. C., and Ketter, R., “Analytic solution for dynamic loading on half-space medium,” Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, 117, 1485-1494, 1991.
- [5] Liou, G. S., “Vibrations induced by harmonic loadings applied at circular rigid plate on half-space medium,” Journal of Sound and Vibration, 323, 257-269, 2009.
- [6] Richard, F. E., Jr., Hall, J.R., Jr., and Woods, R. D., “Vibration of soils and foundations”, Prentice-Hall, New Jersey, 1970.
- [7] Kramer, S. L., “Geotechnical Earthquake Engineering,” Prentice-Hall, Inc., 149-161, 1996.
- [8] 黃宗宸，「南科園區高鐵沿線道路鋪面與排水溝渠之減振成效分析」，國立台灣大學，碩士論文，民國 93 年。
- [9] 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 93 年。
- [10] 孫紀成，「正方型沉埋剛性基礎阻抗矩陣」，國立交通大學，碩士論文，民國 95 年。
- [11] 愛發股份有限公司，「ABAQUS 實務入門引導」，初版，全華科技圖書股份有限公司，台北，民國 94 年。
- [12] 楊永斌，「高速列車所引致之土壤振動分析法」，財團法人中興工程顧問社，台北，民國 84 年。
- [13] Bolt, B. A., “Earthquakes: A Primer,” Freeman, W.H. and Company, San

Francisco, 241, 1978.

[14] ABAQUS Analysis User's Manual, ABAQUS, Inc., Version 6.11, 2011.



Table 3.1 ABAQUS 單位表格[11]

	SI	SI(mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne(10^3 kg)	slug	$\text{lbf s}^2/\text{in}$
Time	s	s	s	s
Stress	$\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$	$\text{MPa}(\text{N}/\text{mm}^2)$	lbf/ft^2	$\text{psi}(\text{lbf}/\text{in}^2)$
Energy	J	$\text{mJ}(10^{-3}\text{J})$	ft lbf	in lbf
Density	kg/m^3	tonne/mm^3	slug/ft^3	$\text{lb sec}^2/\text{in}^4$

Table 3.2 最佳模型大小/元素尺寸

振動頻率	1Hz	3Hz	5Hz	7Hz	9Hz	10Hz
模型/元素	450/12.5	200/6.25	150/6.25	150/3.125	150/3.125	125/3.125

Table 3.3 各模型元素與節點數目

		元素大小									
		25		12.5		6.25		3.125		mix	
	模型尺寸	Elements	Nodes	Elements	Nodes	Elements	Nodes	Elements	Nodes	Elements	Nodes
125		/	/	/	/	2640	12343	30240	128379	9570	43982
150		/	/	/	/	4984	22541	38400	163349	16552	73720
200		320	1665	1152	5745	10880	47907	75264	331997	/	/
300		672	3401	4992	22541	33600	143855	84480	354753	/	/
450		2160	10139	16416	71249	63936	274649	/	/	/	/
600		4992	22541	/	/	/	/	/	/	/	/
900		16416	71249	/	/	/	/	/	/	/	/
1200		33600	143855	/	/	/	/	/	/	/	/

Table 3.4 各模型所需之運算時間

所需時間 (sec)		元素大小				
		25	12.5	6.25	3.125	mix
模型尺寸	125			17	29	82
	150			35	1972	184
	200	7	9	114	3596	
	300	7	35	1319	26817	
	450	16	243	3964		
	600	35				
	900	245				
	1200	1325				

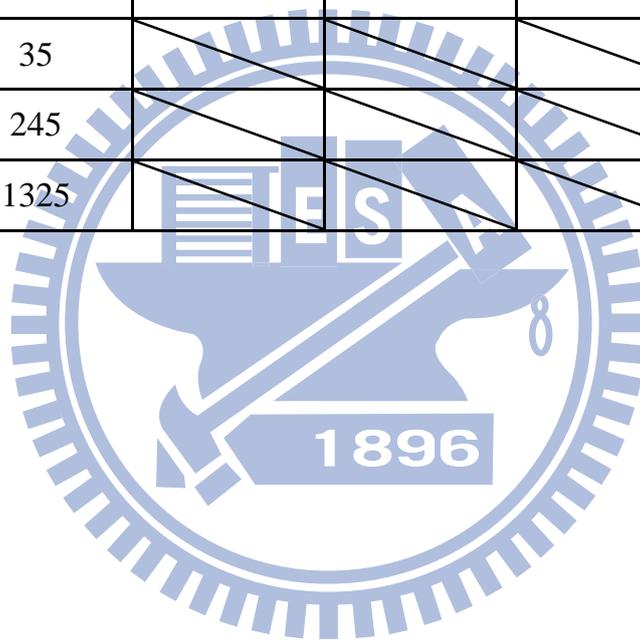


Table 5.1 土壤半開挖之收斂性分析 (鉛垂力-測點 A)

鉛垂力 (測點 A)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差	頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差
1Hz	2.43E-12	2.57E-12	5.9%	1Hz	1.41E-11	1.40E-11	0.8%
3Hz	8.57E-12	8.58E-12	0.1%	3Hz	1.34E-11	1.34E-11	0.0%
5Hz	1.39E-11	1.38E-11	0.5%	5Hz	1.11E-11	1.11E-11	0.3%
7Hz	1.45E-11	1.45E-11	0.1%	7Hz	5.74E-12	5.73E-12	0.2%
9Hz	1.24E-11	1.24E-11	0.0%	9Hz	2.24E-12	2.26E-12	0.8%
10Hz	1.10E-11	1.11E-11	0.1%	10Hz	6.98E-13	7.45E-13	6.7%

Table 5.2 土壤半開挖之收斂性分析 (鉛垂力-測點 B)

鉛垂力 (測點 B)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差	頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差
1Hz	4.63E-12	4.58E-12	1.2%	1Hz	1.44E-11	1.38E-11	3.5%
3Hz	9.07E-12	9.07E-12	0.1%	3Hz	1.48E-11	1.48E-11	0.0%
5Hz	1.24E-11	1.22E-11	1.2%	5Hz	1.64E-11	1.63E-11	0.5%
7Hz	1.40E-11	1.40E-11	0.1%	7Hz	1.27E-11	1.26E-11	0.3%
9Hz	1.21E-11	1.20E-11	0.7%	9Hz	1.45E-11	1.44E-11	0.5%
10Hz	1.20E-11	1.20E-11	0.5%	10Hz	1.51E-11	1.50E-11	0.5%

Table 5.3 土壤半開挖之收斂性分析 (水平力-測點 A)

水平力 (測點 A)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差	頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差
1Hz	1.48E-11	1.46E-11	1.4%	1Hz	9.16E-12	8.99E-12	1.9%
3Hz	1.09E-11	1.09E-11	0.4%	3Hz	1.35E-11	1.35E-11	0.1%
5Hz	4.42E-12	4.38E-12	0.9%	5Hz	1.43E-11	1.43E-11	0.1%
7Hz	5.00E-12	4.99E-12	0.3%	7Hz	8.92E-12	8.88E-12	0.5%
9Hz	5.87E-12	5.83E-12	0.7%	9Hz	7.97E-12	7.96E-12	0.2%
10Hz	5.85E-12	5.80E-12	0.8%	10Hz	6.49E-12	6.48E-12	0.1%

Table 5.4 土壤半開挖之收斂性分析 (水平力-測點 B)

水平力 (測點 B)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差	頻率	Element size 10/5/2.5	Element size 8/4/2	誤差
1Hz	2.00E-11	1.97E-11	1.6%	1Hz	5.67E-12	5.58E-12	1.7%
3Hz	1.57E-11	1.56E-11	0.6%	3Hz	9.13E-12	9.17E-12	0.5%
5Hz	9.73E-12	9.53E-12	2.1%	5Hz	1.28E-11	1.29E-11	1.0%
7Hz	6.44E-12	6.46E-12	0.3%	7Hz	1.23E-11	1.22E-11	0.6%
9Hz	9.36E-12	9.37E-12	0.1%	9Hz	1.43E-11	1.43E-11	0.4%
10Hz	9.67E-12	9.63E-12	0.4%	10Hz	1.36E-11	1.35E-11	0.7%

Table 5.5 土壤半開挖之分析 (鉛垂力-測點 A)

鉛垂力 (測點 A)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率	頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率
1Hz	2.43E-12	1.21E-12	-50.1%	1Hz	1.41E-11	1.39E-11	-1.8%
3Hz	8.57E-12	3.77E-12	-56.0%	3Hz	1.34E-11	1.42E-11	6.1%
5Hz	1.39E-11	5.35E-12	-61.5%	5Hz	1.11E-11	1.45E-11	30.4%
7Hz	1.45E-11	3.40E-12	-76.5%	7Hz	5.74E-12	1.13E-11	96.3%
9Hz	1.24E-11	3.13E-12	-74.7%	9Hz	2.24E-12	8.76E-12	290.4%
10Hz	1.10E-11	2.98E-12	-73.0%	10Hz	6.98E-13	7.98E-12	1042.6%

Table 5.6 土壤半開挖之分析 (鉛垂力-測點 B)

鉛垂力 (測點 B)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率	頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率
1Hz	4.63E-12	2.65E-12	-42.7%	1Hz	1.44E-11	1.40E-11	-2.7%
3Hz	9.07E-12	2.67E-12	-70.6%	3Hz	1.48E-11	1.48E-11	0.1%
5Hz	1.24E-11	1.78E-12	-85.6%	5Hz	1.64E-11	1.65E-11	0.8%
7Hz	1.40E-11	1.57E-12	-88.8%	7Hz	1.27E-11	1.28E-11	0.8%
9Hz	1.21E-11	3.39E-12	-72.0%	9Hz	1.45E-11	1.28E-11	-12.0%
10Hz	1.20E-11	3.23E-12	-73.2%	10Hz	1.51E-11	1.23E-11	-18.3%

Table 5.7 土壤半開挖之分析 (水平力-測點 A)

水平力 (測點 A)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率	頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率
1Hz	1.48E-11	1.23E-11	-16.7%	1Hz	9.16E-12	7.30E-12	-20.3%
3Hz	1.09E-11	7.69E-12	-29.5%	3Hz	1.35E-11	1.25E-11	-7.4%
5Hz	4.42E-12	3.90E-12	-11.8%	5Hz	1.43E-11	1.38E-11	-3.6%
7Hz	5.00E-12	3.11E-12	-37.8%	7Hz	8.92E-12	1.06E-11	18.3%
9Hz	5.87E-12	8.43E-13	-85.6%	9Hz	7.97E-12	1.02E-11	27.3%
10Hz	5.85E-12	2.27E-13	-96.1%	10Hz	6.49E-12	9.74E-12	50.2%

Table 5.8 土壤半開挖之分析 (水平力-測點 B)

水平力 (測點 B)							
R 方向位移				Z 方向位移			
頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率	頻率	土壤	土壤(板)	位移增加百分率
1Hz	2.00E-11	1.41E-11	-29.3%	1Hz	5.67E-12	3.66E-12	-35.5%
3Hz	1.57E-11	9.08E-12	-42.3%	3Hz	9.13E-12	7.89E-12	-13.6%
5Hz	9.73E-12	6.84E-12	-29.7%	5Hz	1.28E-11	1.23E-11	-4.1%
7Hz	6.44E-12	5.88E-12	-8.7%	7Hz	1.23E-11	1.30E-11	6.1%
9Hz	9.36E-12	2.32E-12	-75.2%	9Hz	1.43E-11	1.55E-11	8.4%
10Hz	9.67E-12	8.65E-13	-91.1%	10Hz	1.36E-11	1.59E-11	17.1%

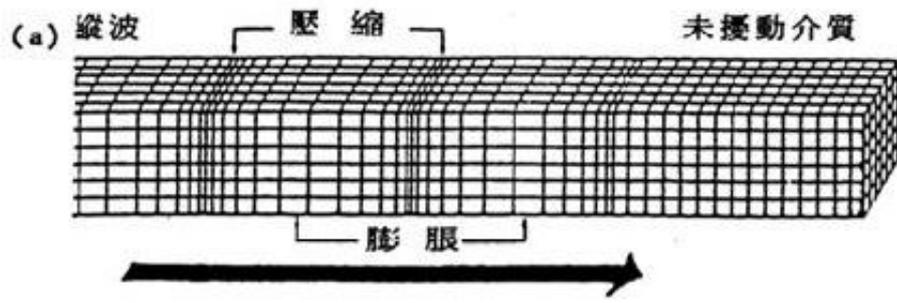


Fig. 2.1 壓力波波傳遞方向與介質振動方向的示意圖[13]

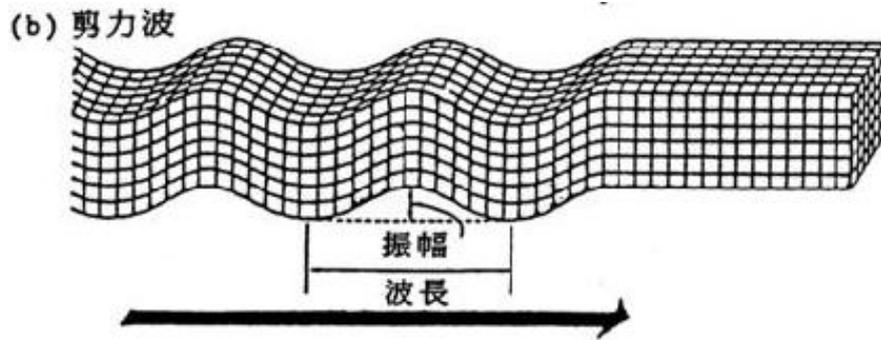


Fig. 2.2 剪力波波傳遞方向與介質振動方向的示意圖[13]

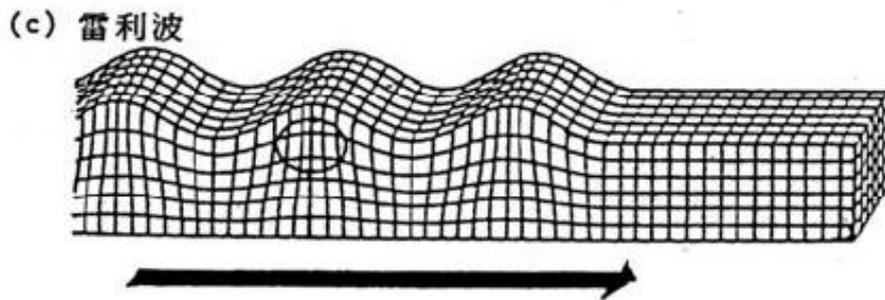


Fig. 2.3 雷利波波傳遞方向與介質振動方向的示意圖[13]

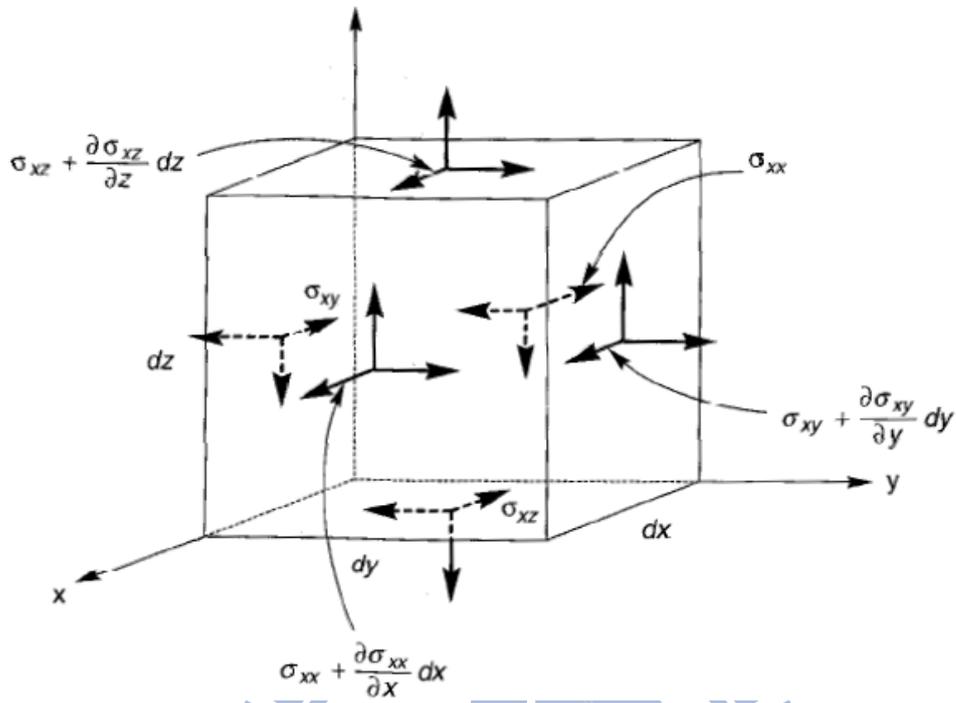


Fig. 2.4 元素表面應力分佈圖[6]

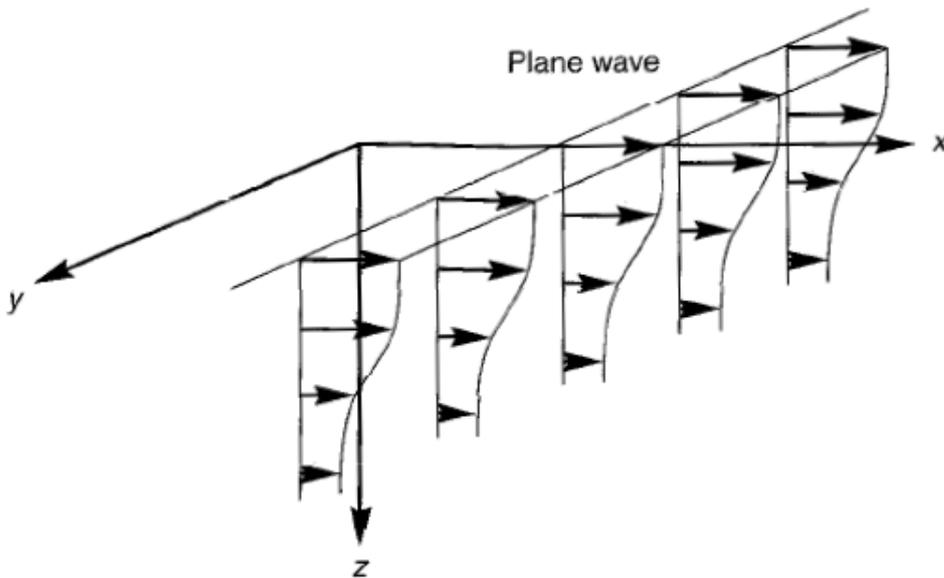


Fig. 2.5 半無限域表面平面波傳遞於 X-Z 平面[6]

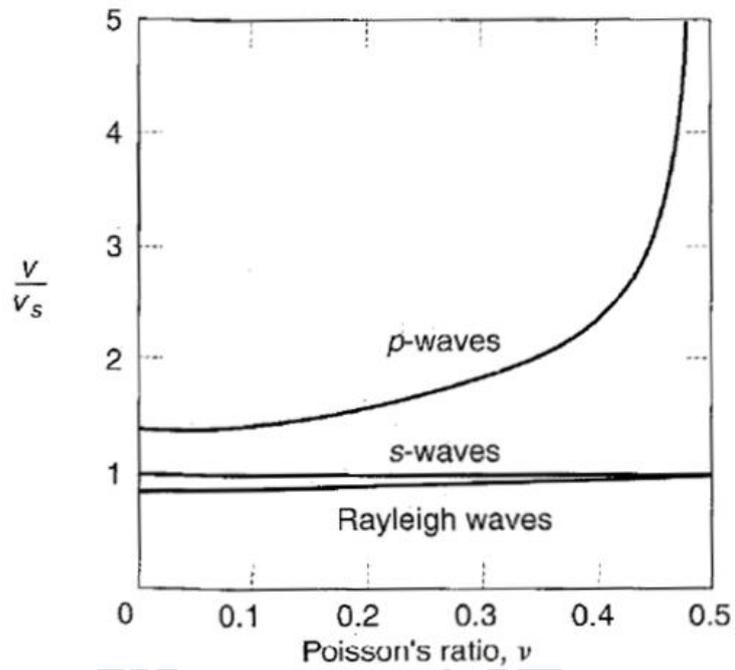


Fig. 2.6 P、S、R 波波速比較圖[6]

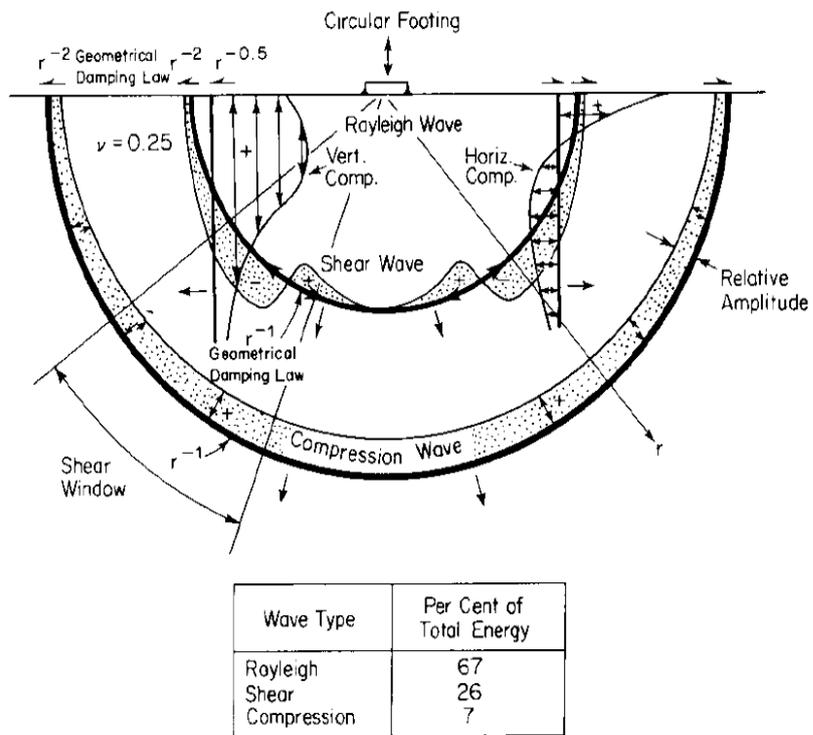
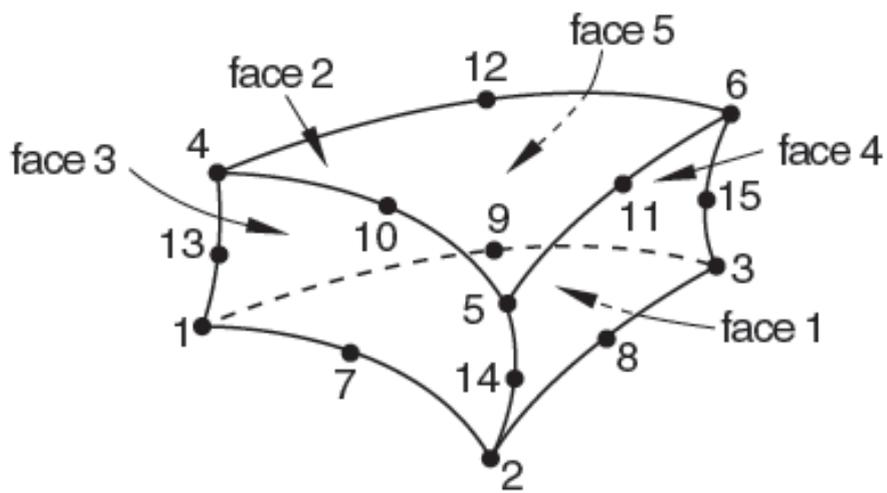
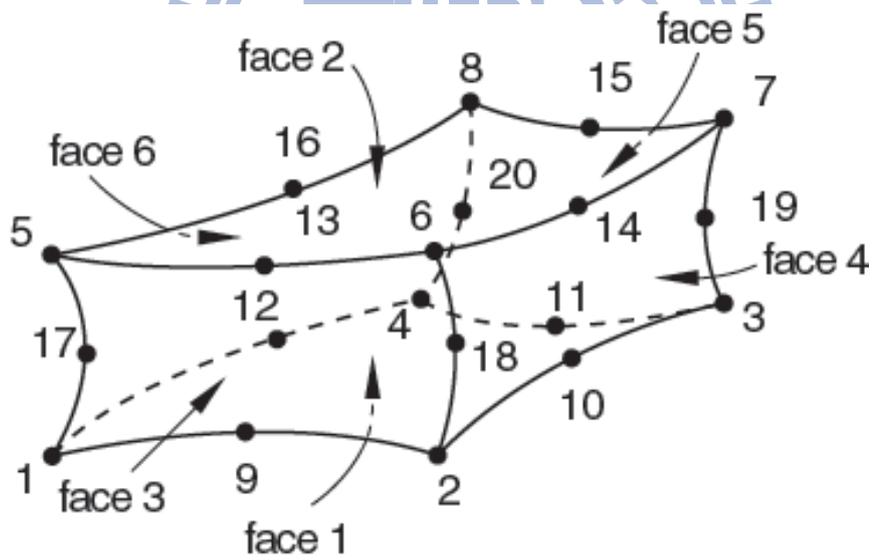


Fig. 2.7 半無限域表面三種波傳播帶能量百分比[7]



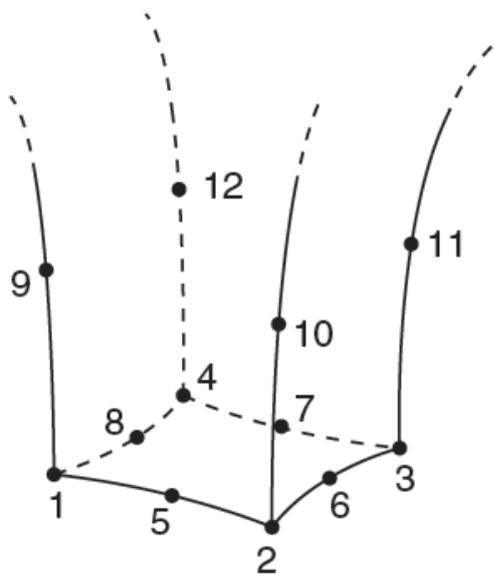
15 - node element

Fig. 3.1 三維實體元素 15-node[14]



20 - node element

Fig. 3.2 三維實體元素 20-node[14]



CIN3D12R
 Fig. 3.3 三維無限元素 12-node[14]

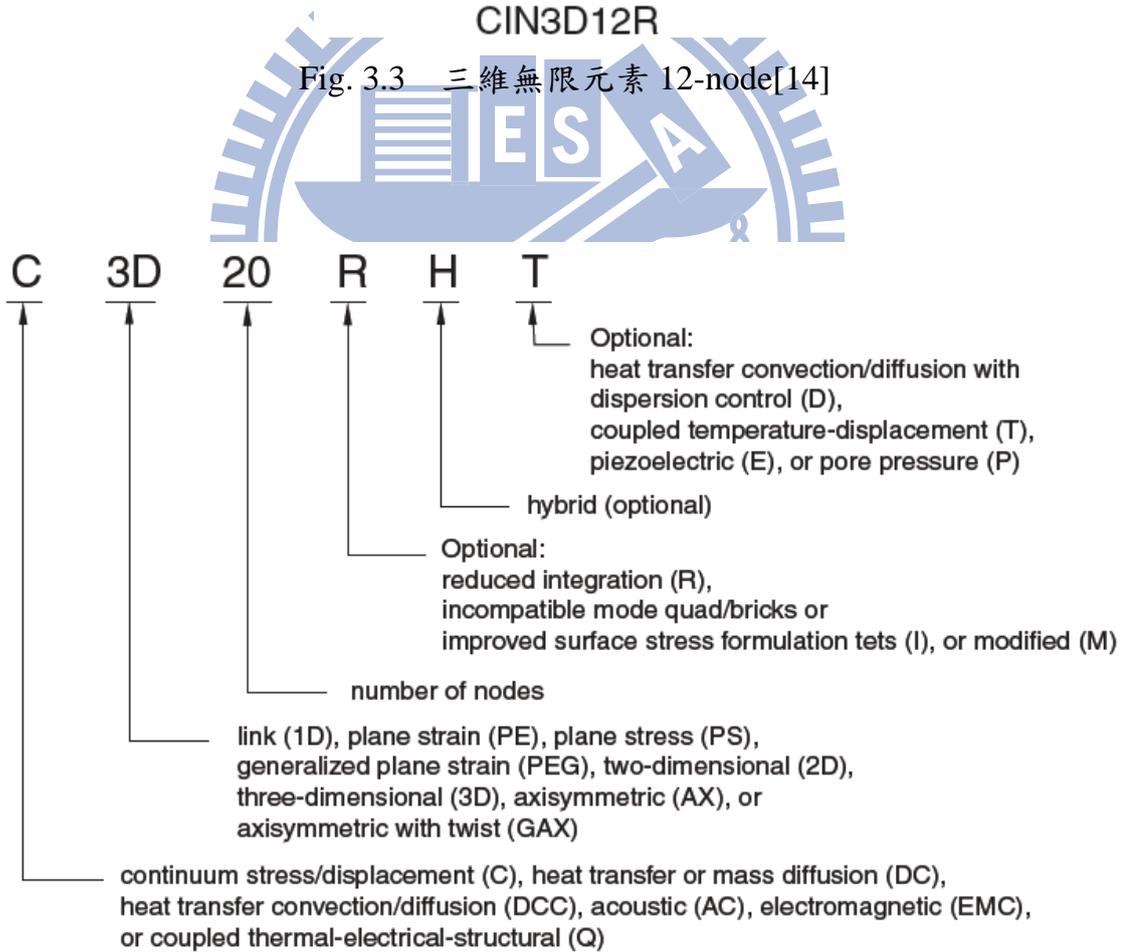


Fig. 3.4 實體元素的命名及其代表的意義[14]

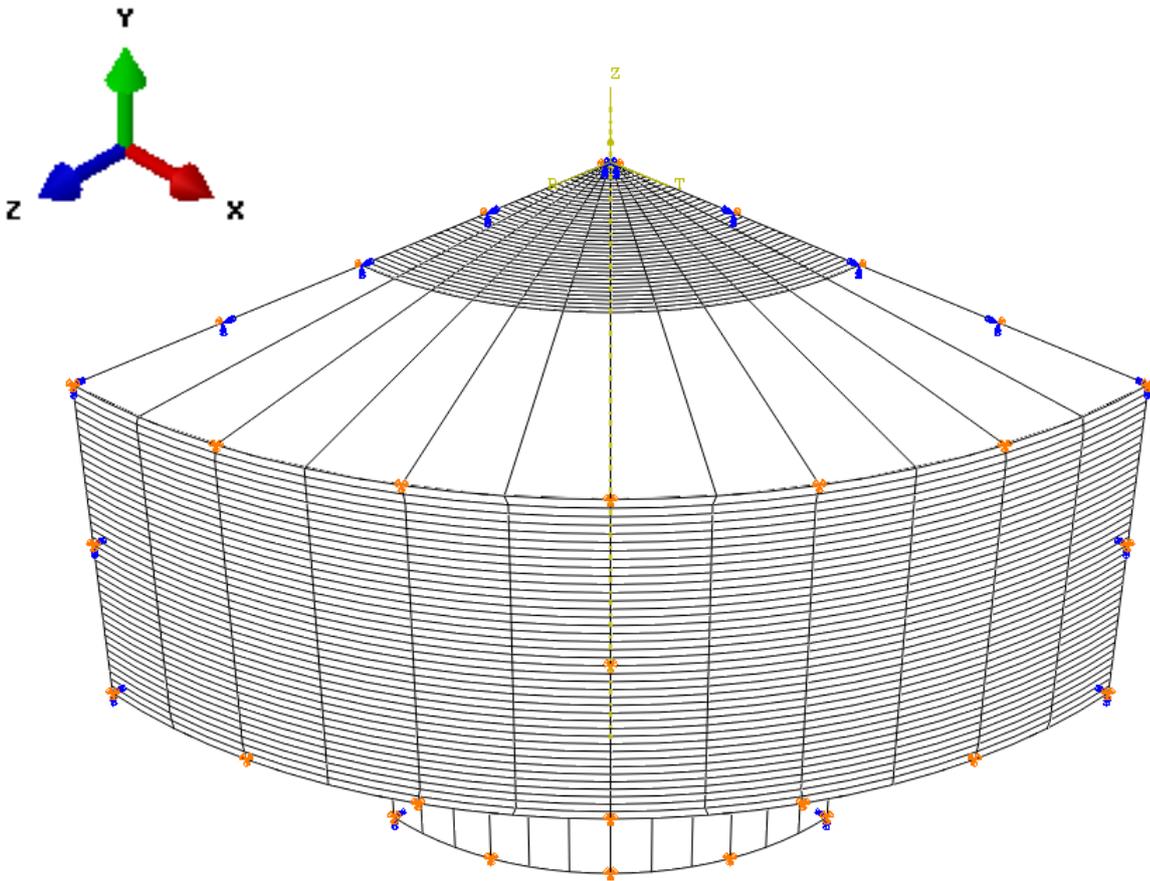


Fig. 3.5 ABAQUS 四分之一模型示意圖

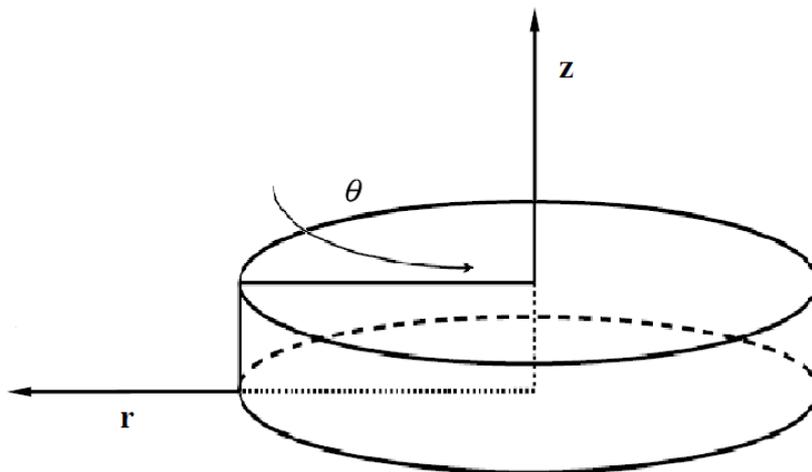
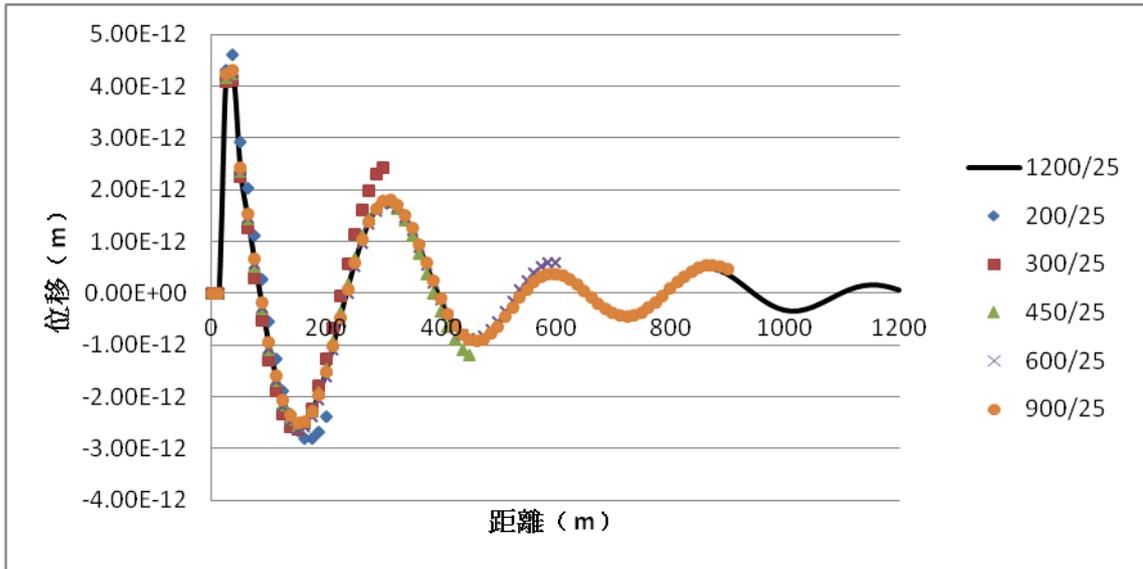
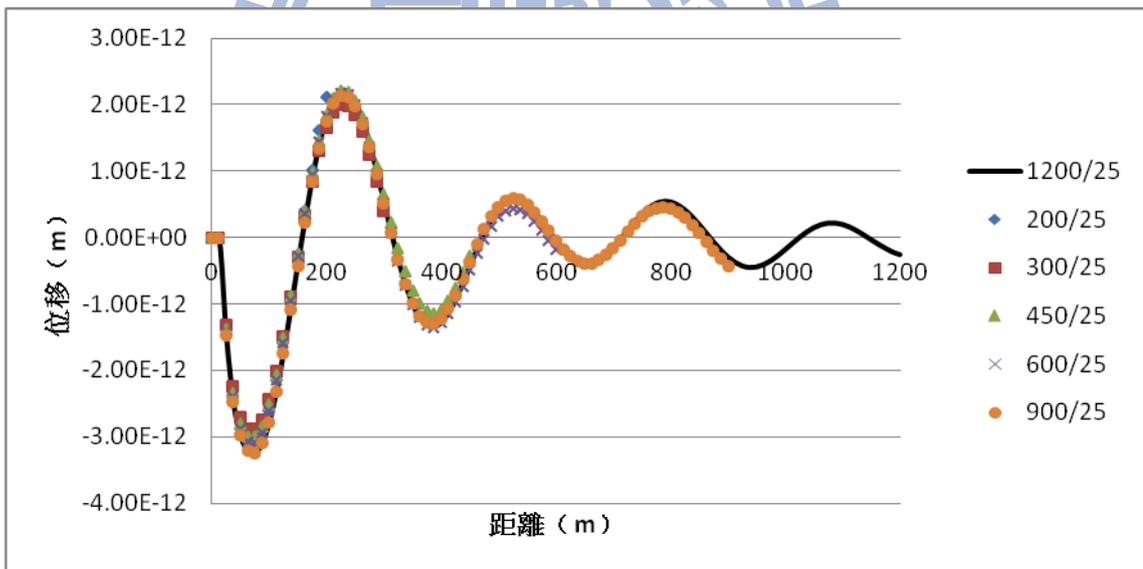


Fig. 3.6 圓柱座標系統示意圖

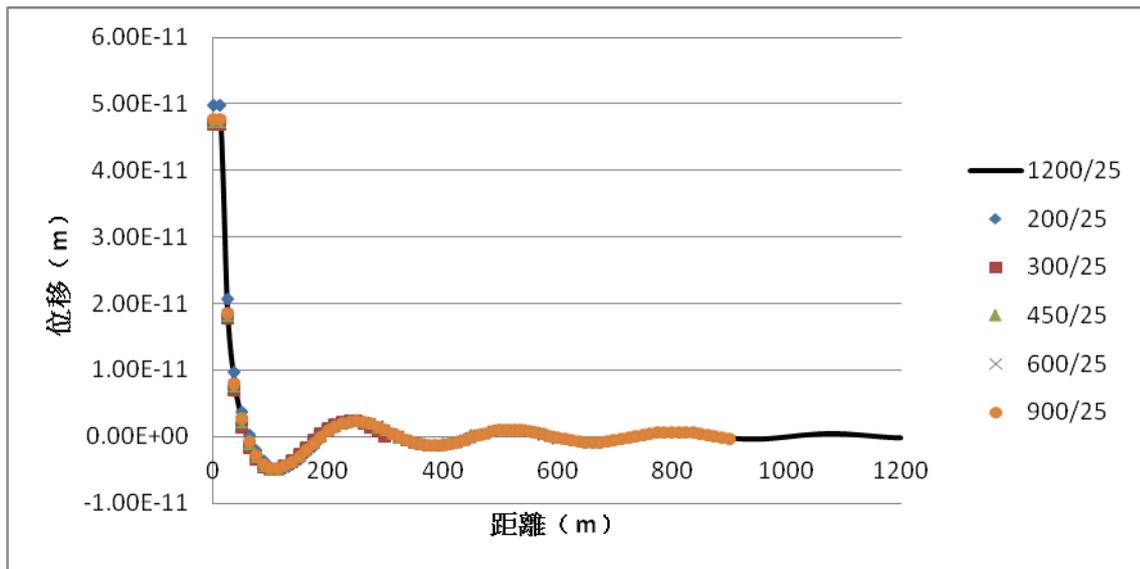


(a) 實部部分

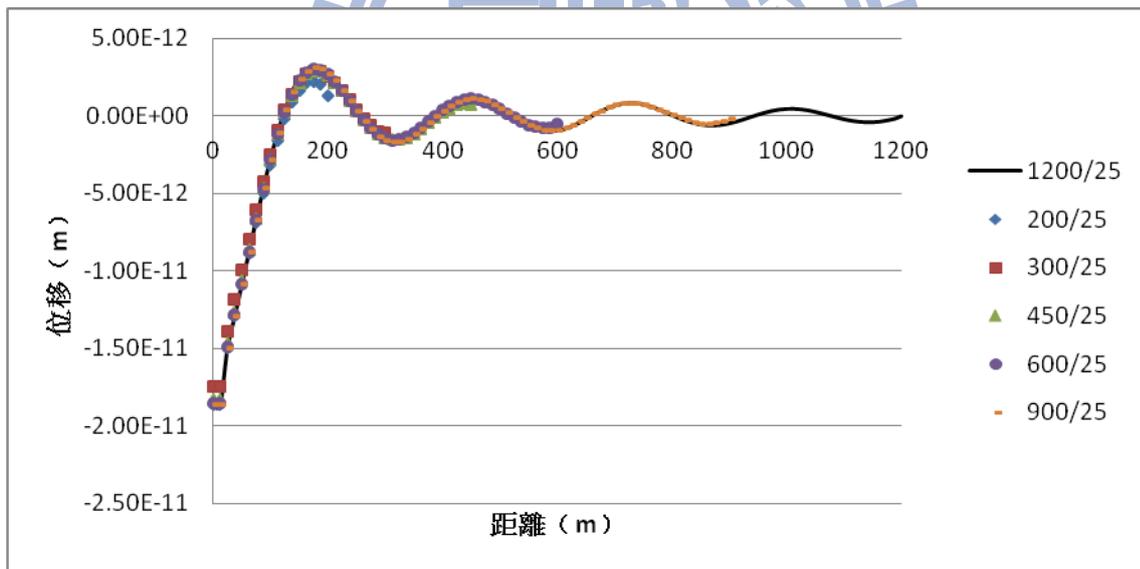


(b) 虛部部分

Fig. 3.7 模型一之網域範圍收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

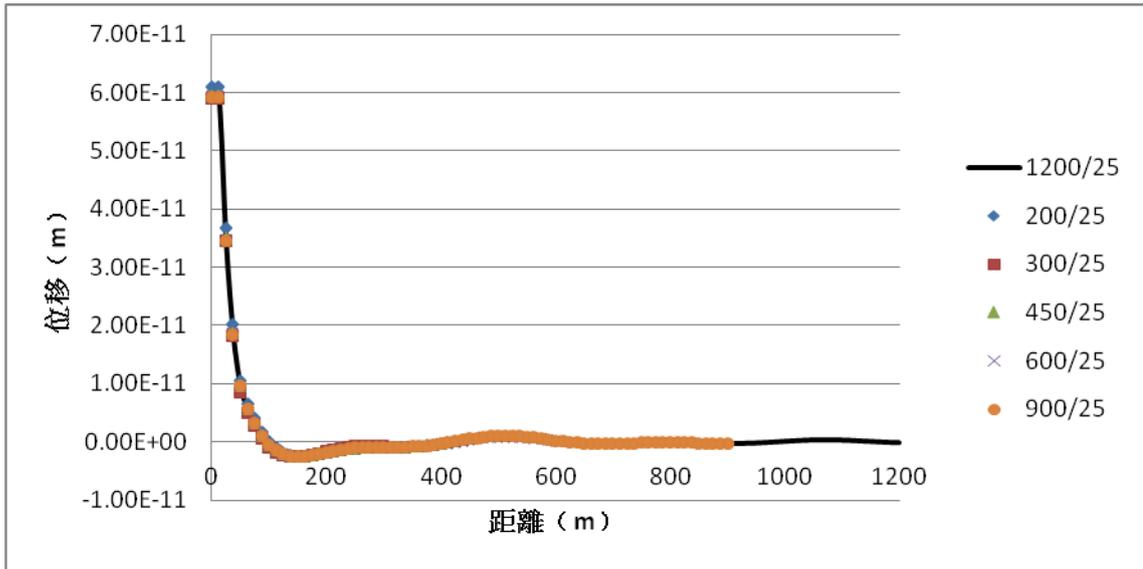


(a) 實部部分

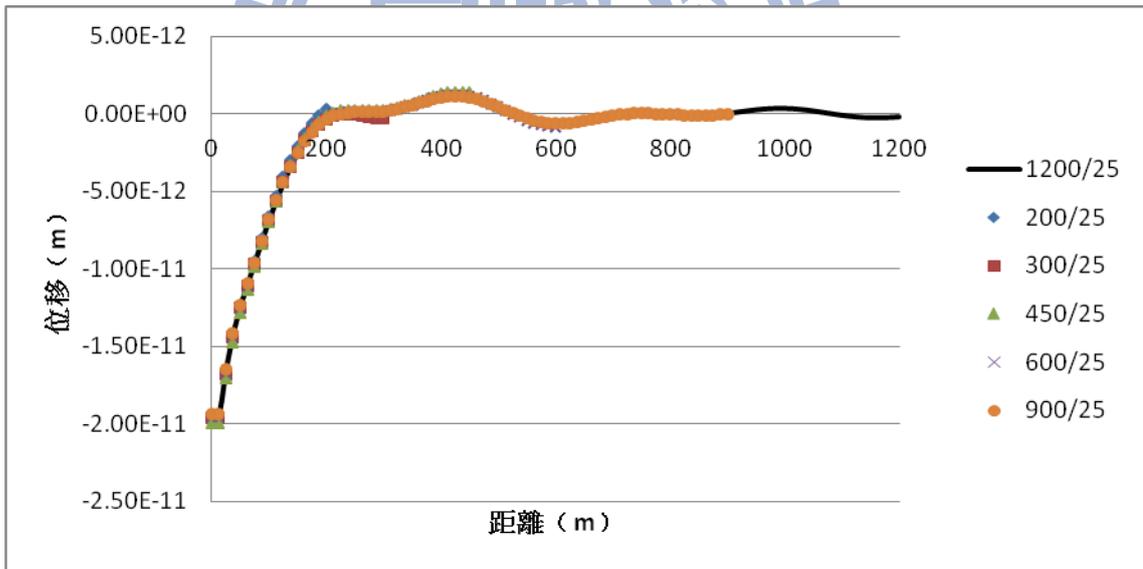


(b) 虛部部分

Fig. 3.8 模型一之網域範圍收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

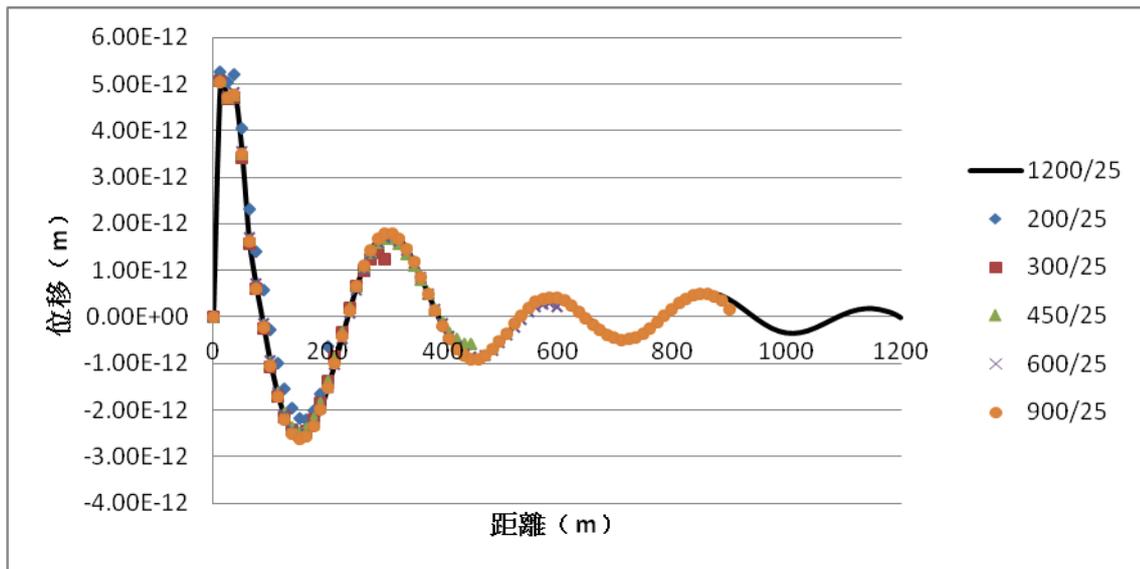


(a) 實部部分

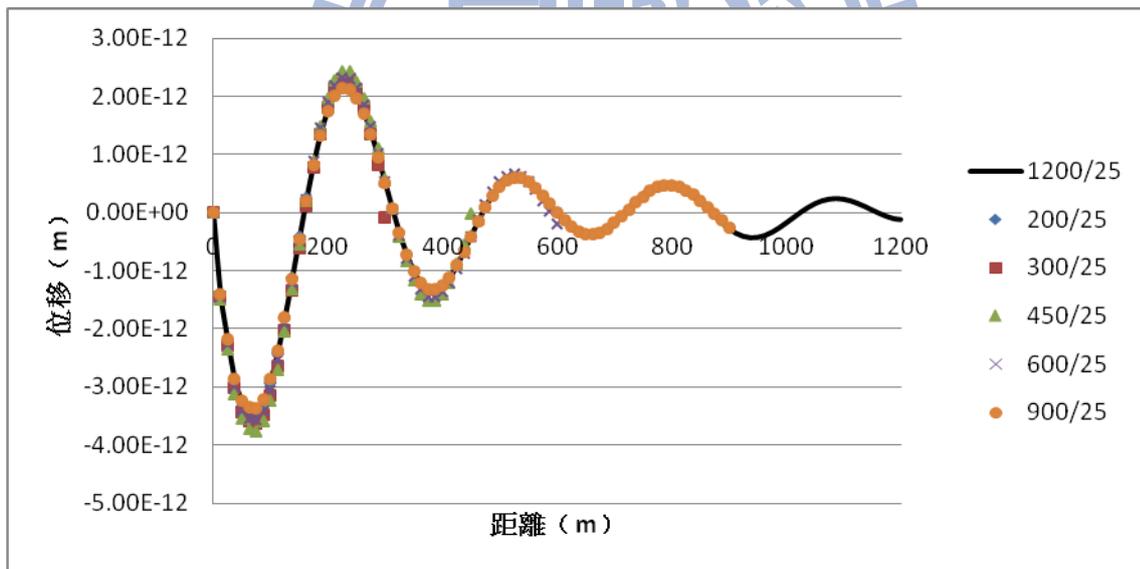


(b) 虛部部分

Fig. 3.9 模型一之網域範圍收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

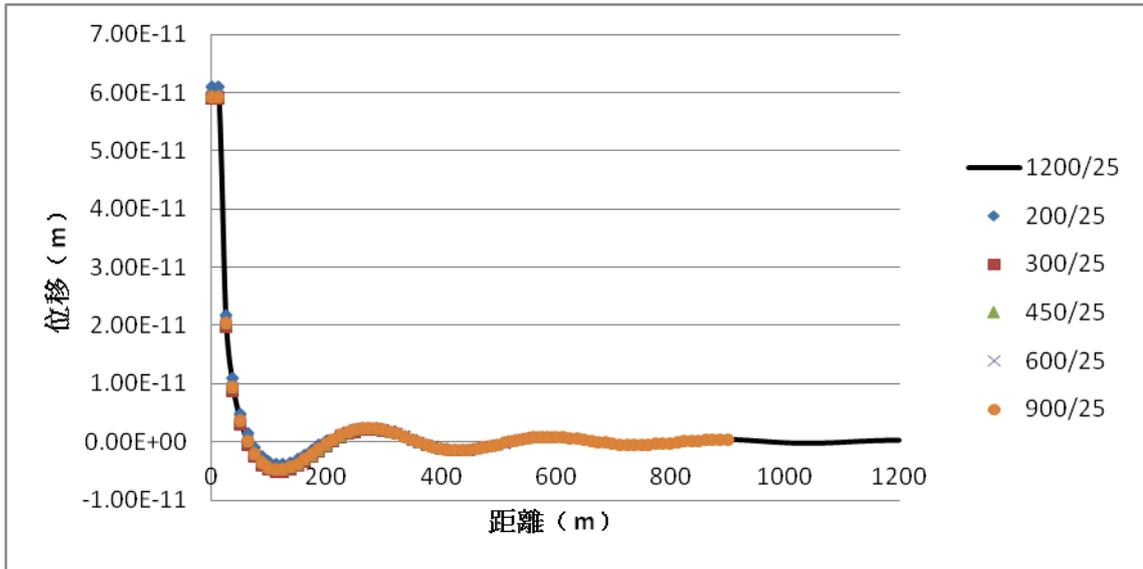


(a) 實部部分

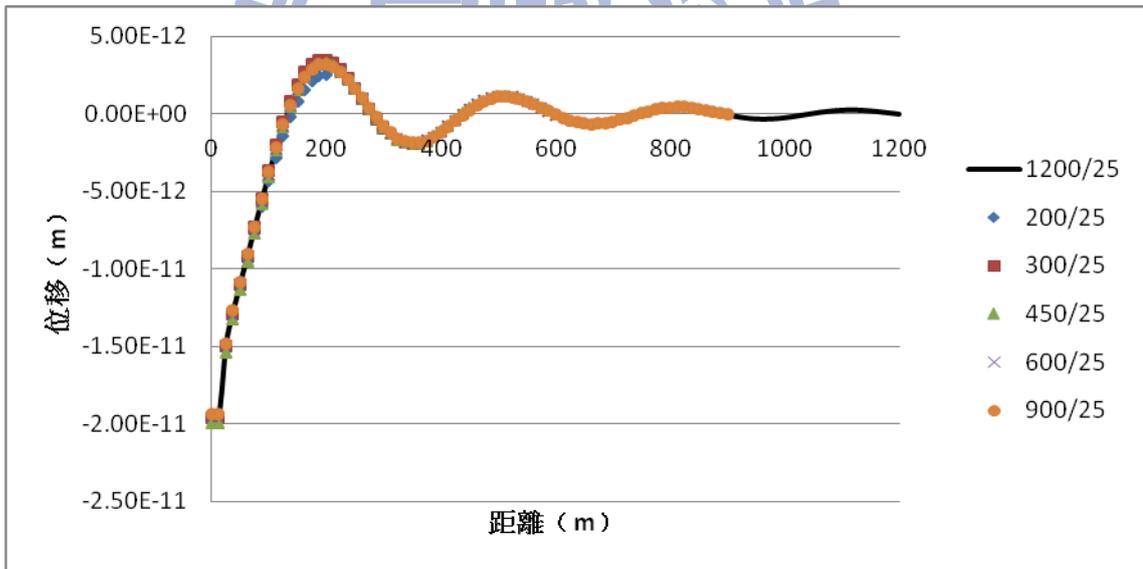


(b) 虛部部分

Fig. 3.10 模型一之網域範圍收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

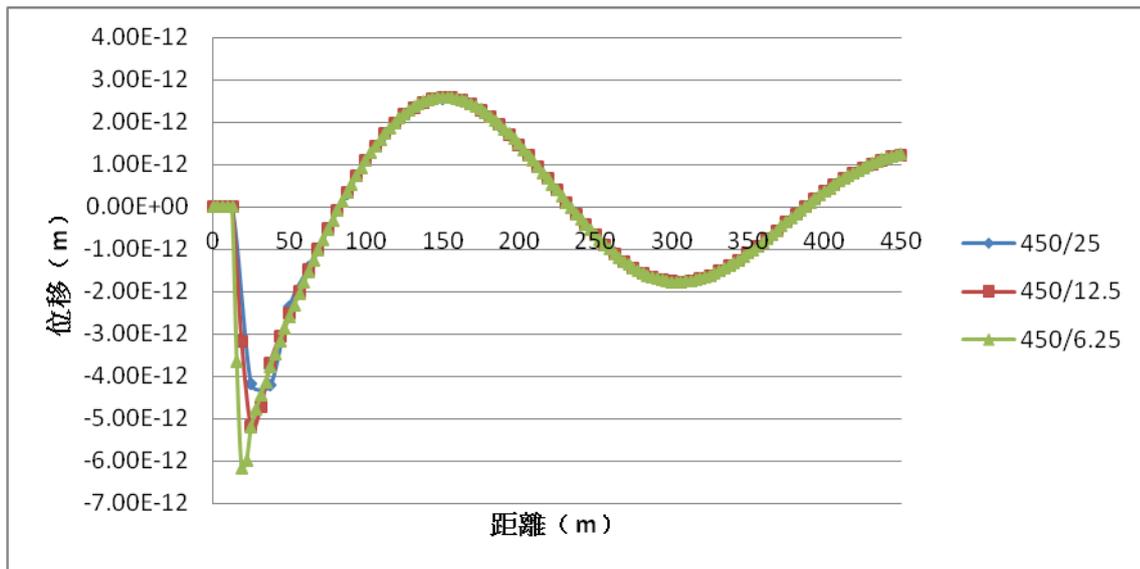


(a) 實部部分

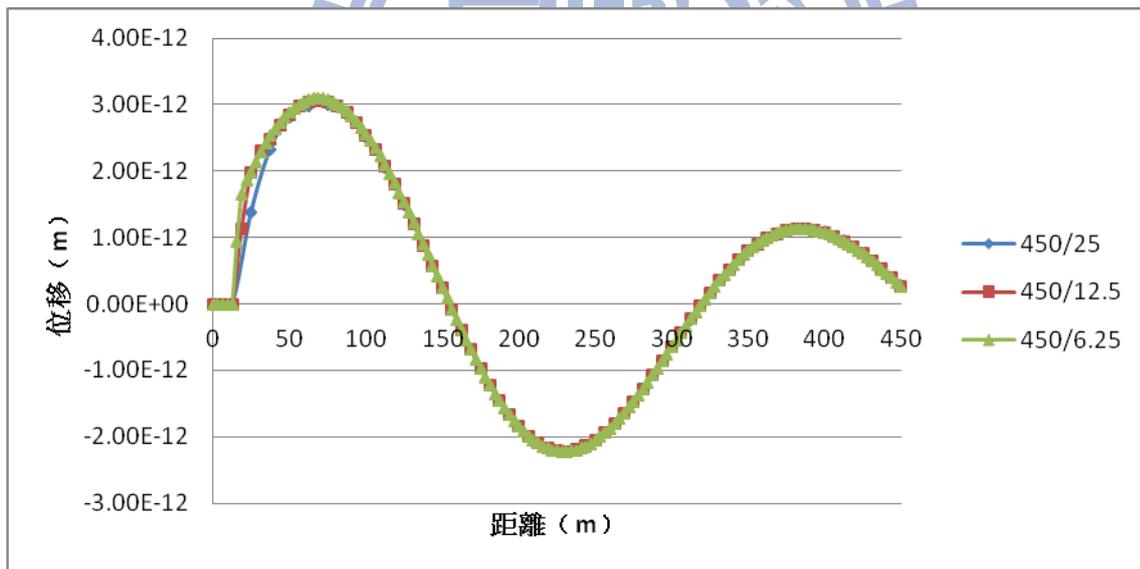


(b) 虛部部分

Fig. 3.11 模型一之網域範圍收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ)

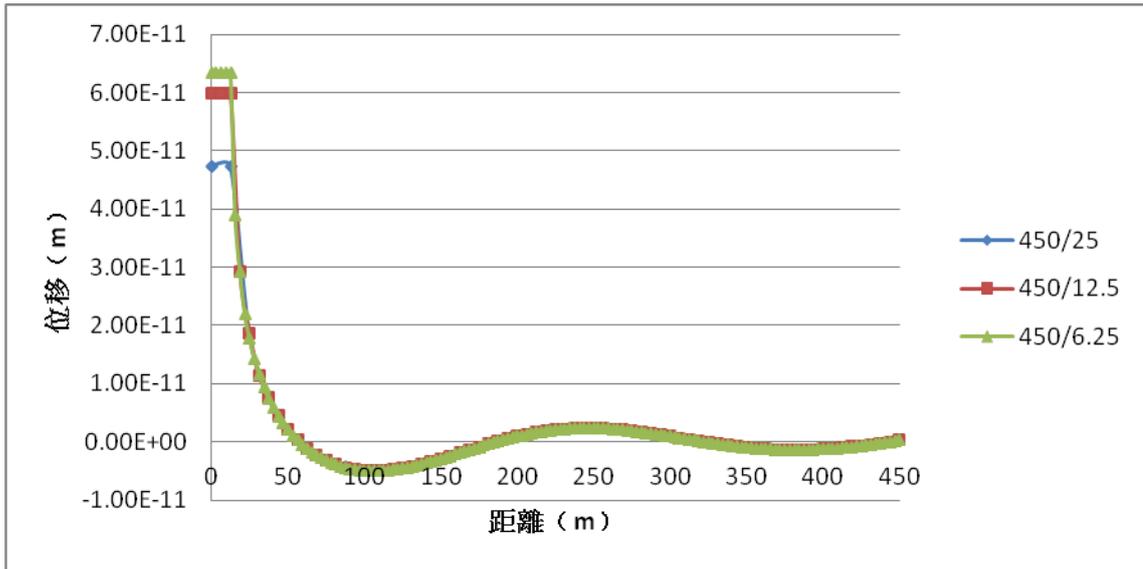


(a) 實部部分

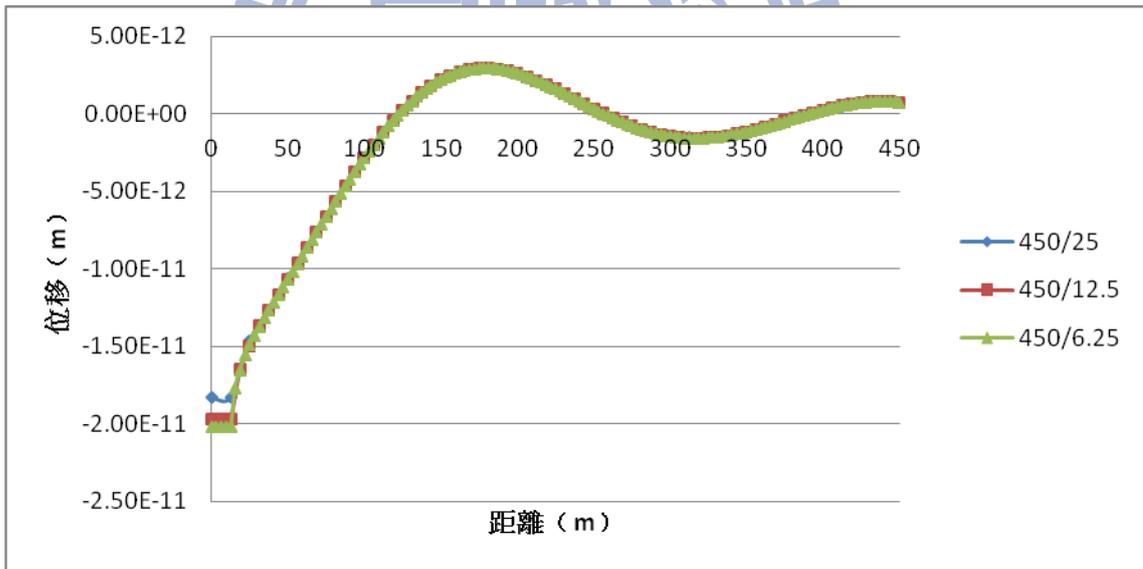


(b) 虛部部分

Fig. 3.12 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

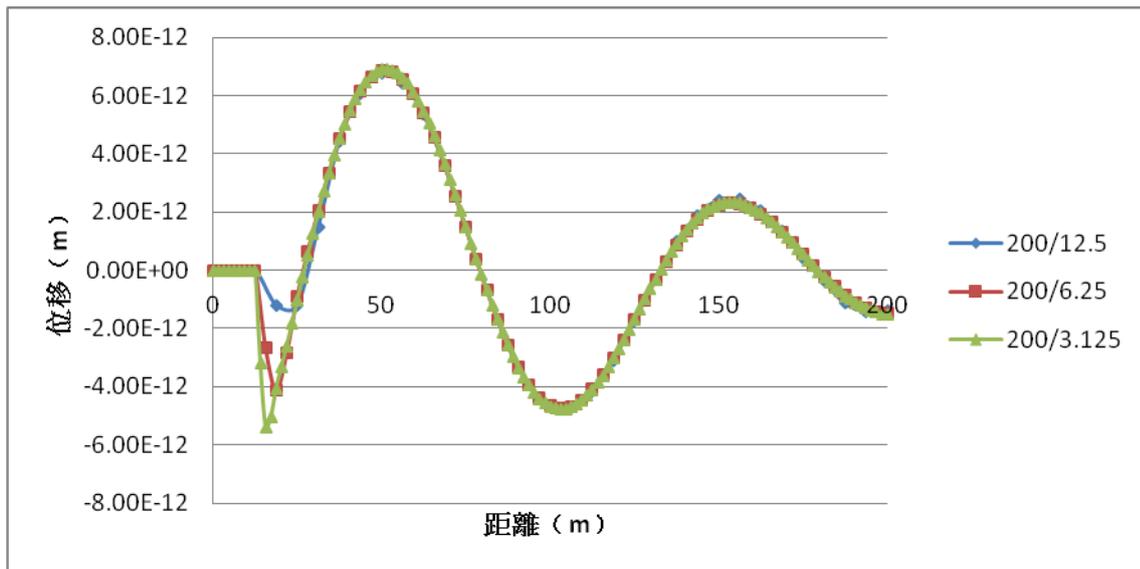


(a) 實部部分

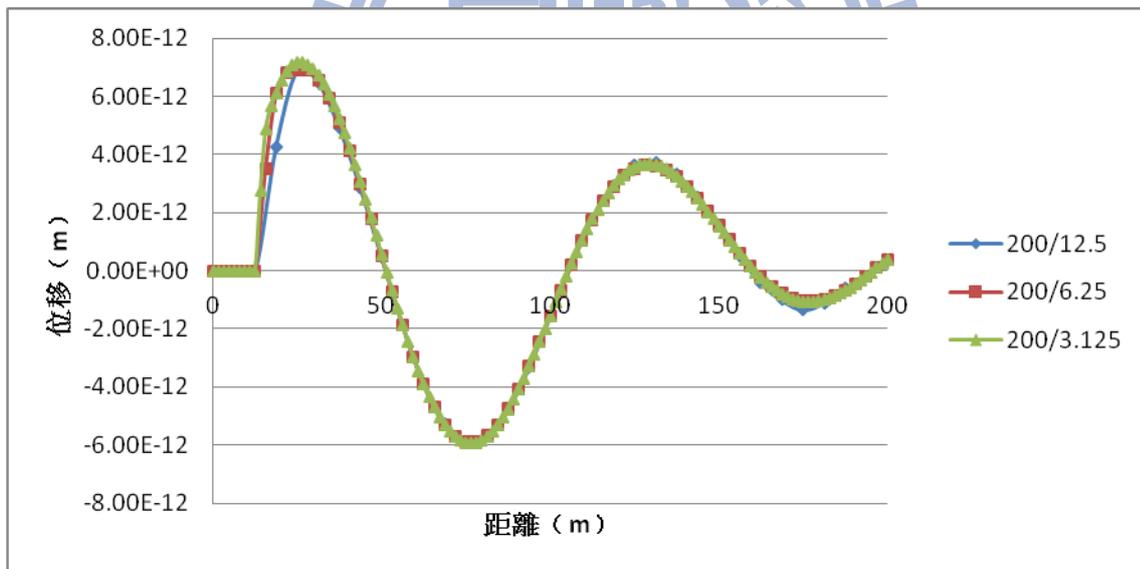


(b) 虛部部分

Fig. 3.13 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

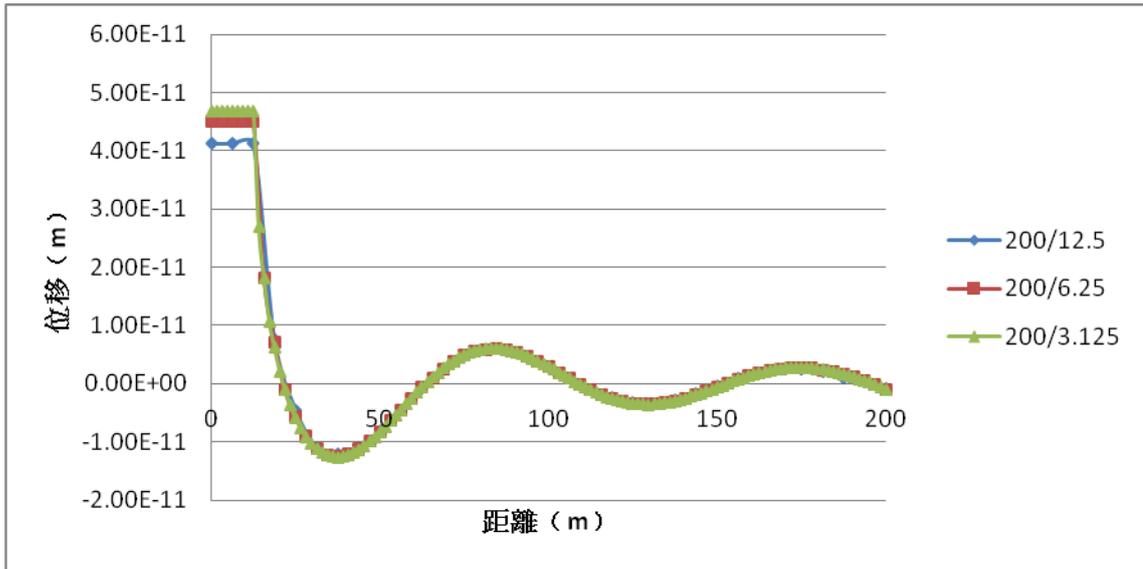


(a) 實部部分

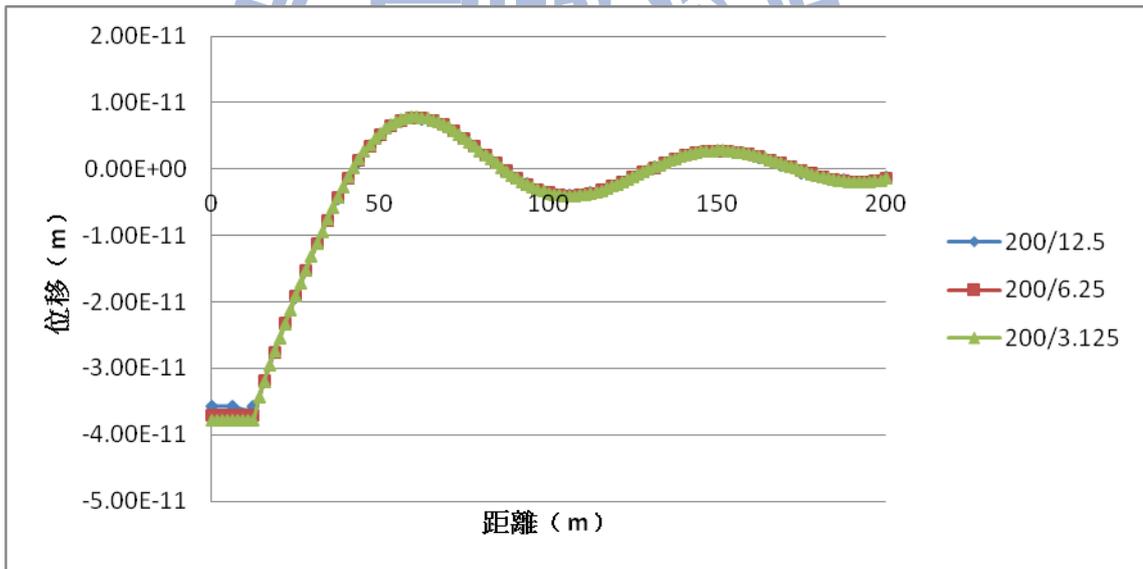


(b) 虛部部分

Fig. 3.14 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.15 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

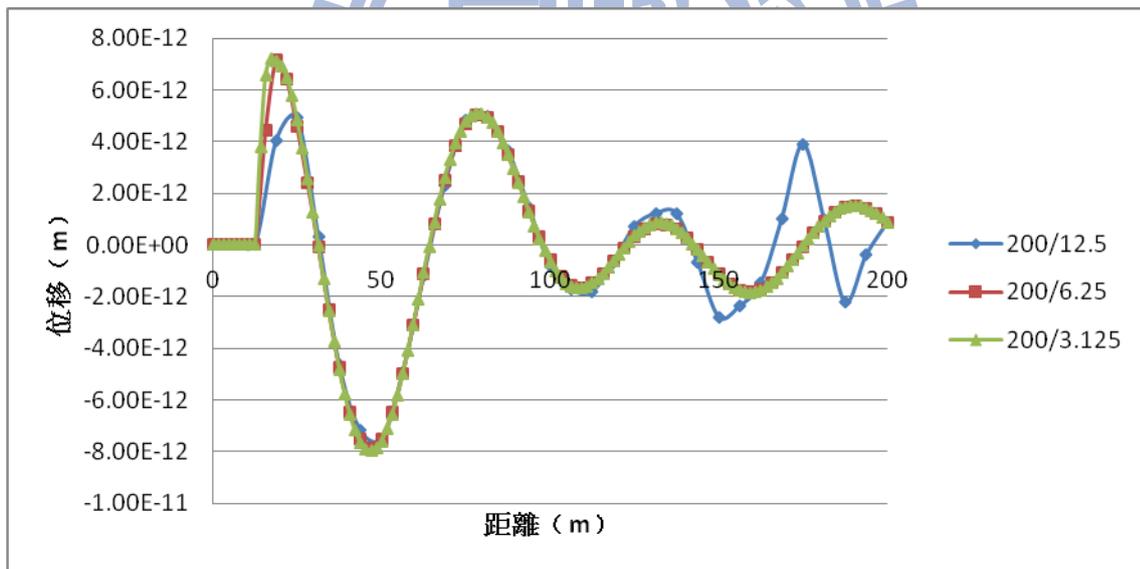
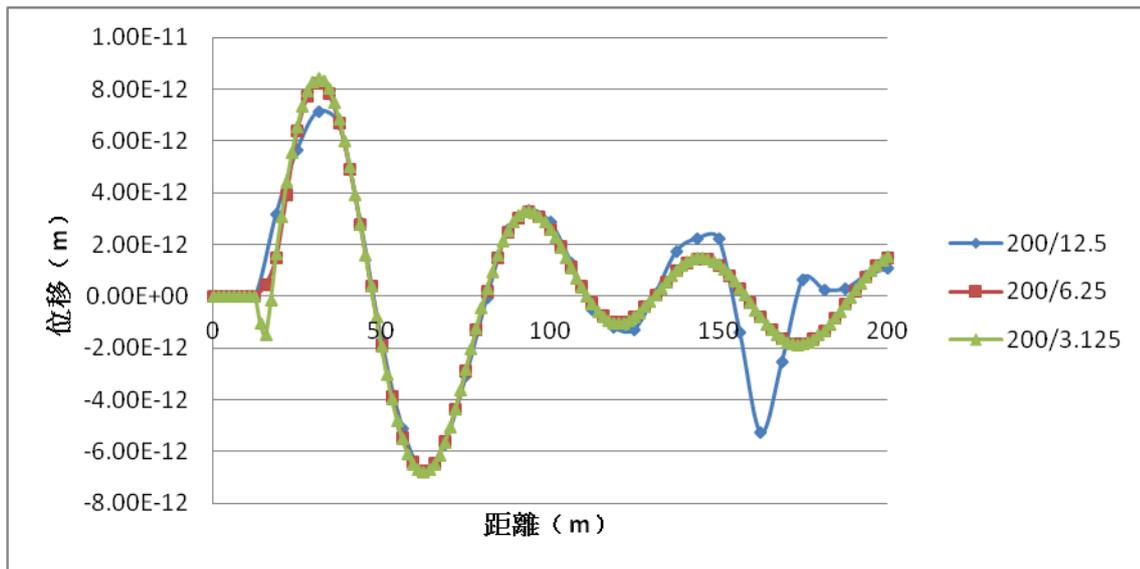
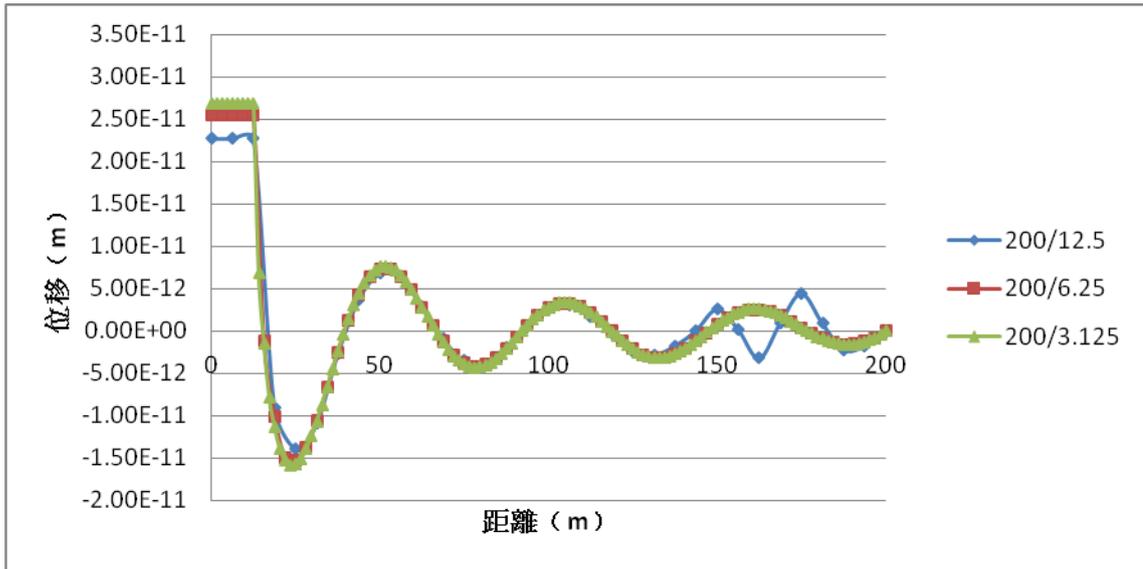
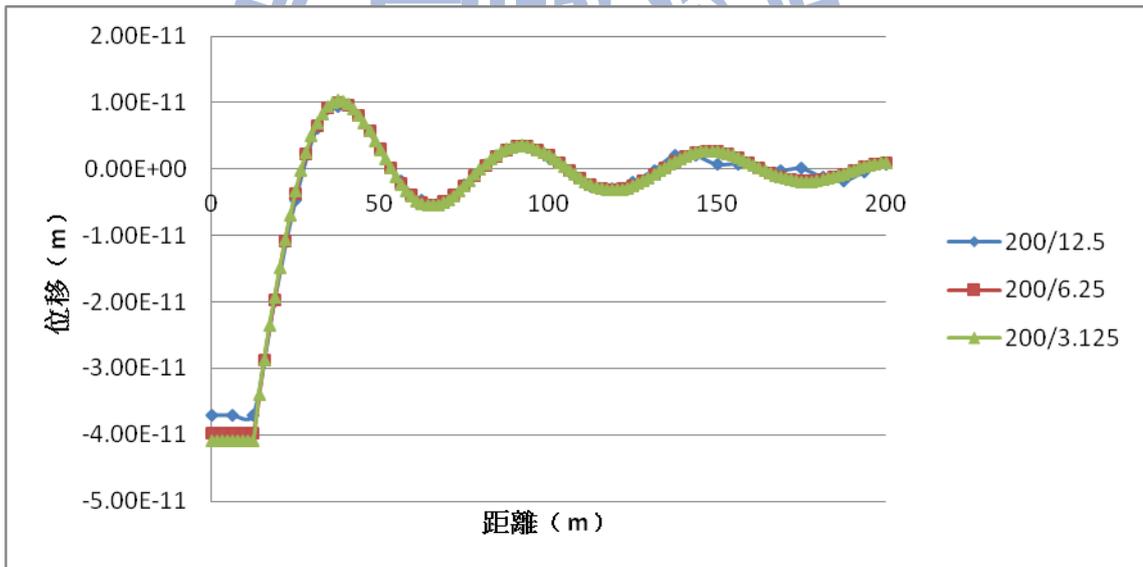


Fig. 3.16 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

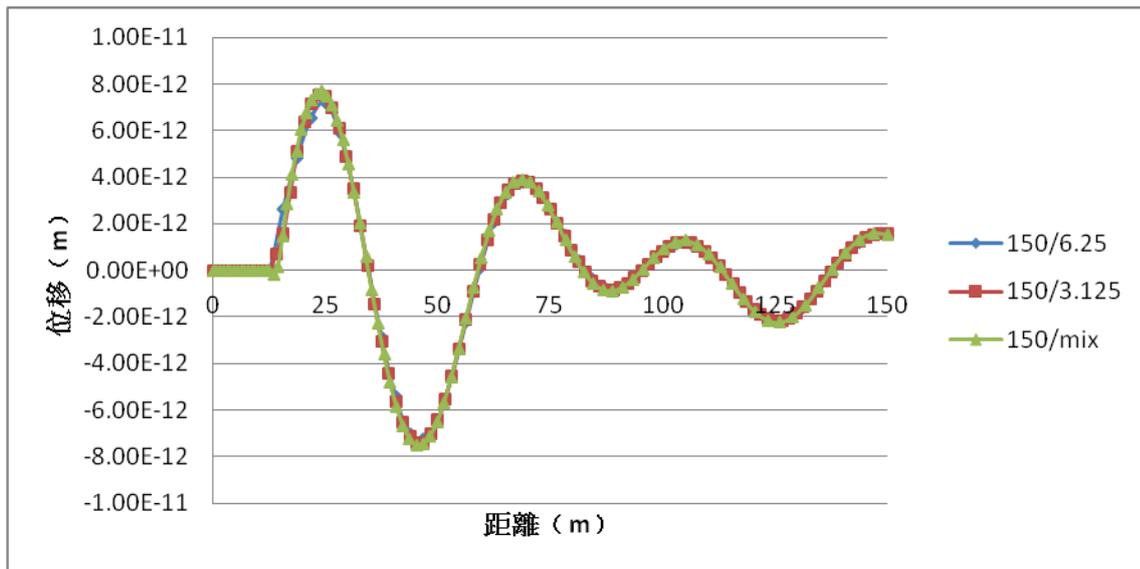


(a) 實部部分

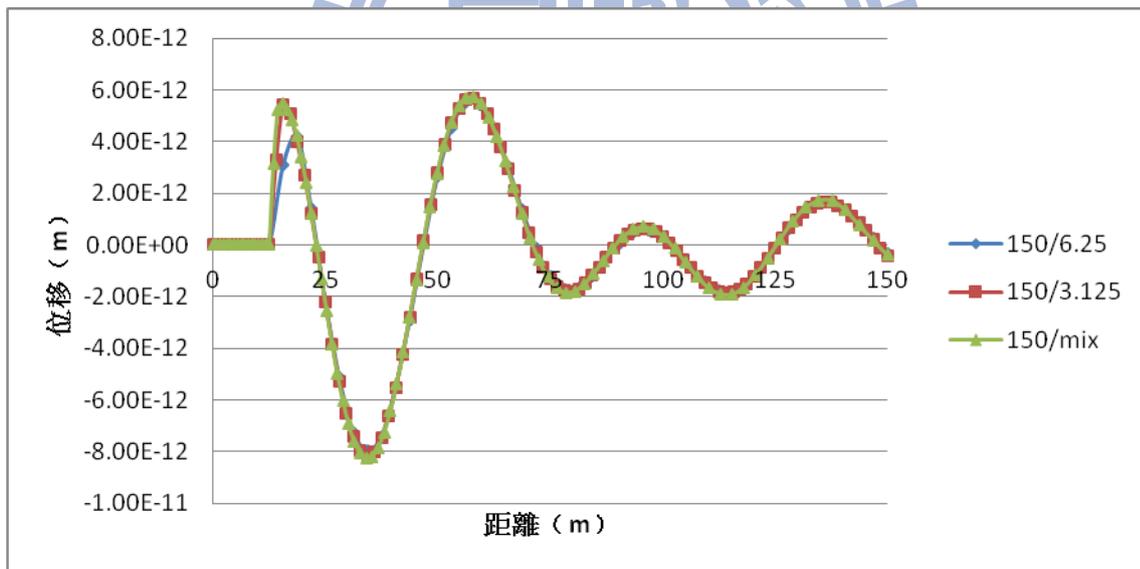


(b) 虛部部分

Fig. 3.17 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.18 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

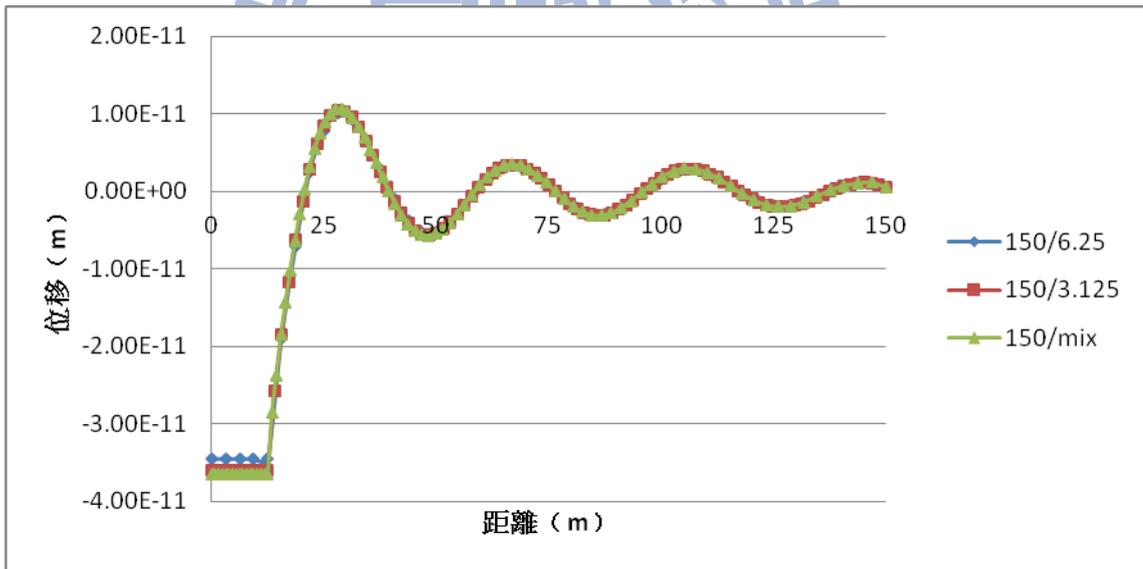
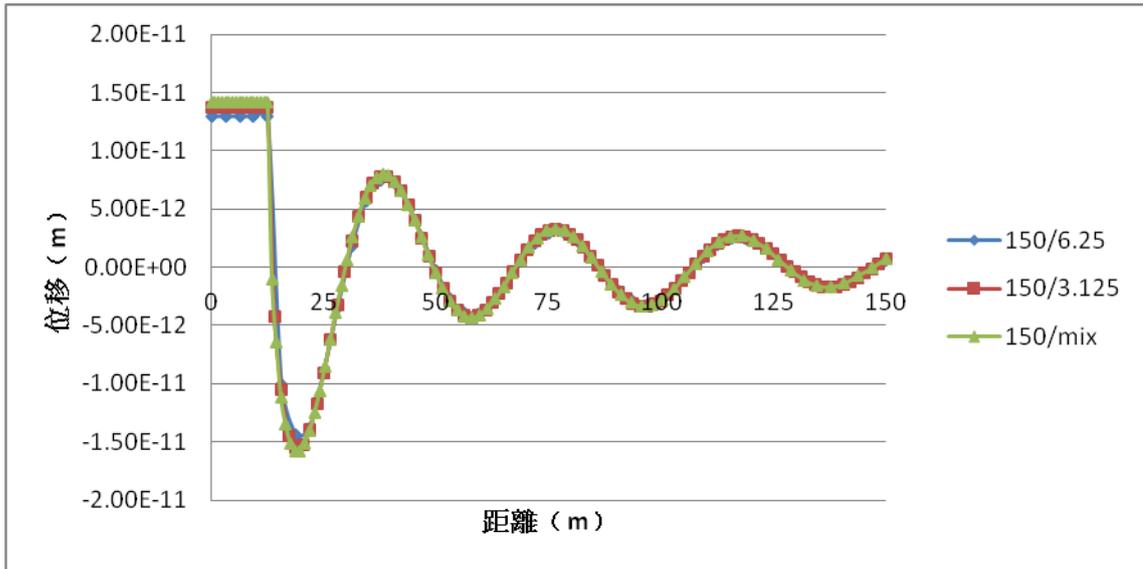
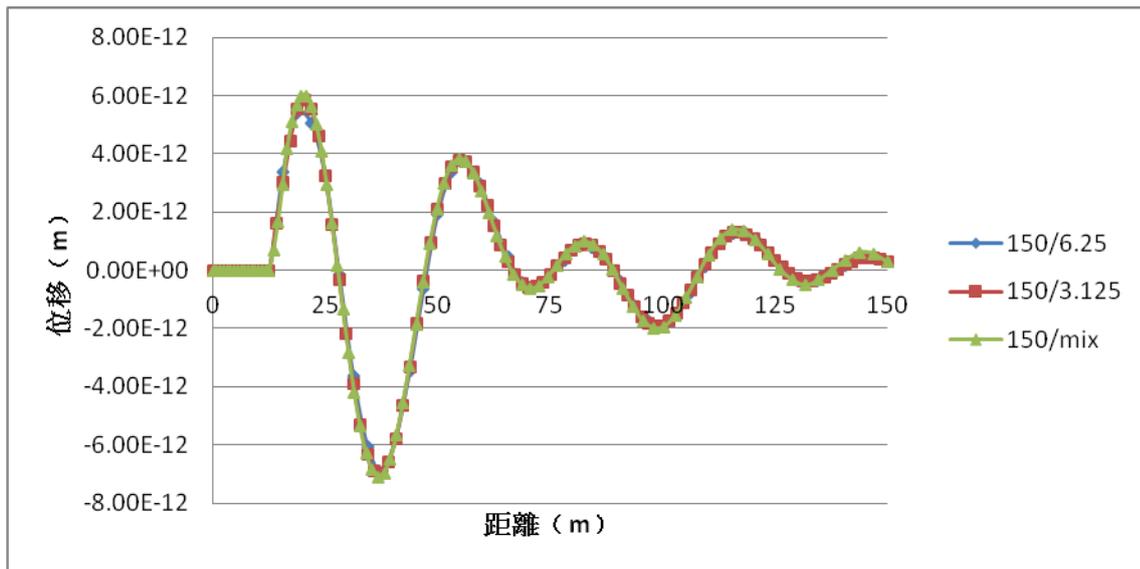
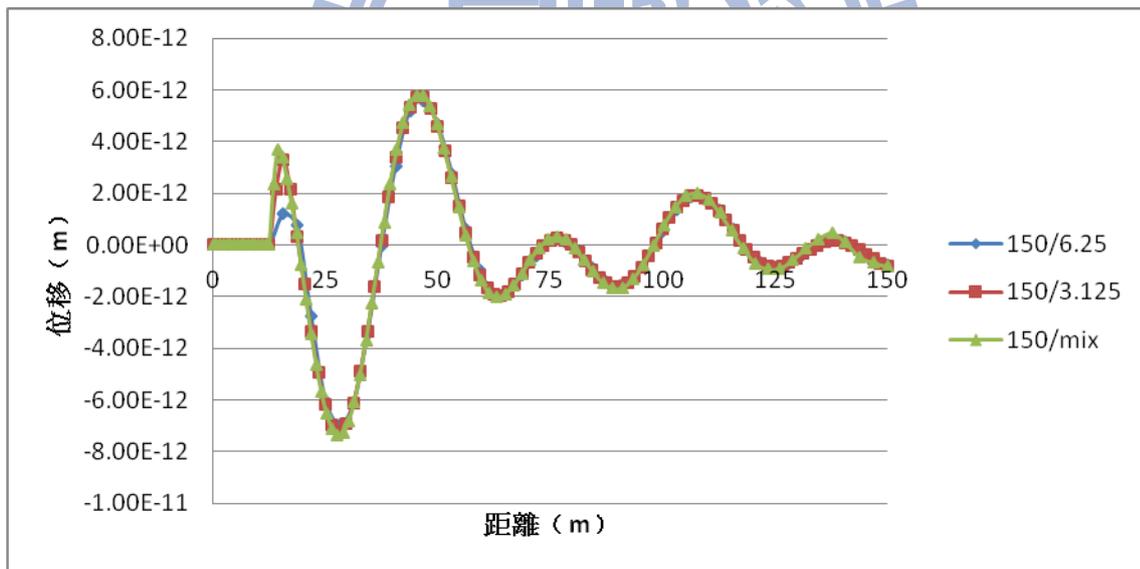


Fig. 3.19 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

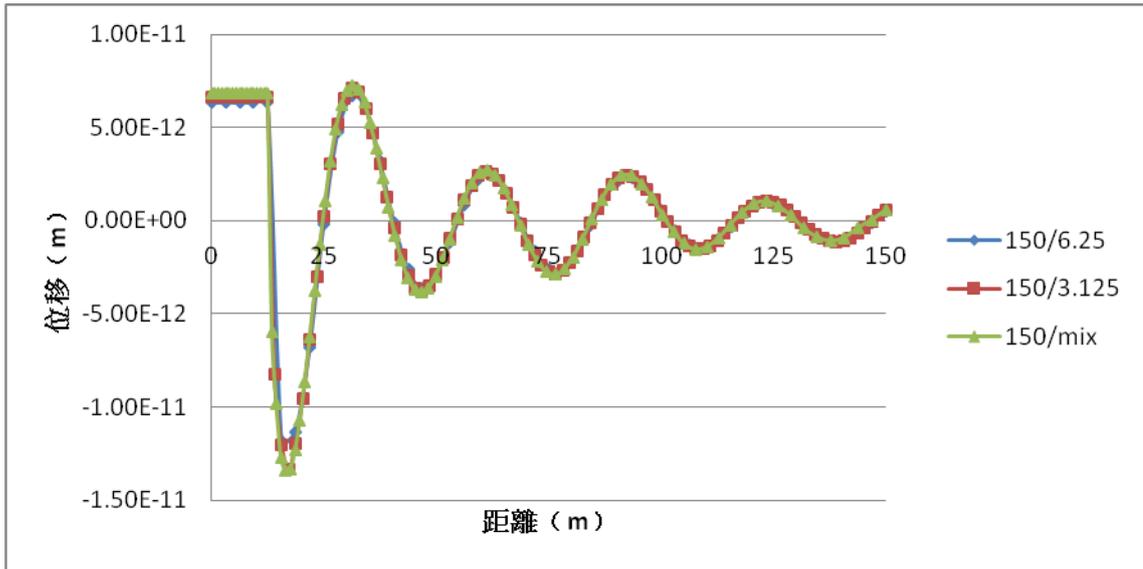


(a) 實部部分

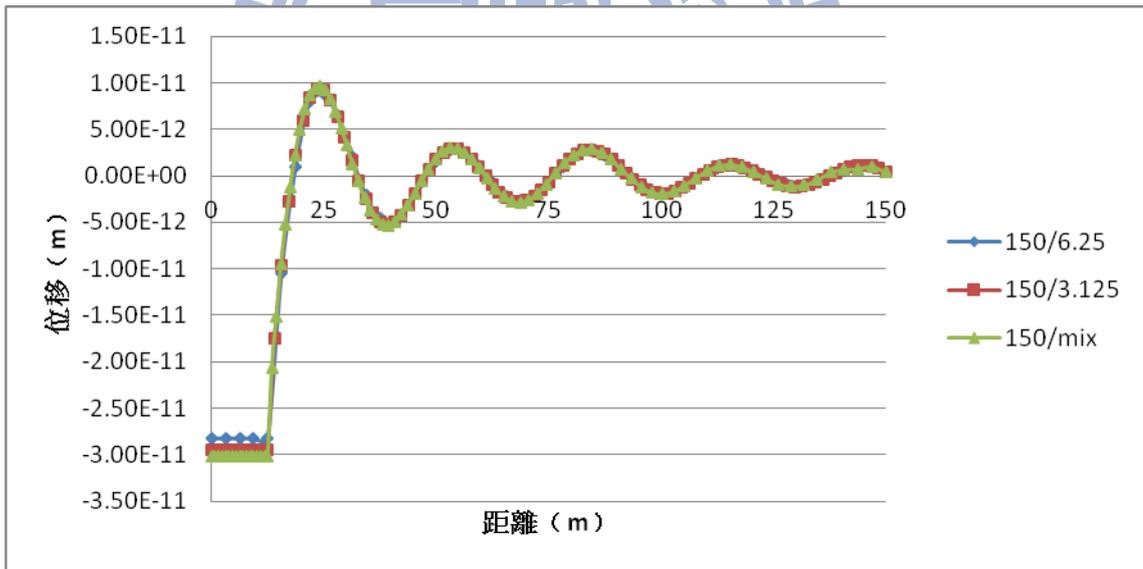


(b) 虛部部分

Fig. 3.20 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

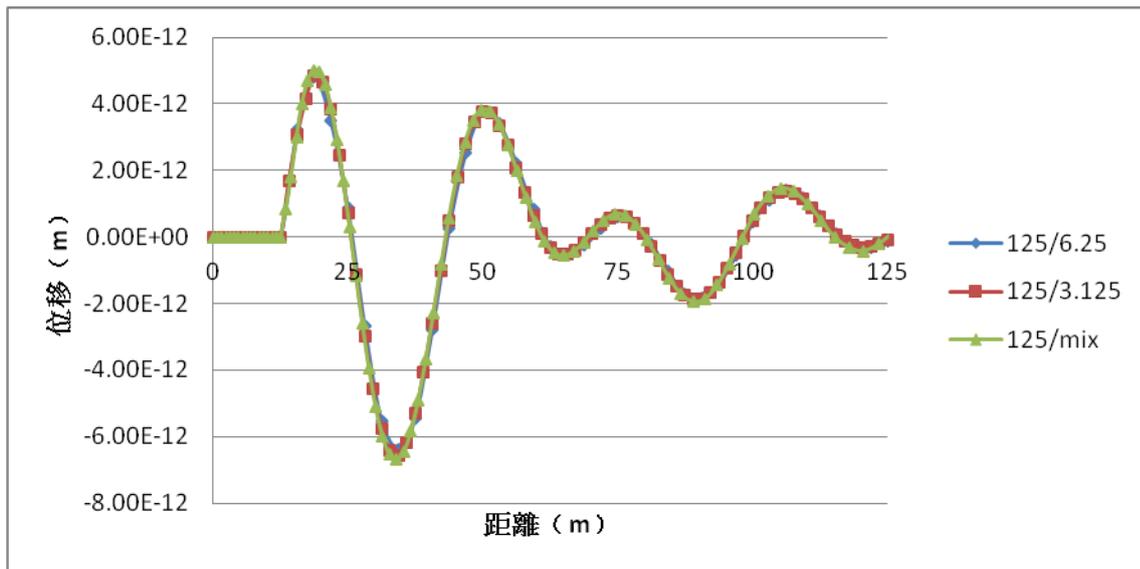


(a) 實部部分

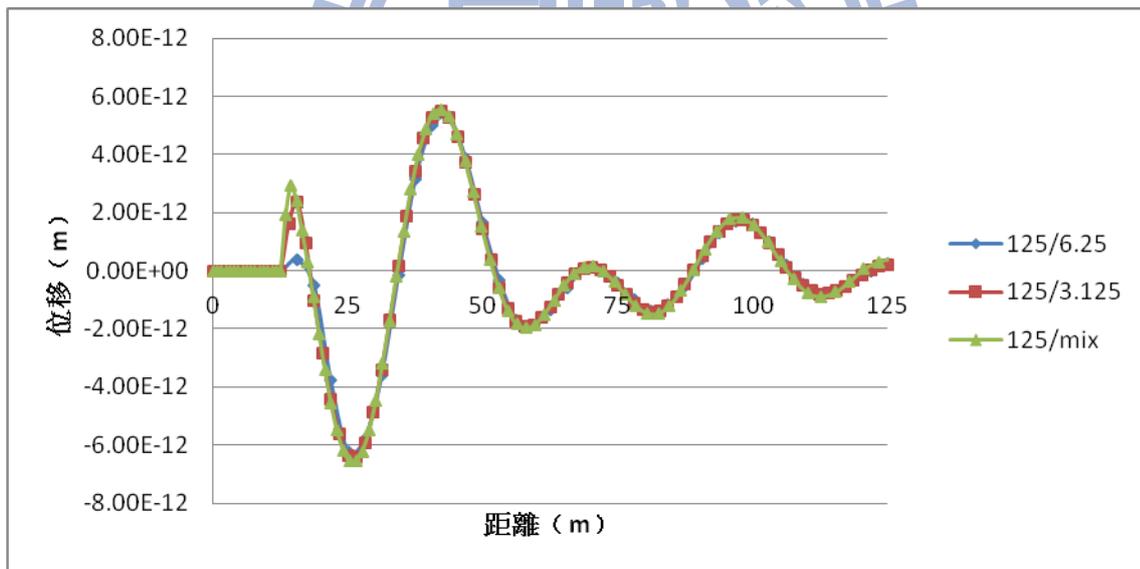


(b) 虛部部分

Fig. 3.21 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

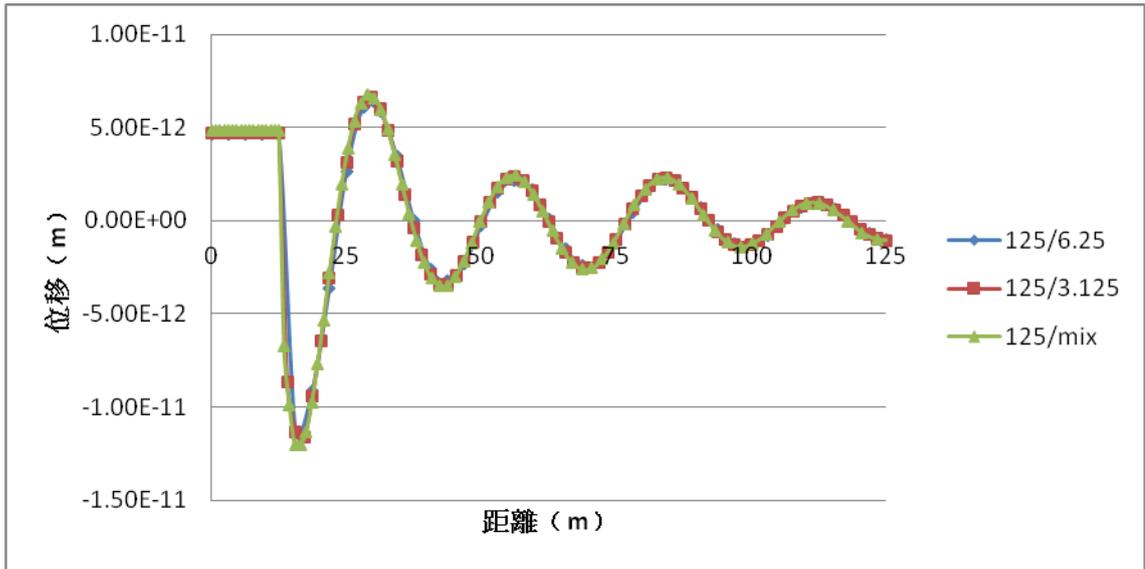


(a) 實部部分

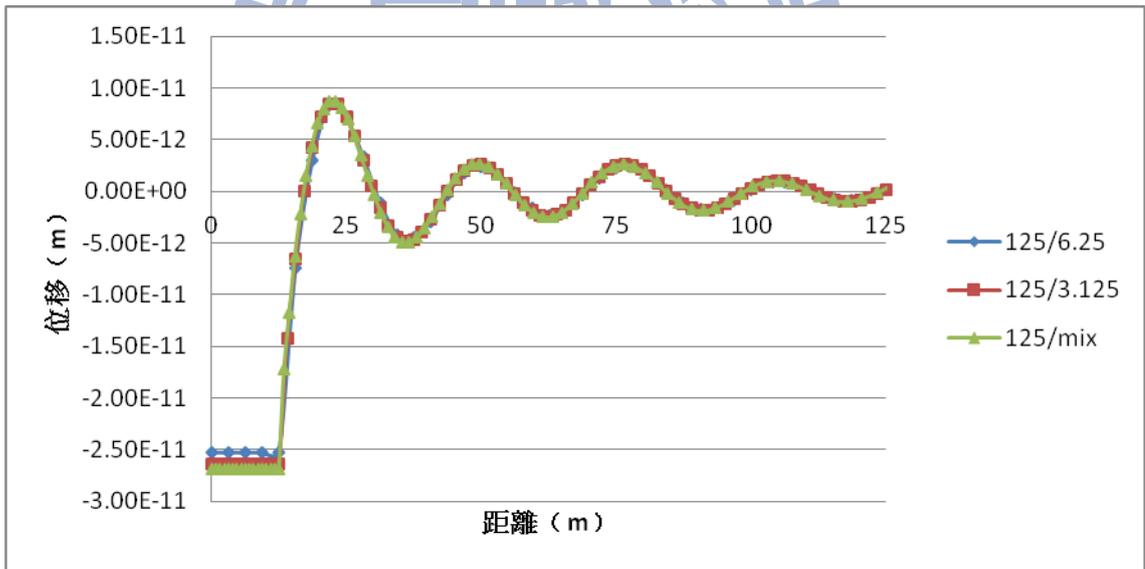


(b) 虛部部分

Fig. 3.22 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.23 模型一之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

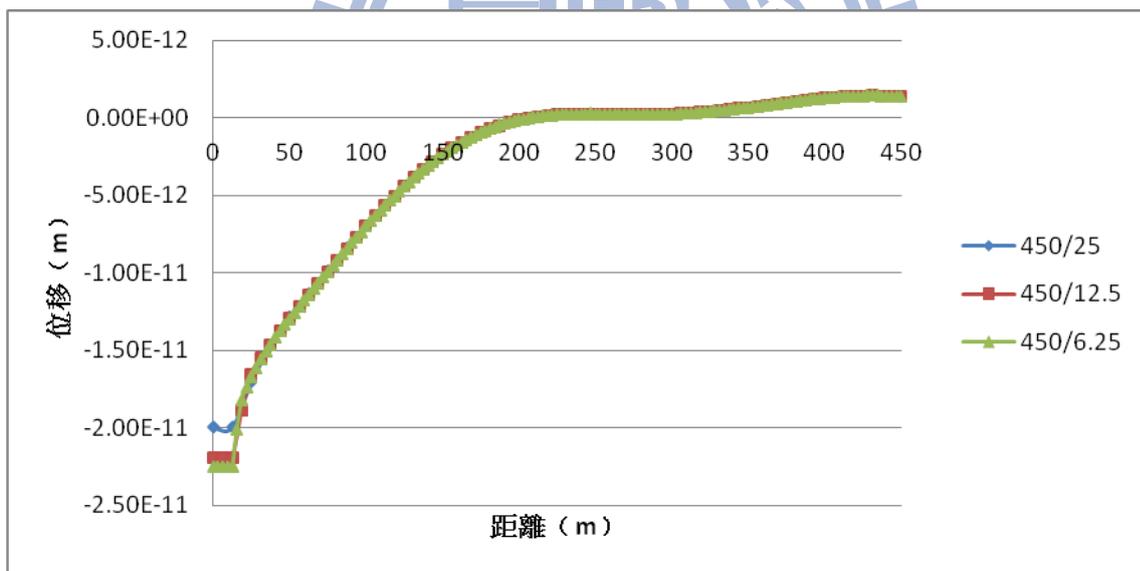
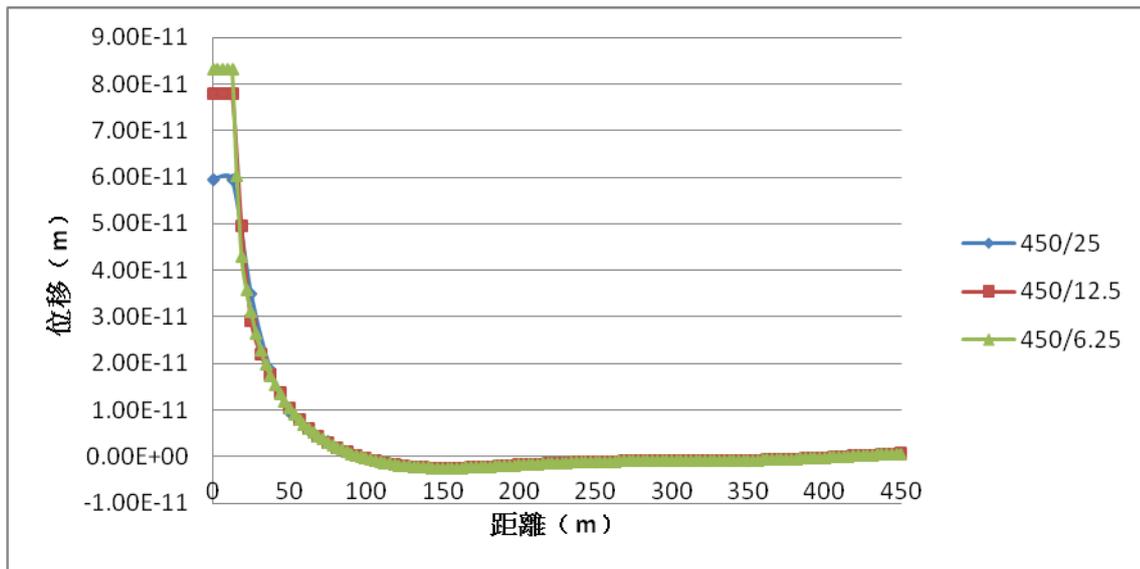
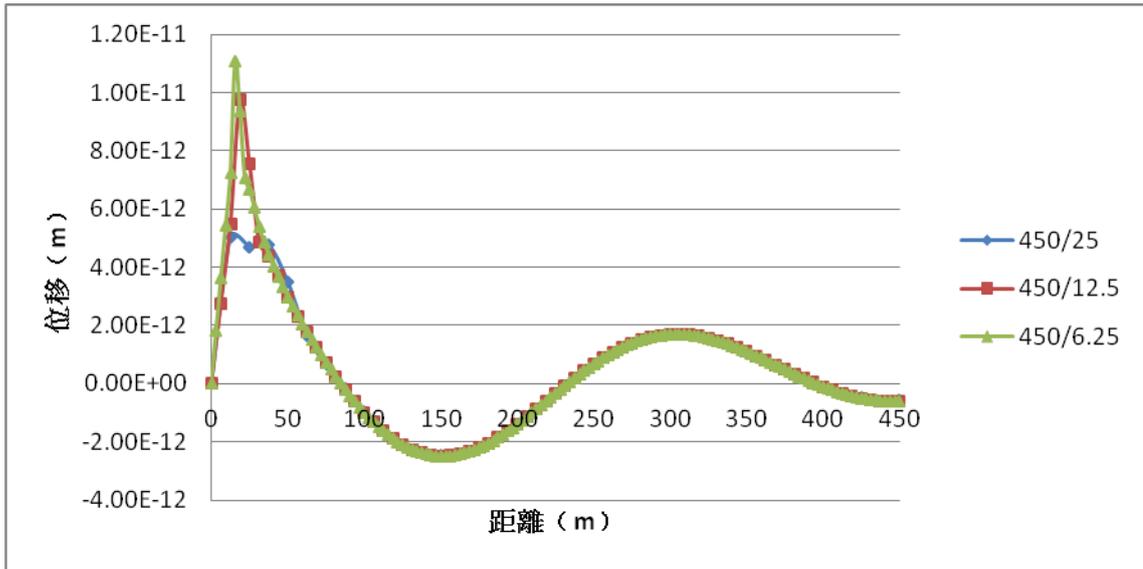
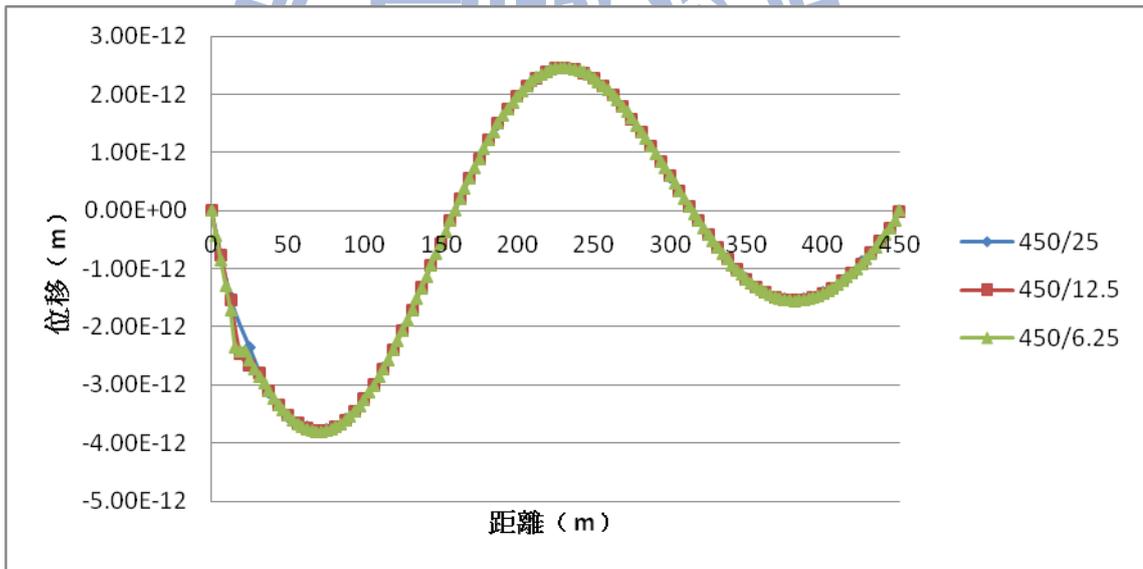


Fig. 3.24 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

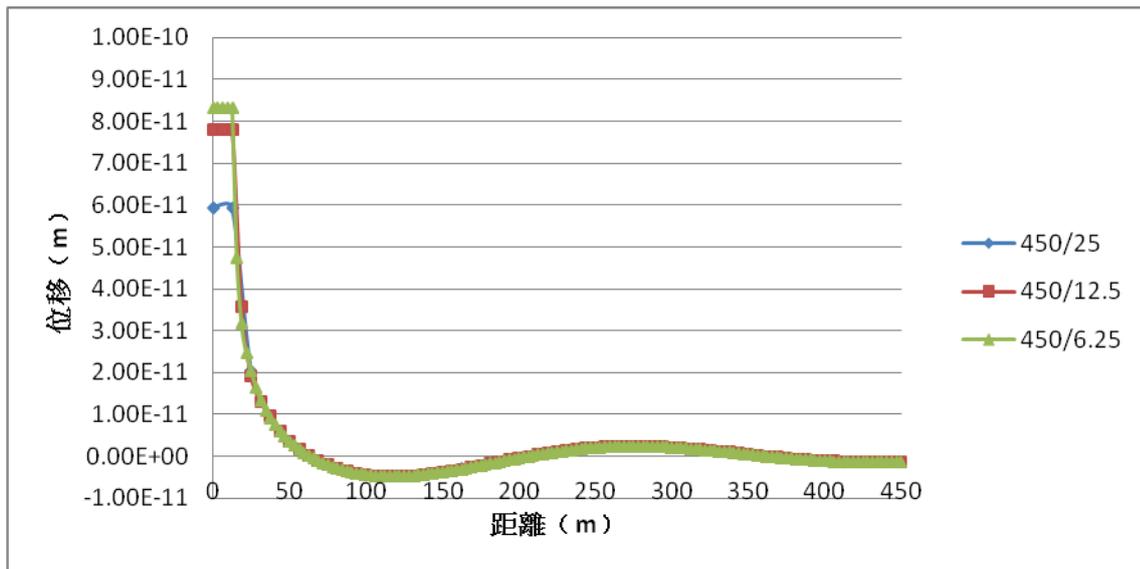


(a) 實部部分

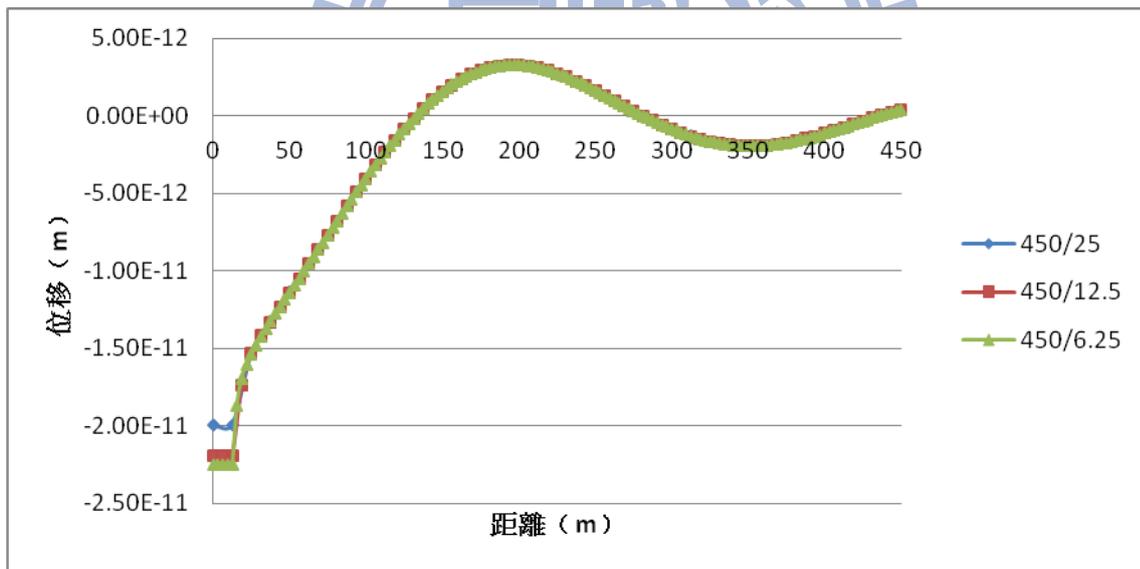


(b) 虛部部分

Fig. 3.25 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.26 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ)

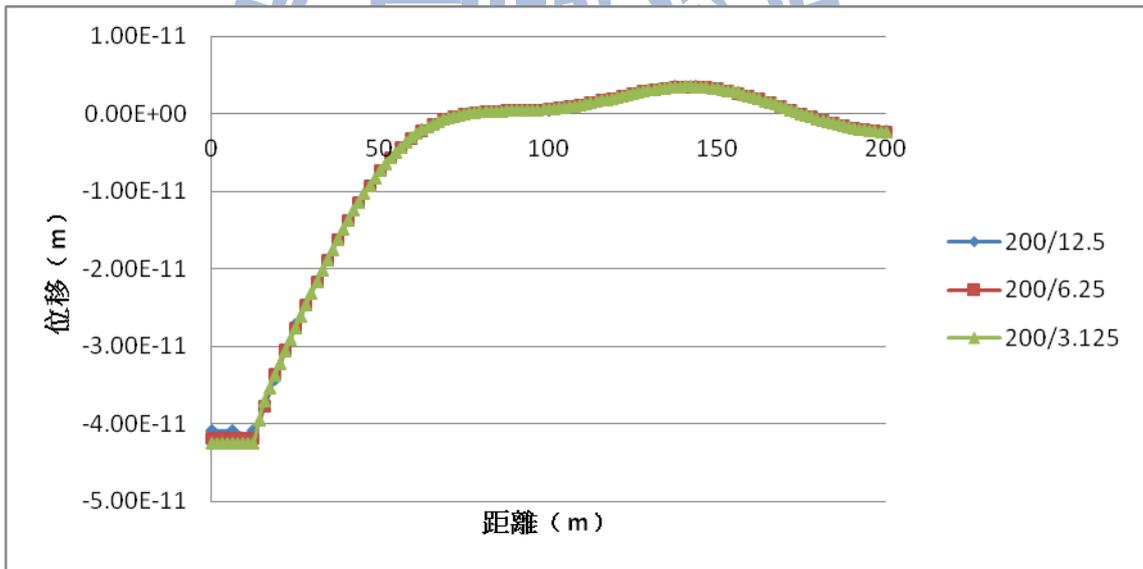
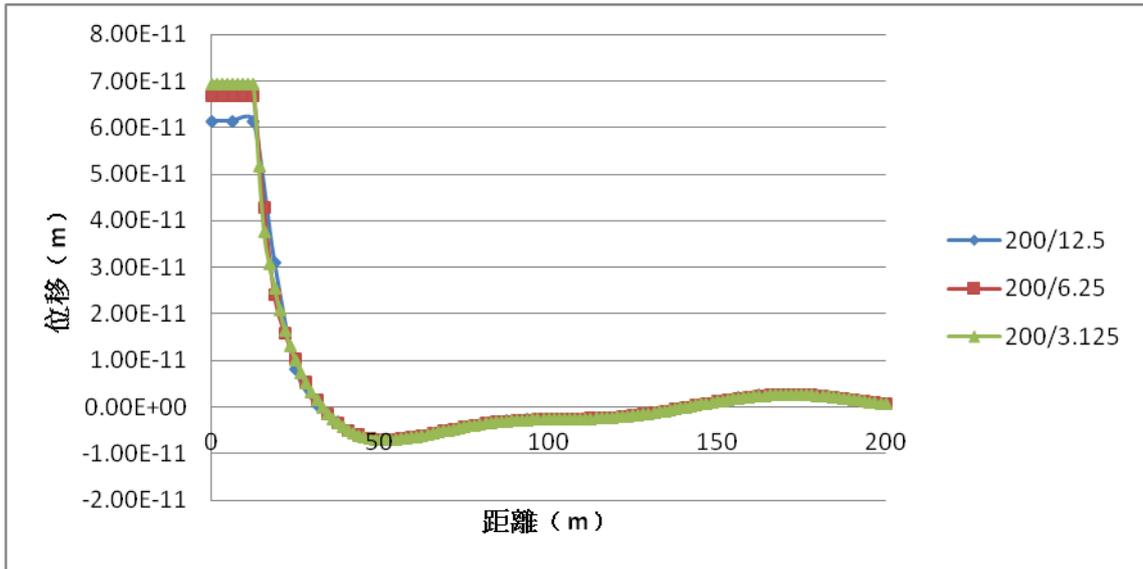
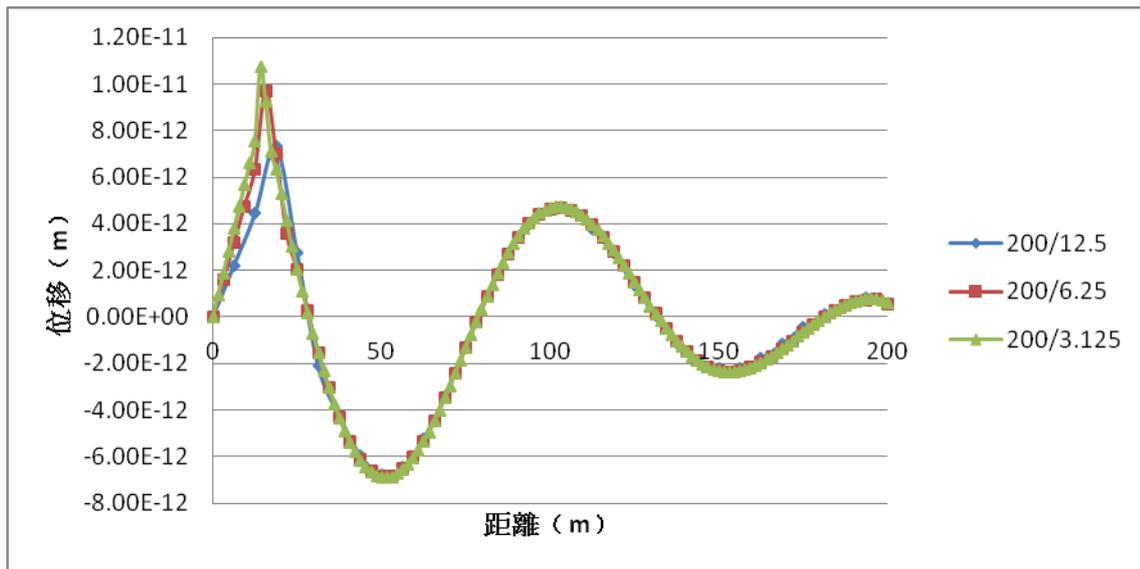
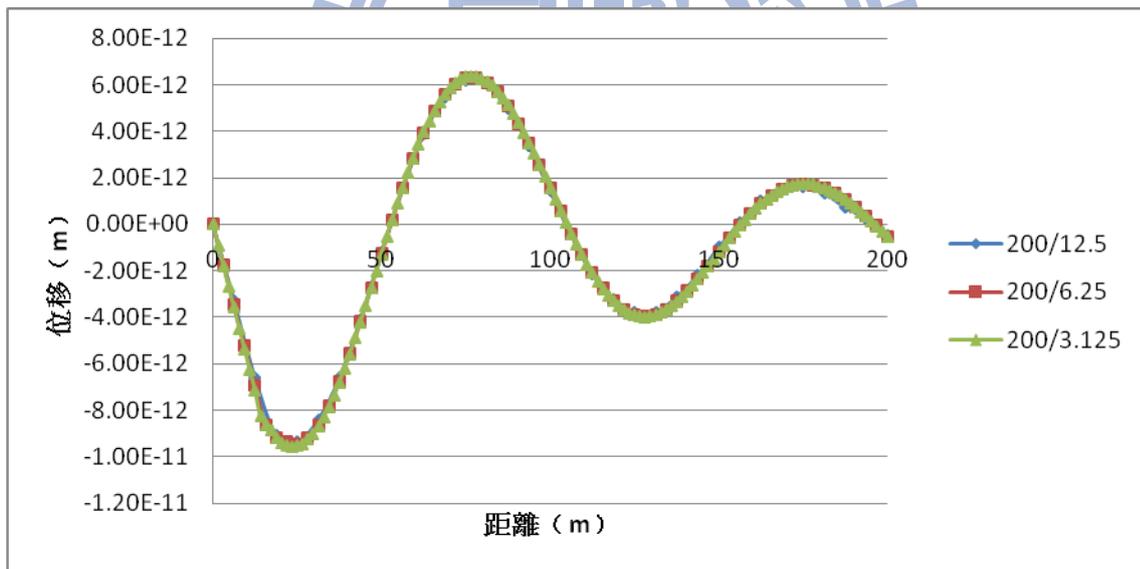


Fig. 3.27 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

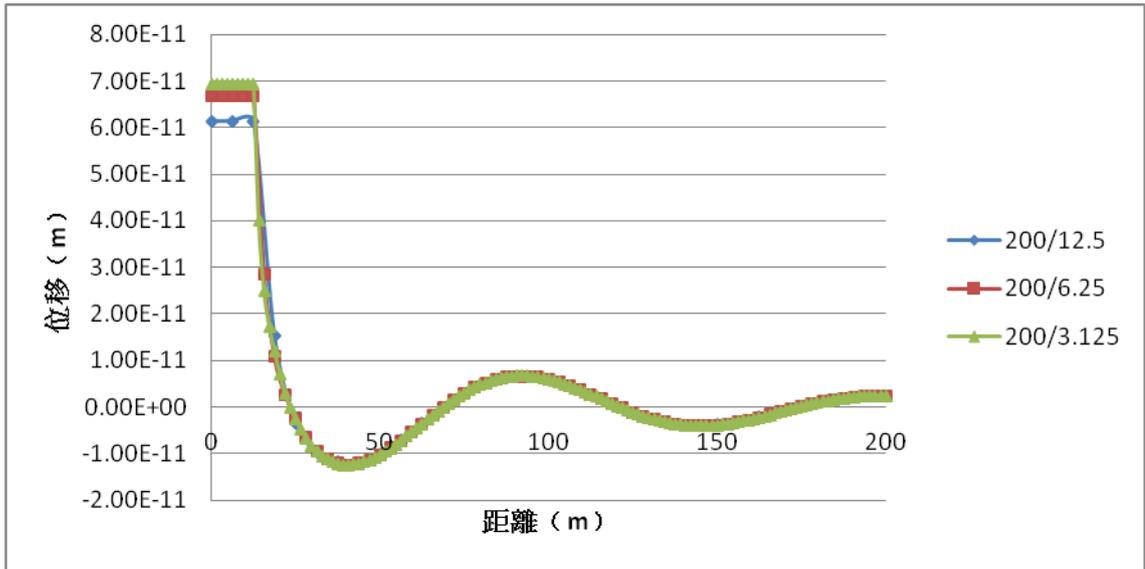


(a) 實部部分

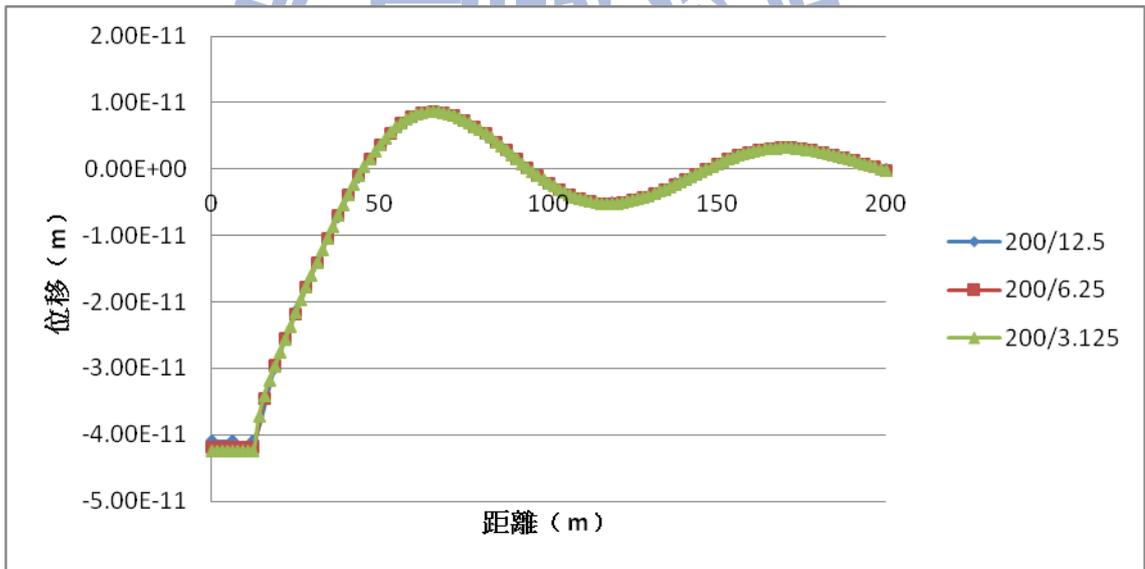


(b) 虛部部分

Fig. 3.28 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

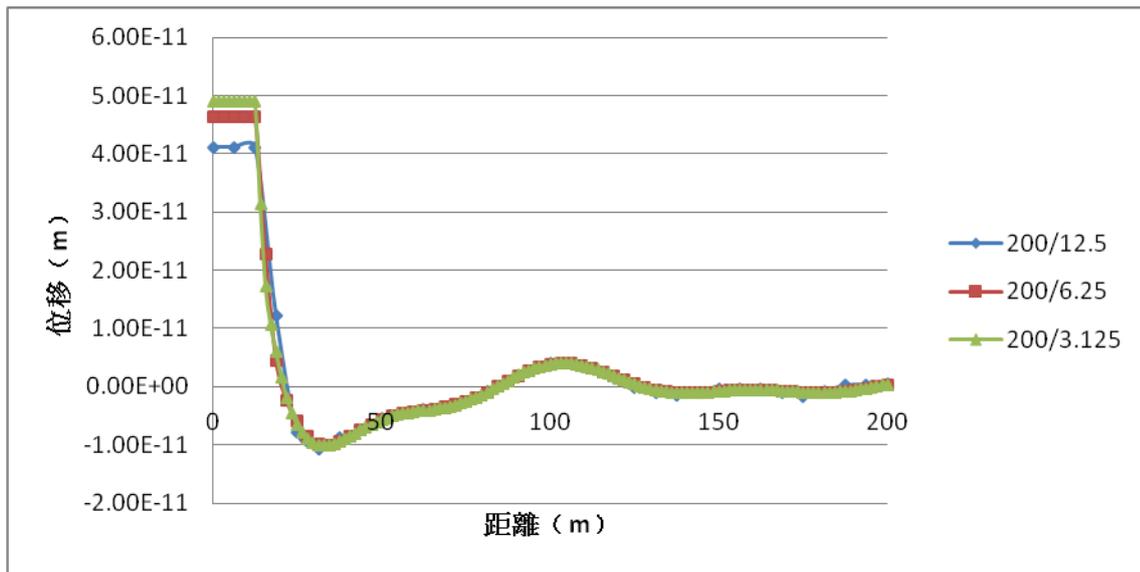


(a) 實部部分

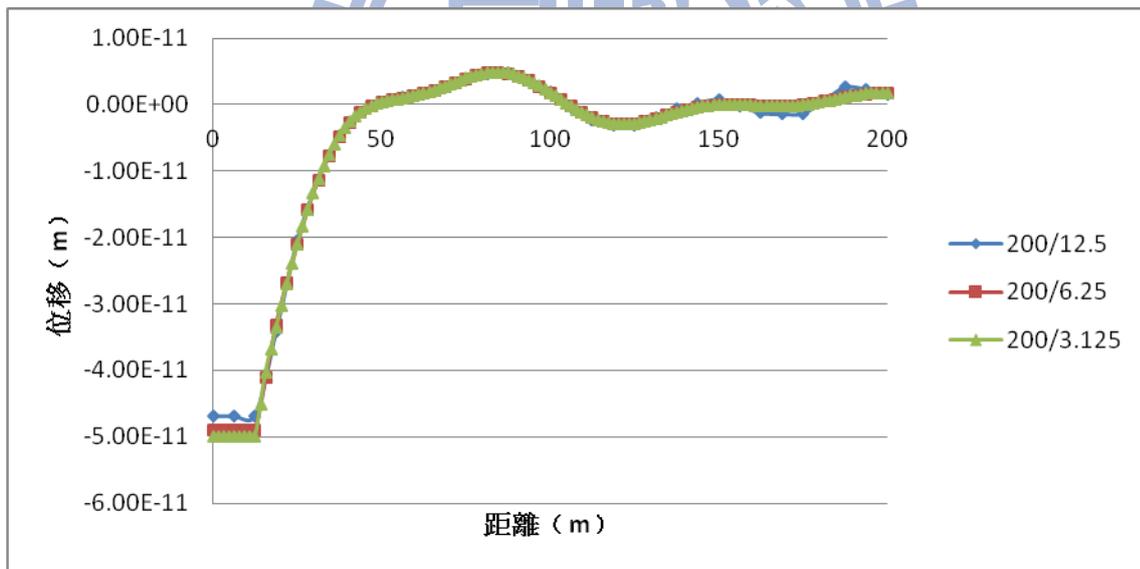


(b) 虛部部分

Fig. 3.29 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_θ)

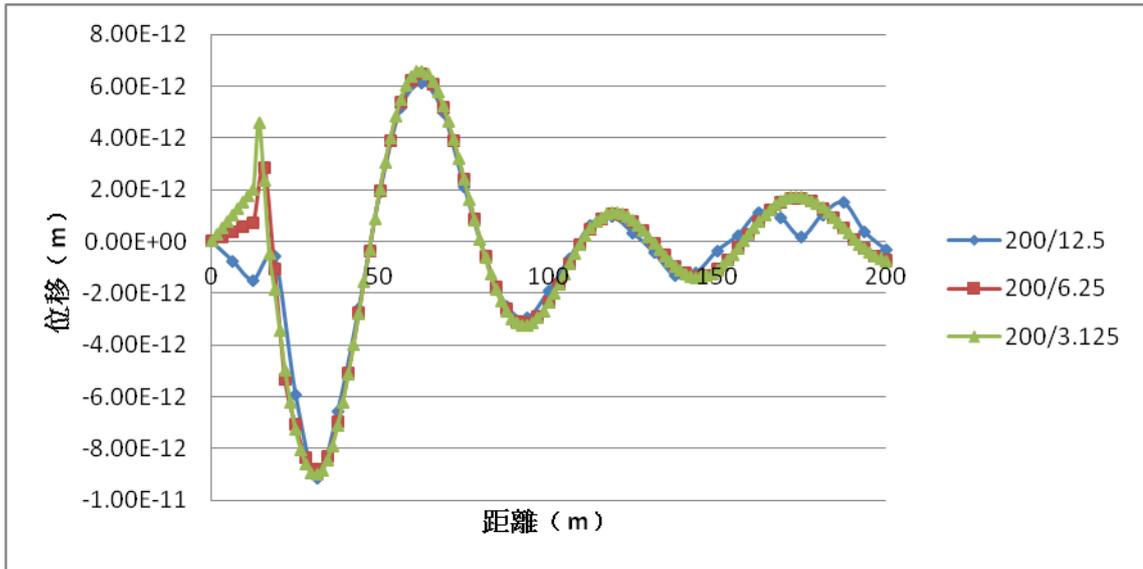


(a) 實部部分

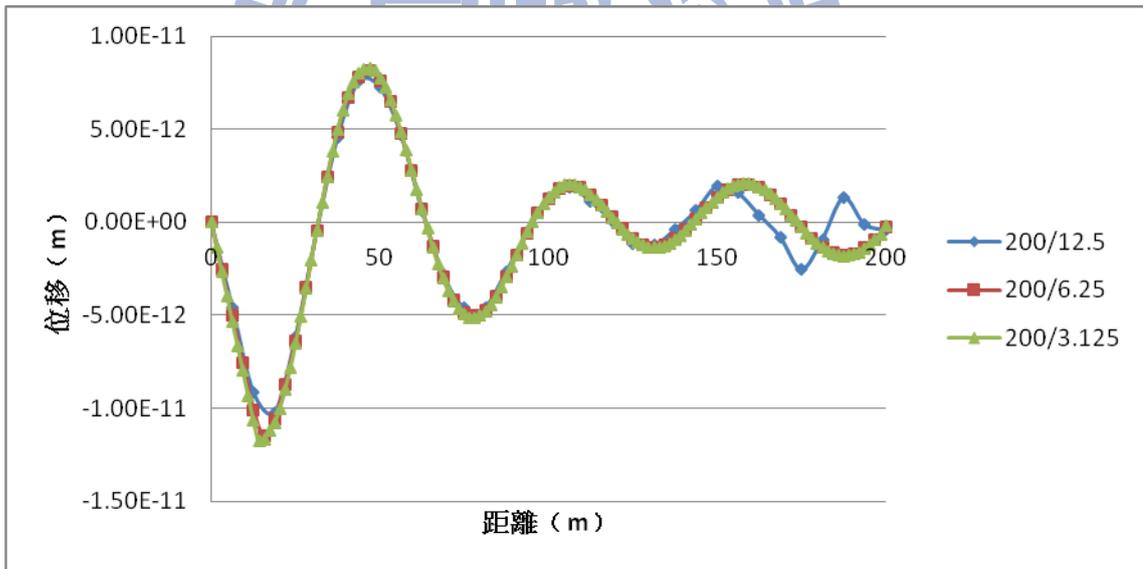


(b) 虛部部分

Fig. 3.30 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

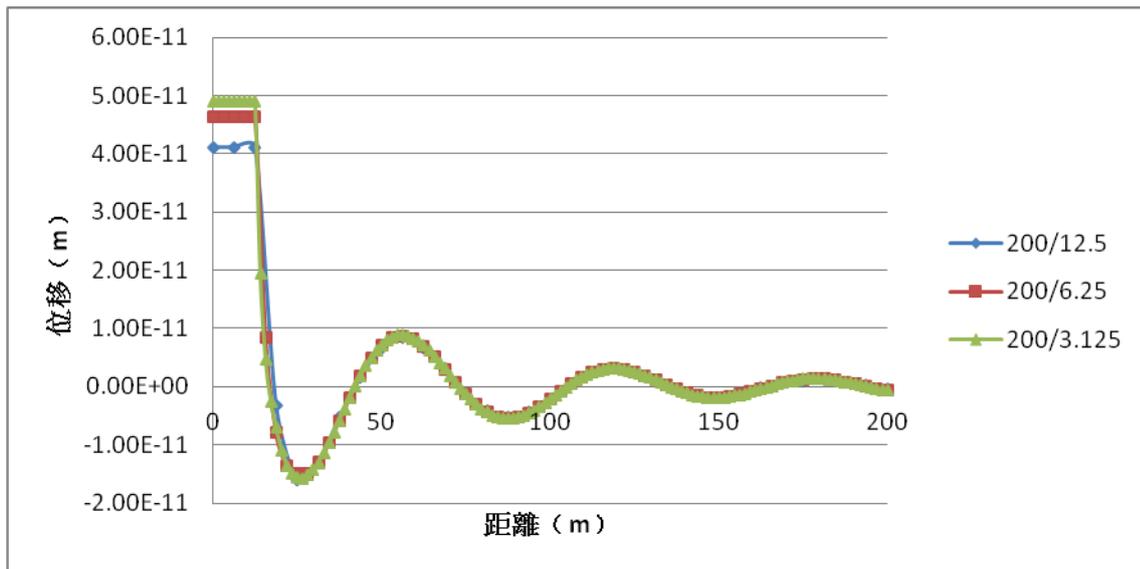


(a) 實部部分

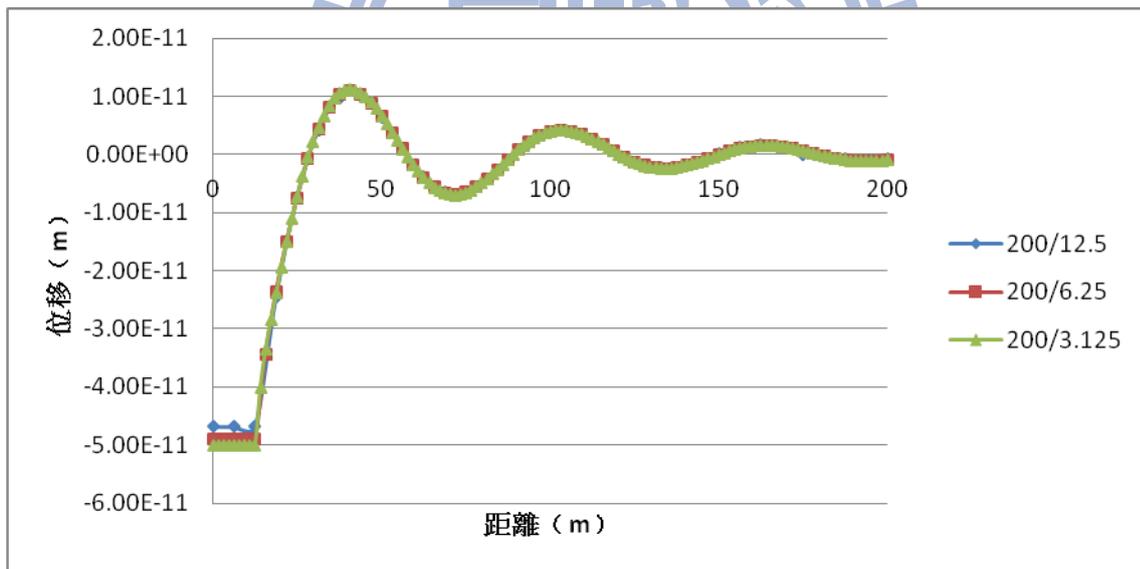


(b) 虛部部分

Fig. 3.31 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.32 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ)

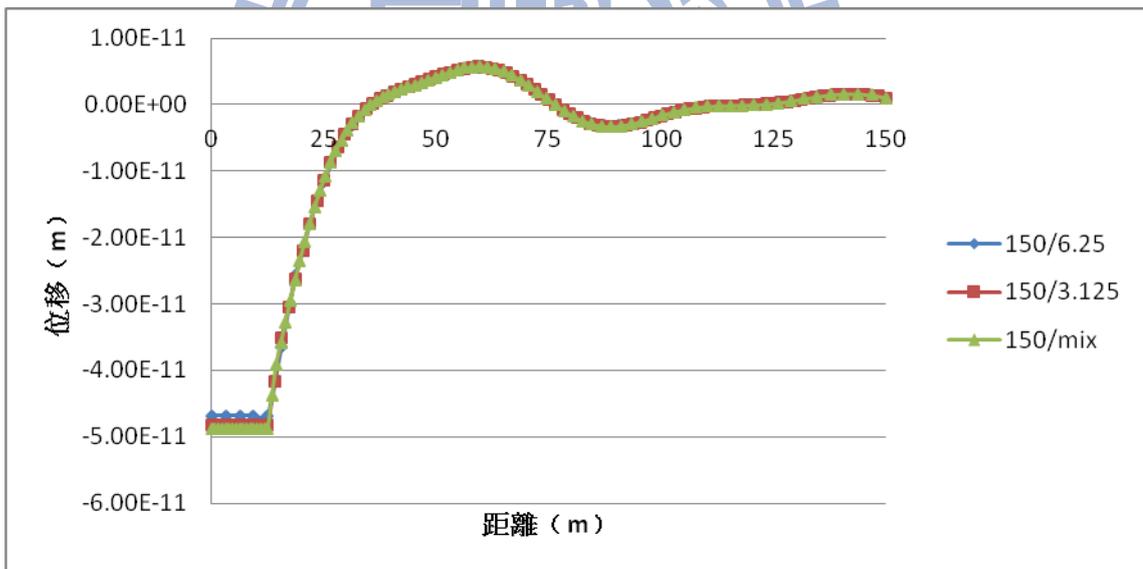
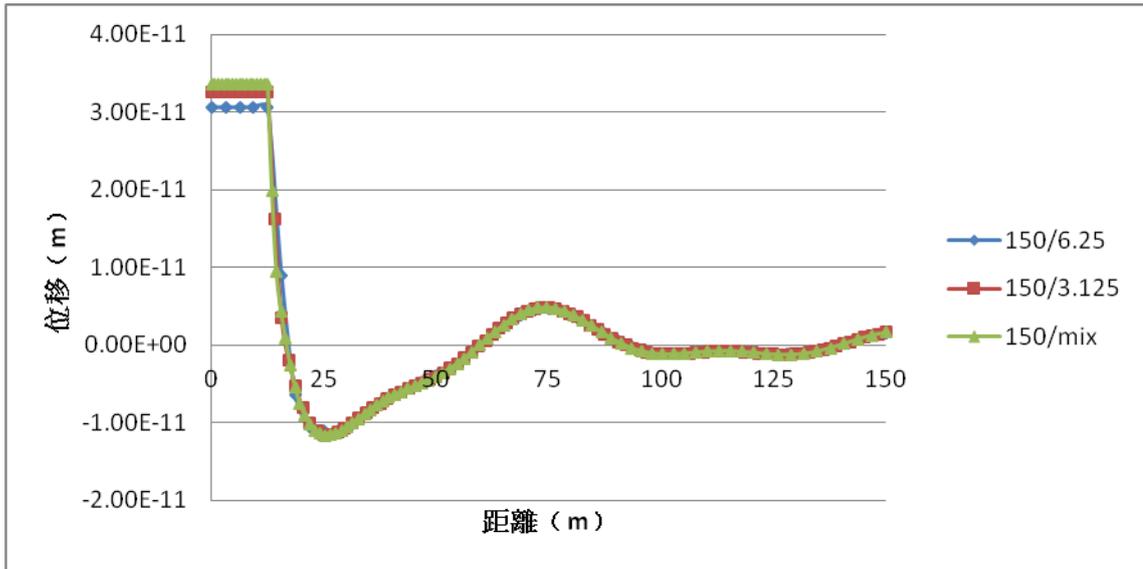
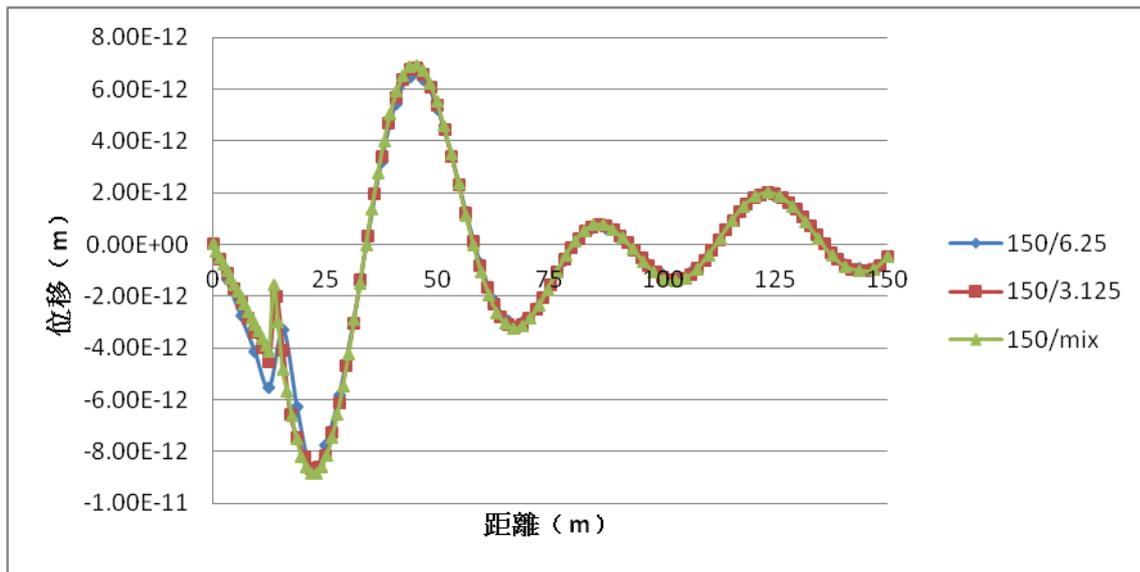
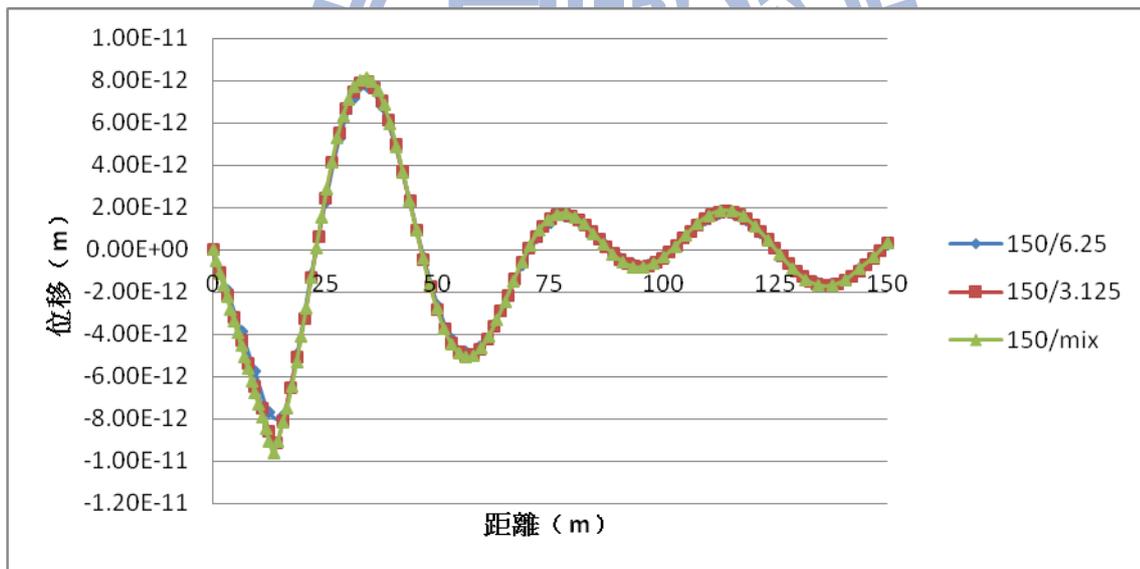


Fig. 3.33 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

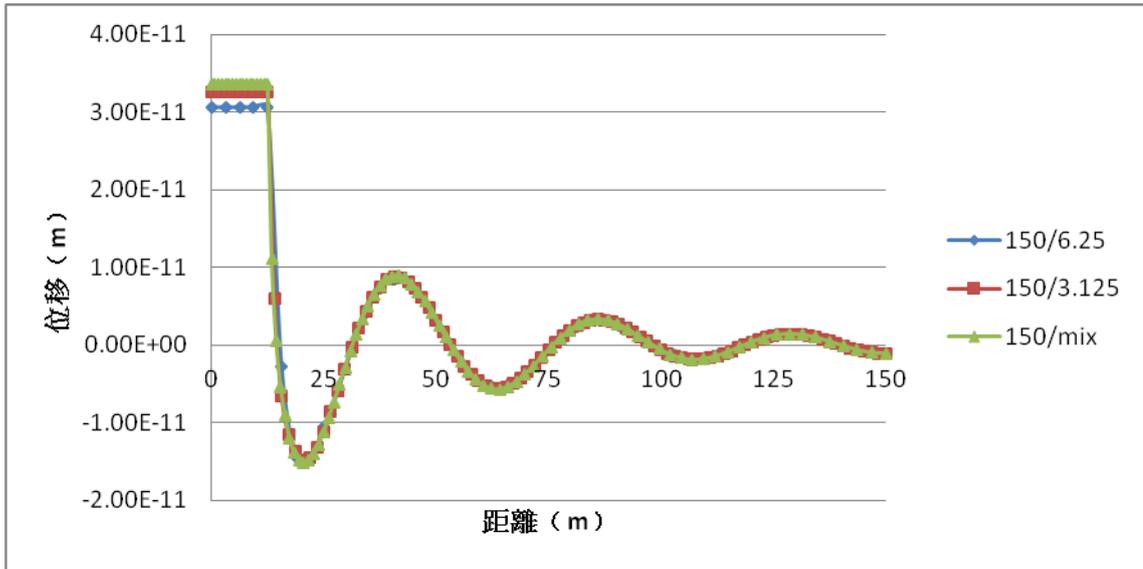


(a) 實部部分

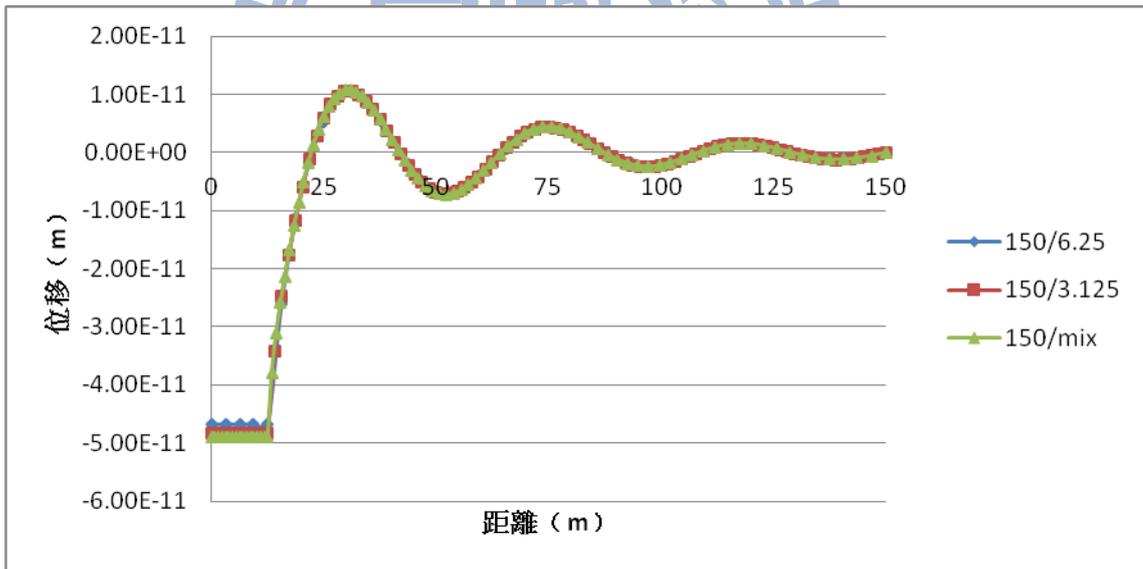


(b) 虛部部分

Fig. 3.34 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

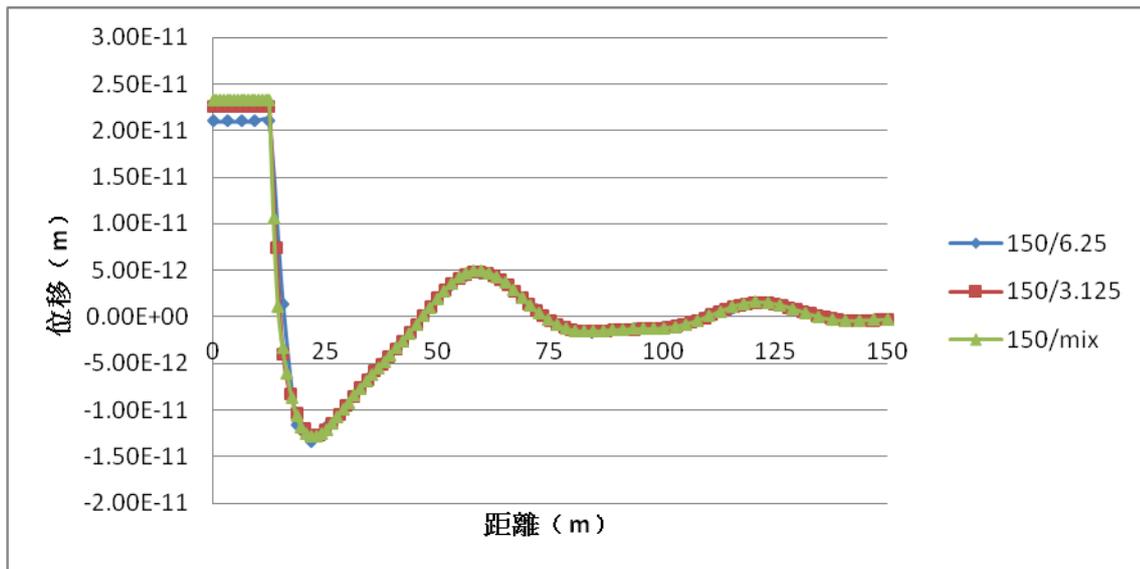


(a) 實部部分

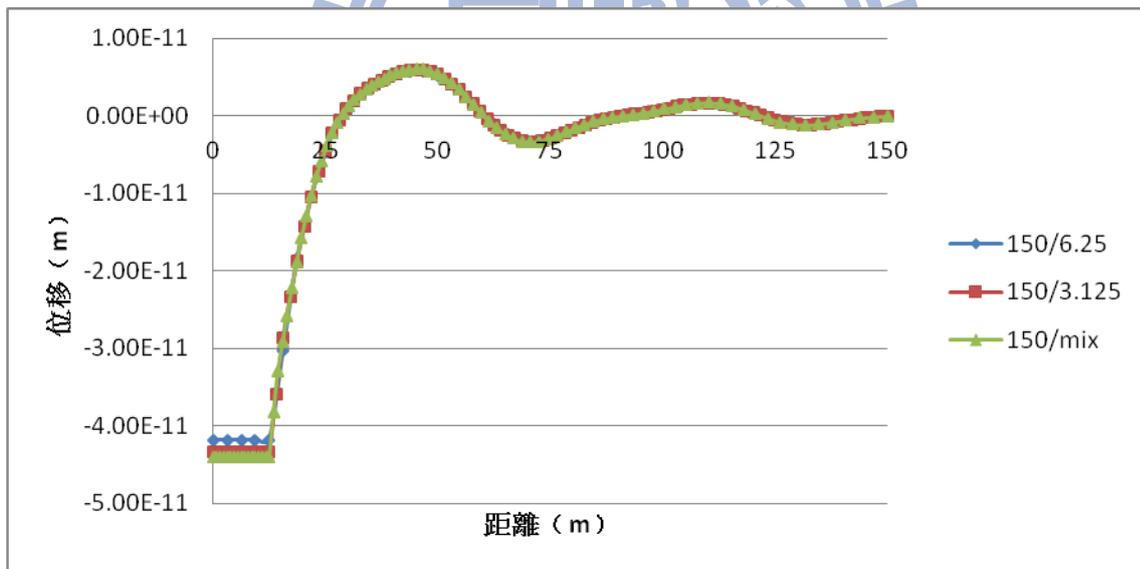


(b) 虛部部分

Fig. 3.35 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ)

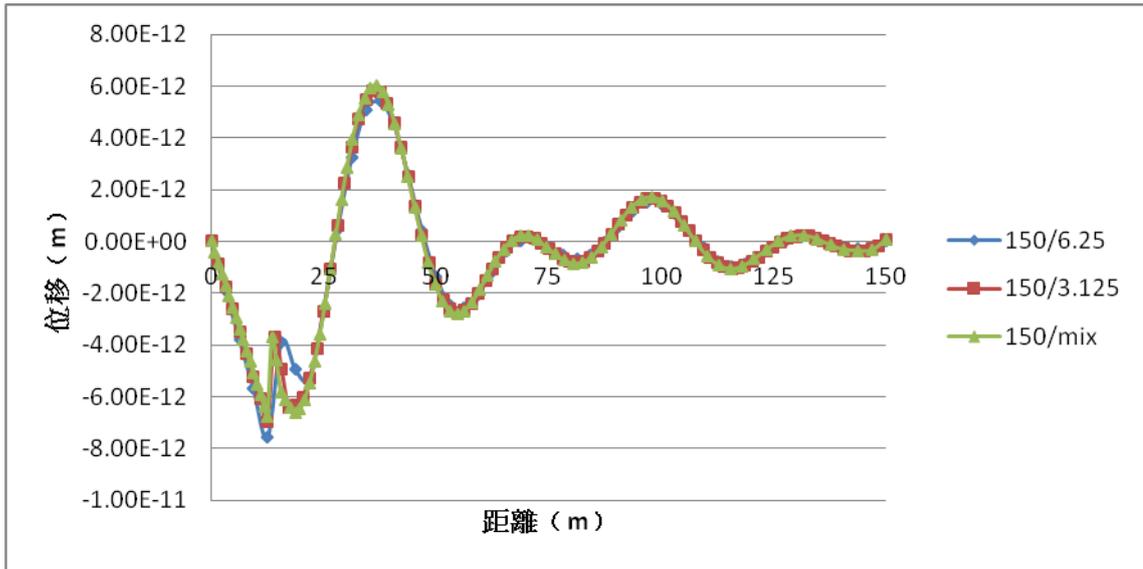


(a) 實部部分

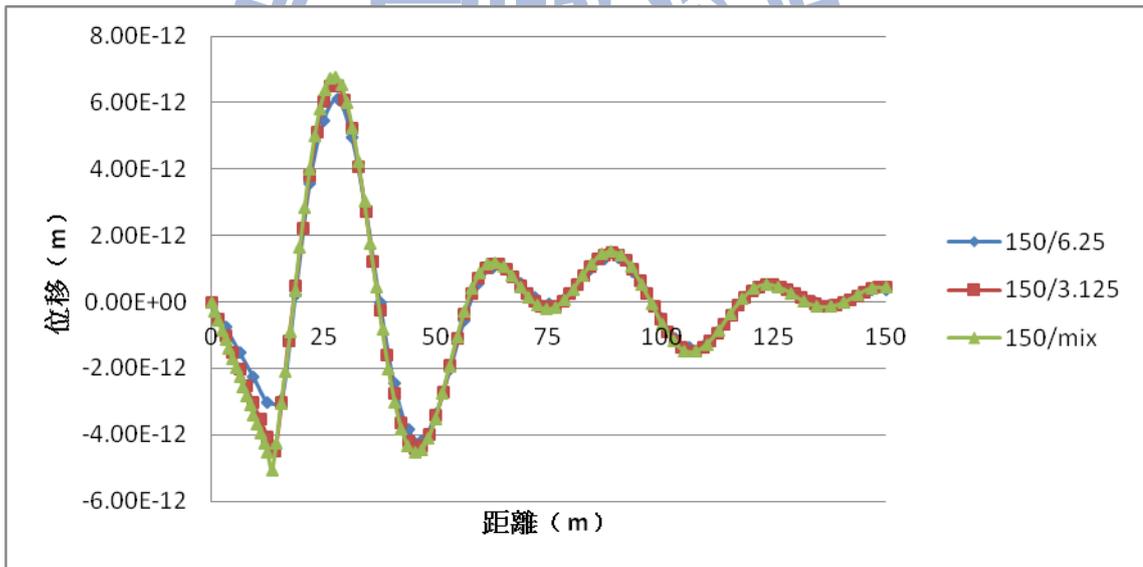


(b) 虛部部分

Fig. 3.36 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

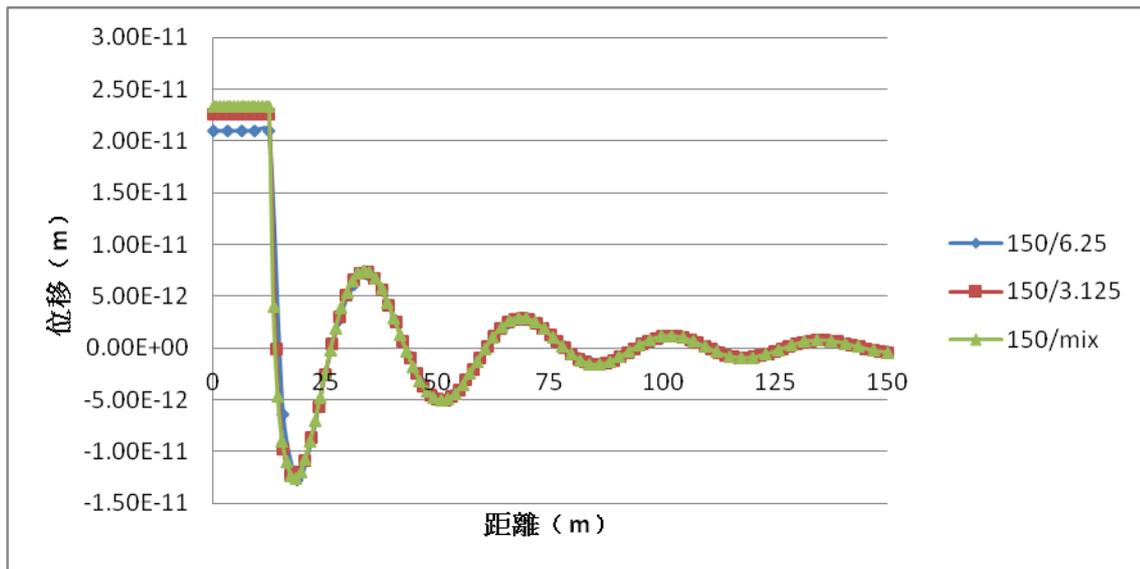


(a) 實部部分

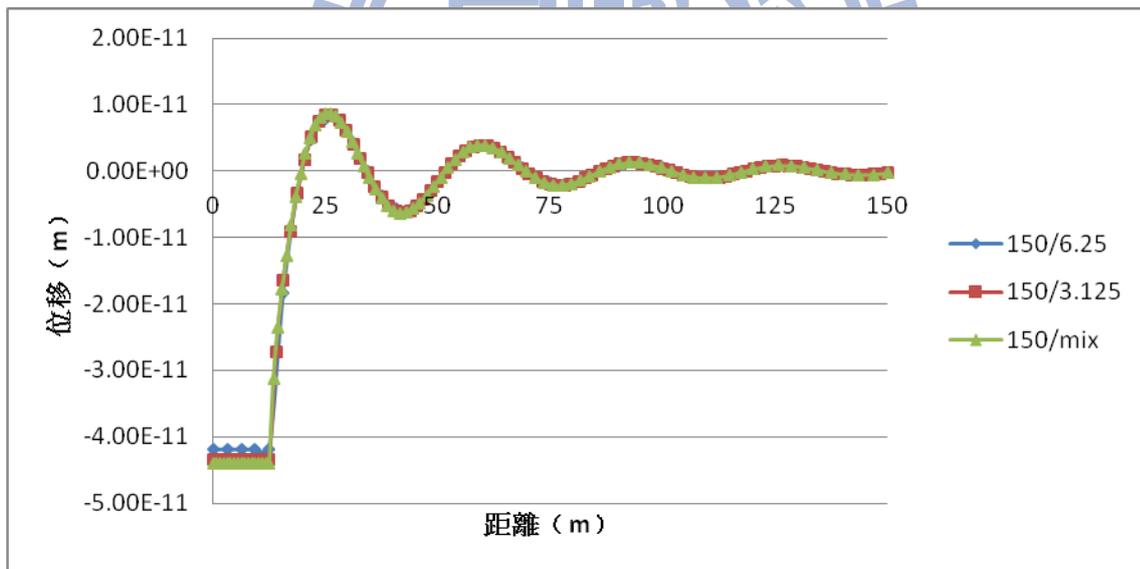


(b) 虛部部分

Fig. 3.37 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

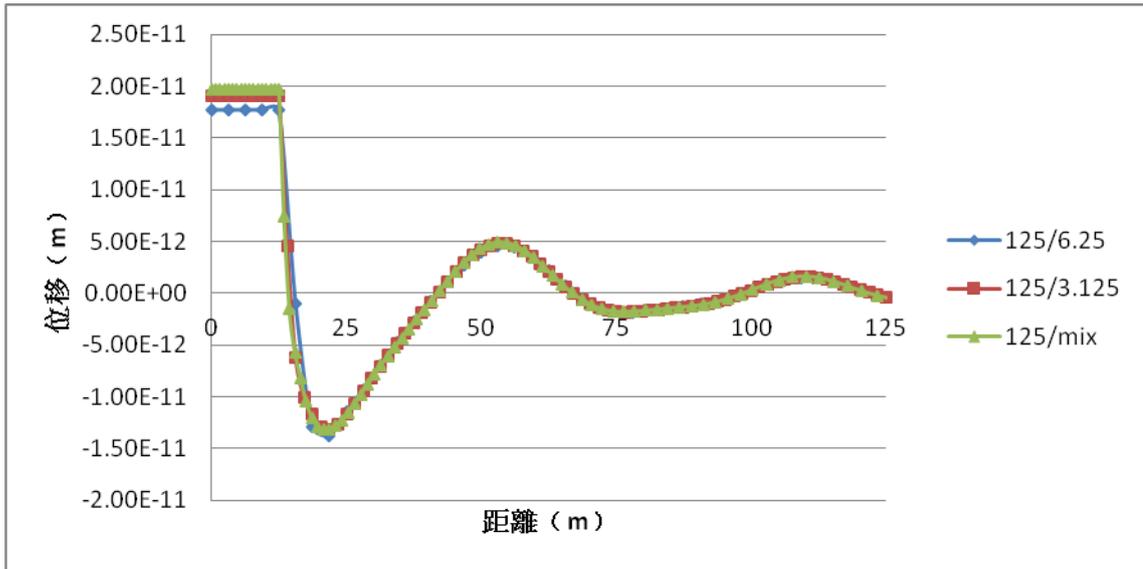


(a) 實部部分

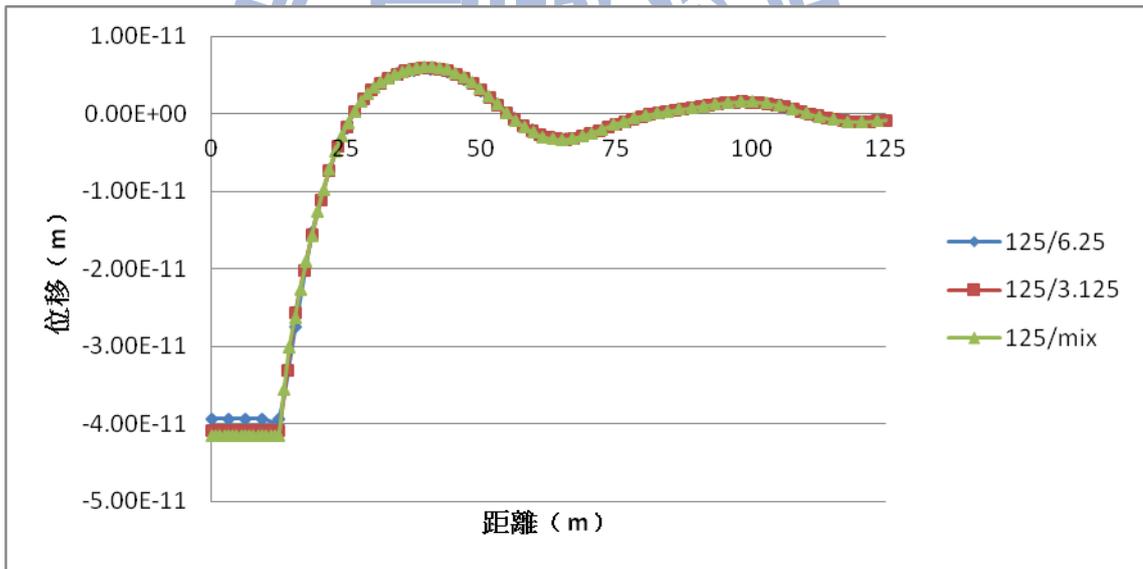


(b) 虛部部分

Fig. 3.38 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ)

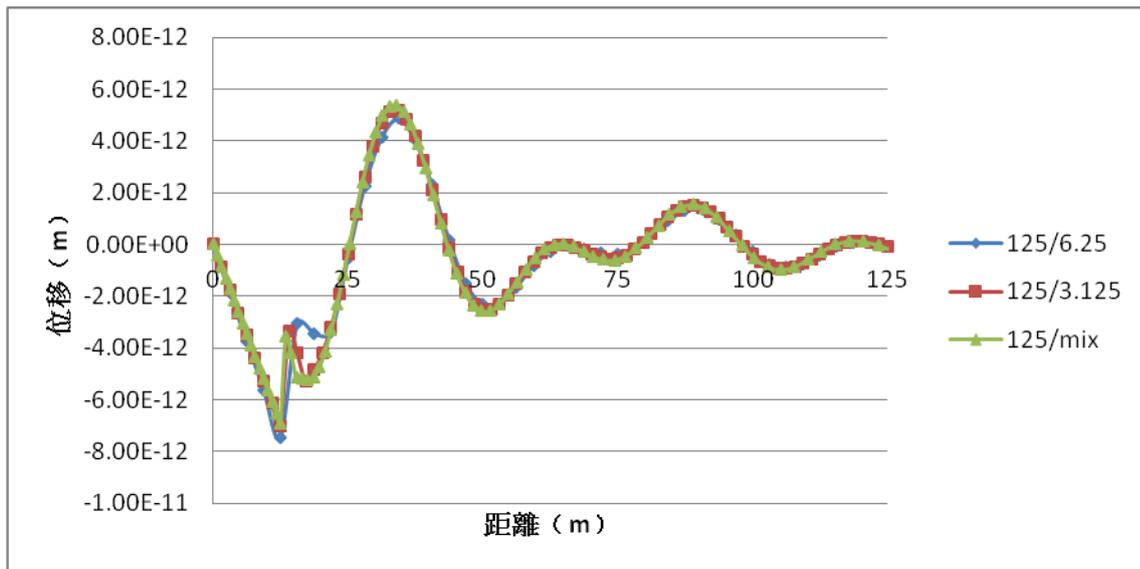


(a) 實部部分

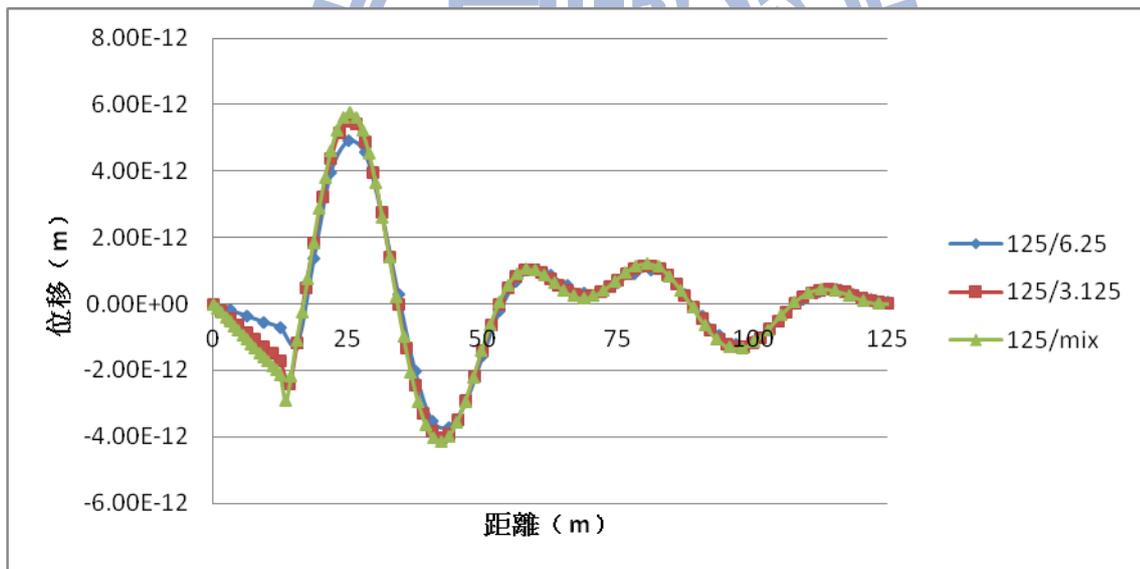


(b) 虛部部分

Fig. 3.39 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)

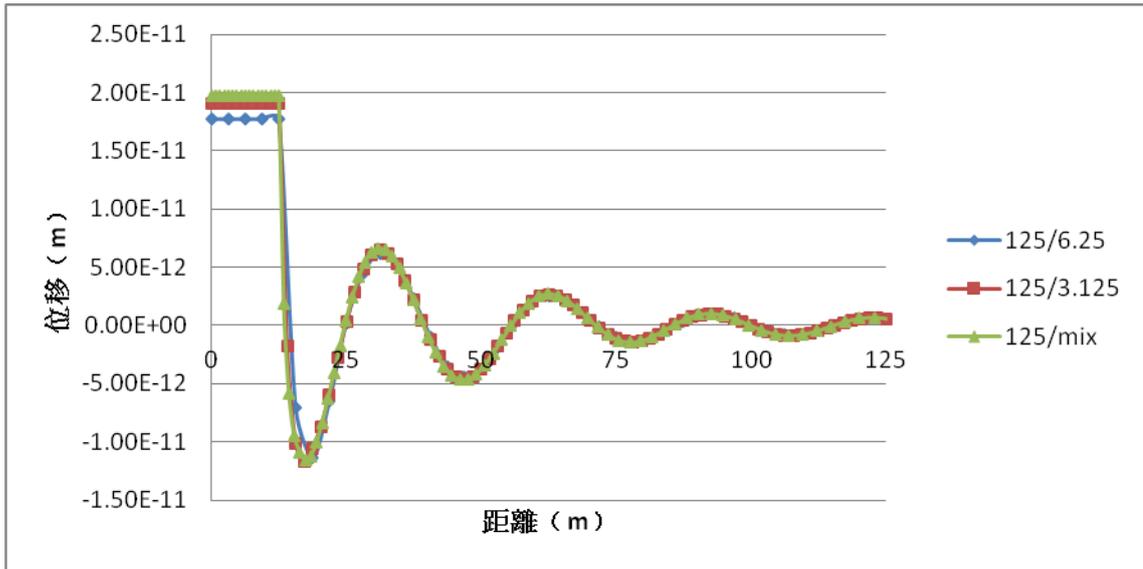


(a) 實部部分

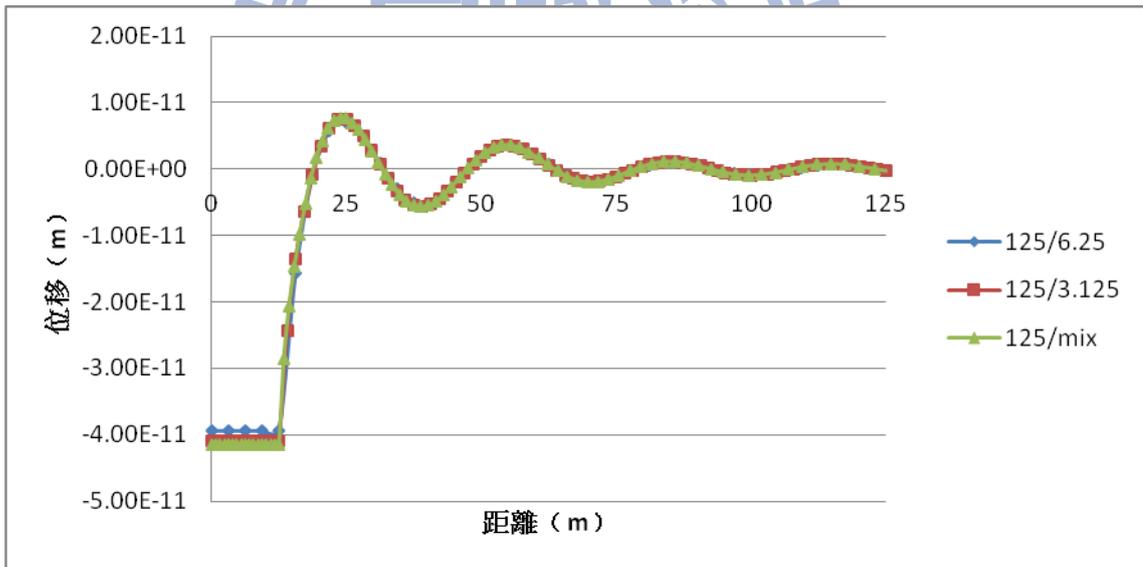


(b) 虛部部分

Fig. 3.40 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

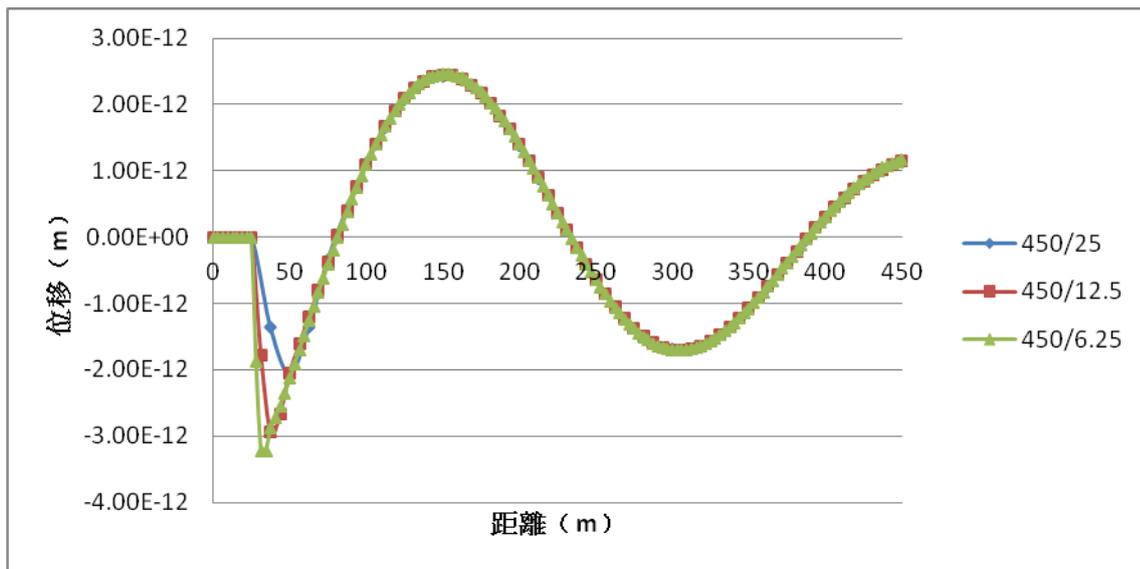


(a) 實部部分

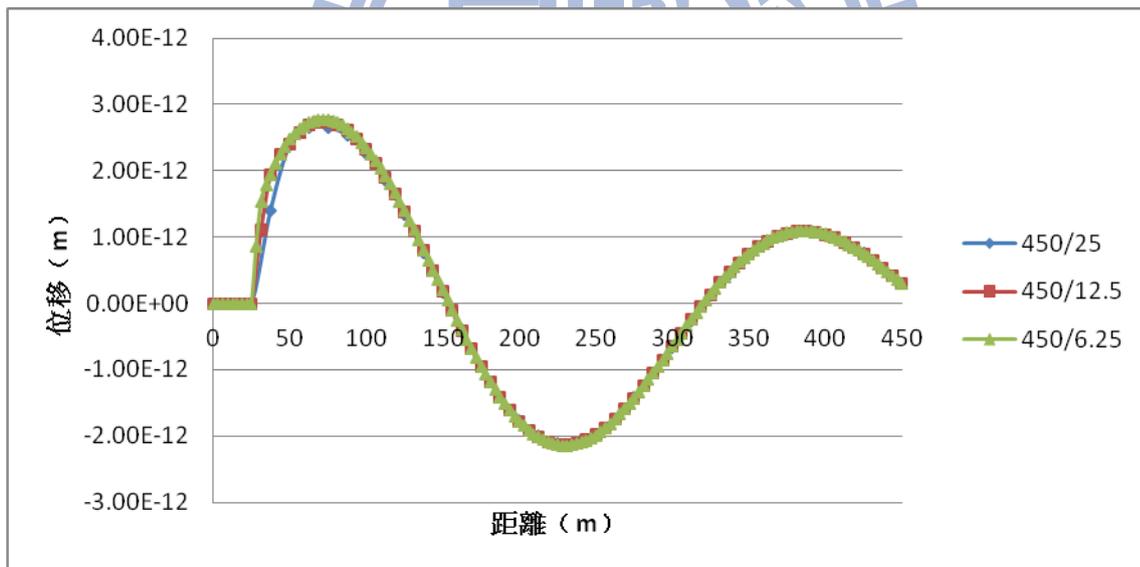


(b) 虛部部分

Fig. 3.41 模型一之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ)

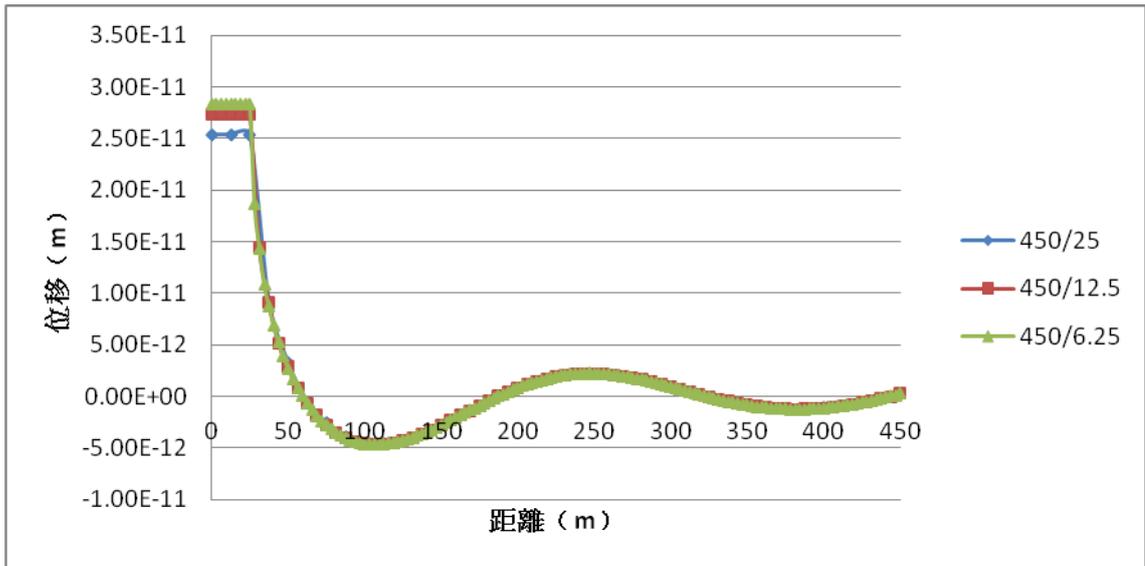


(a) 實部部分

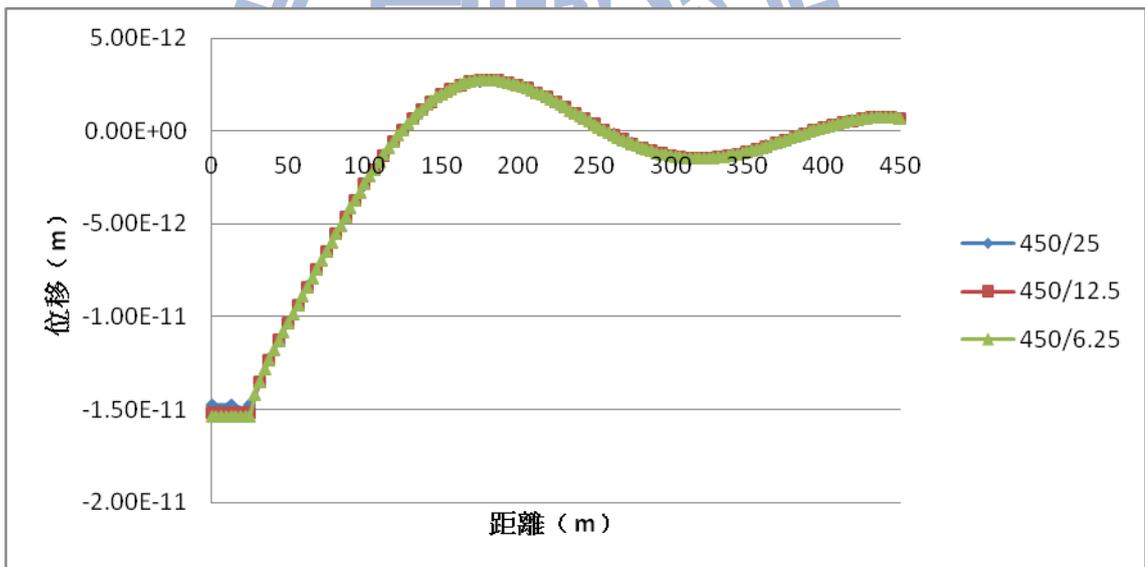


(b) 虛部部分

Fig. 3.42 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

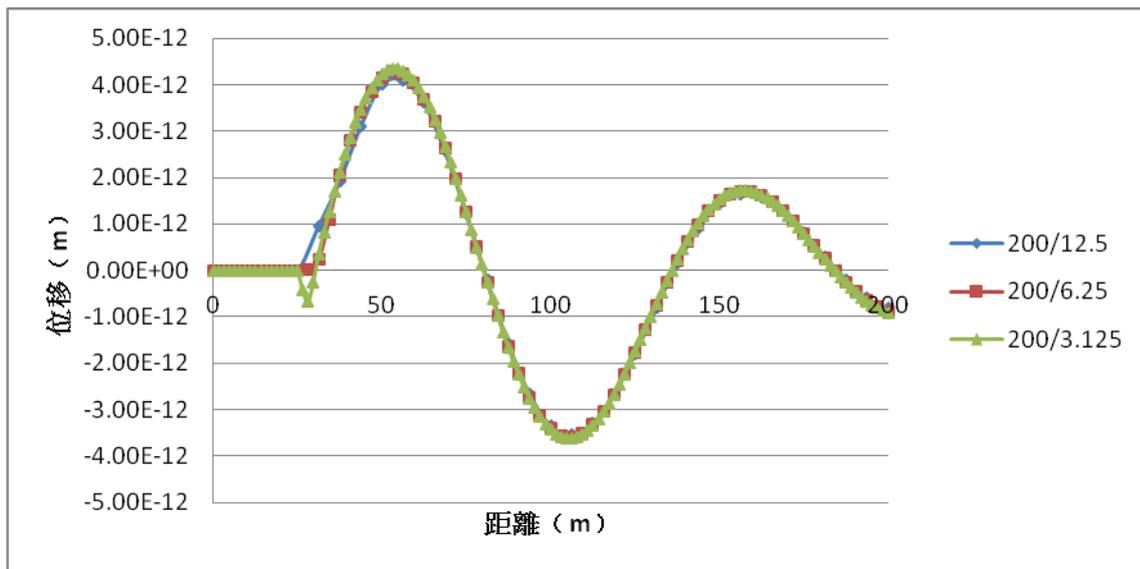


(a) 實部部分

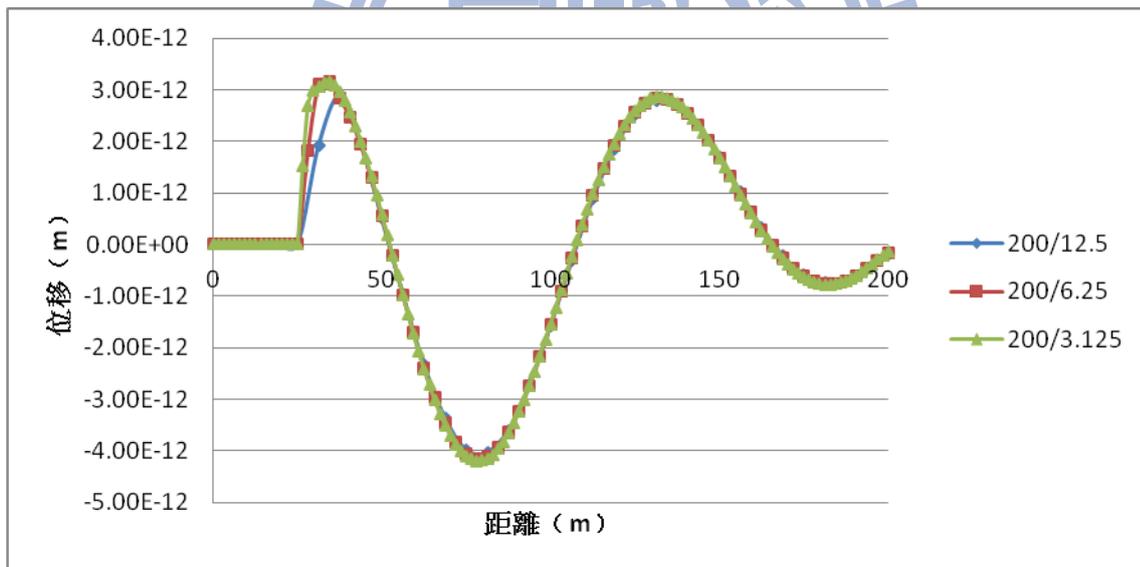


(b) 虛部部分

Fig. 3.43 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

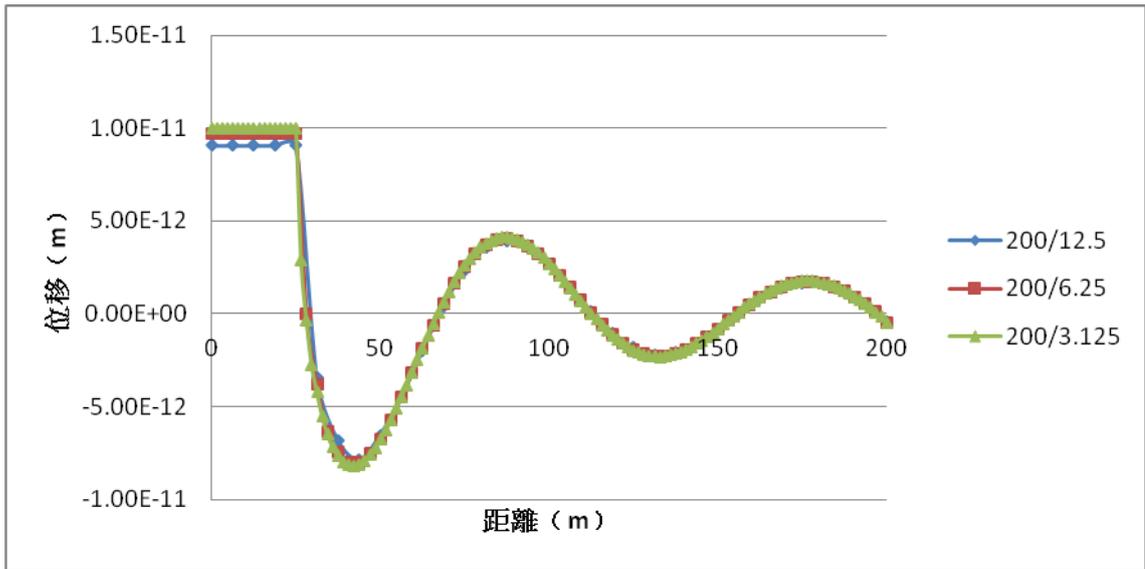


(a) 實部部分

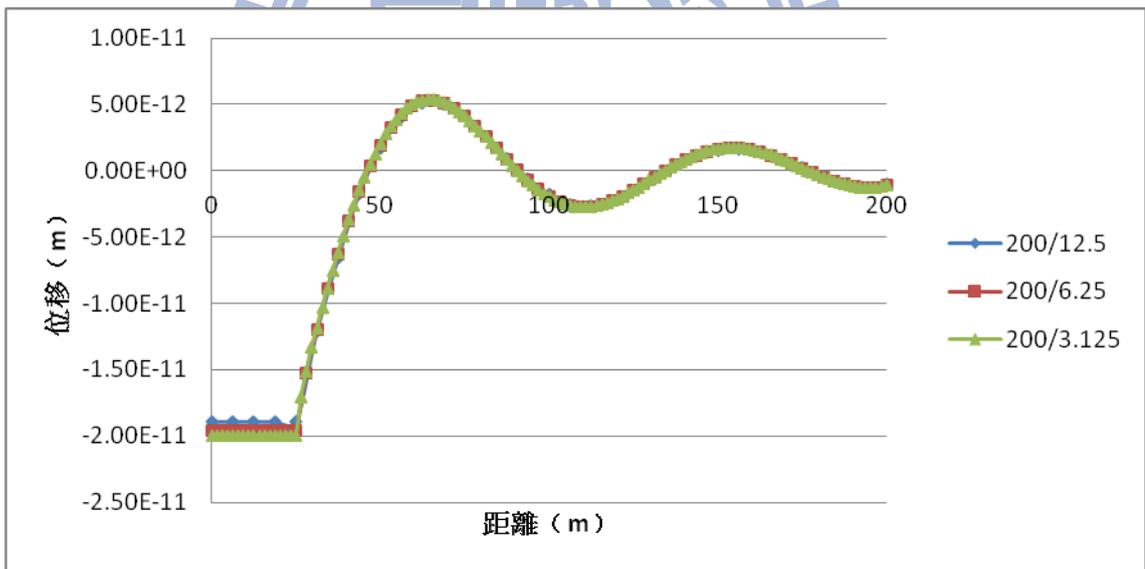


(b) 虛部部分

Fig. 3.44 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

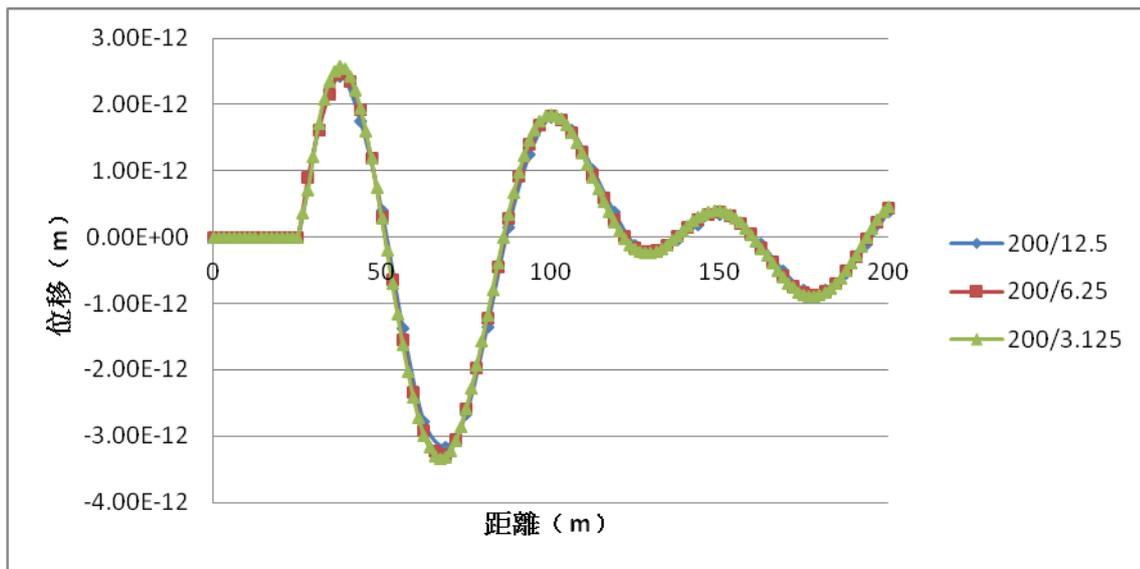


(a) 實部部分

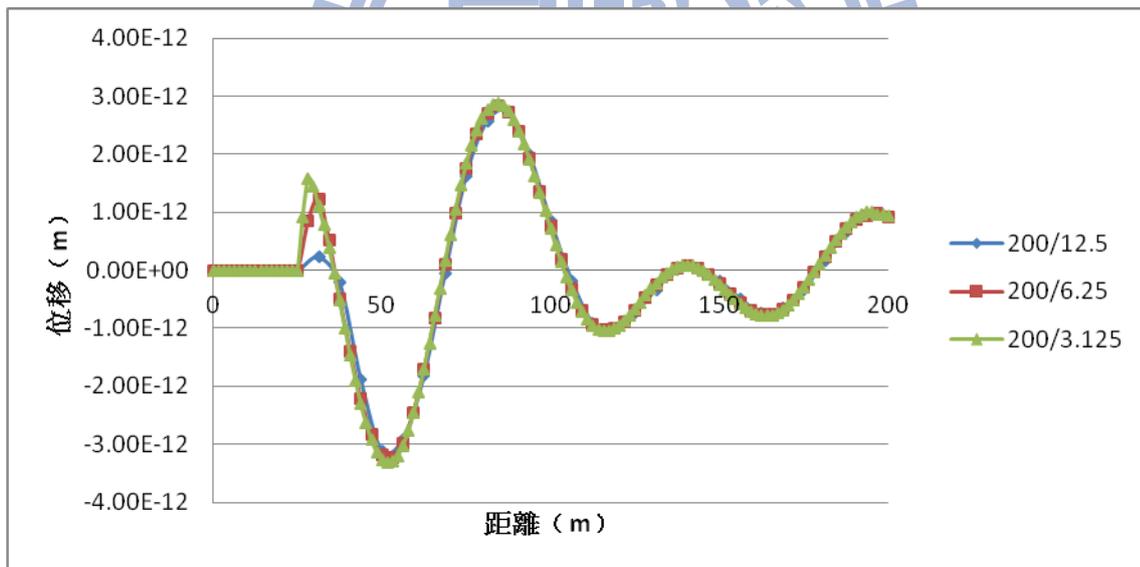


(b) 虛部部分

Fig. 3.45 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

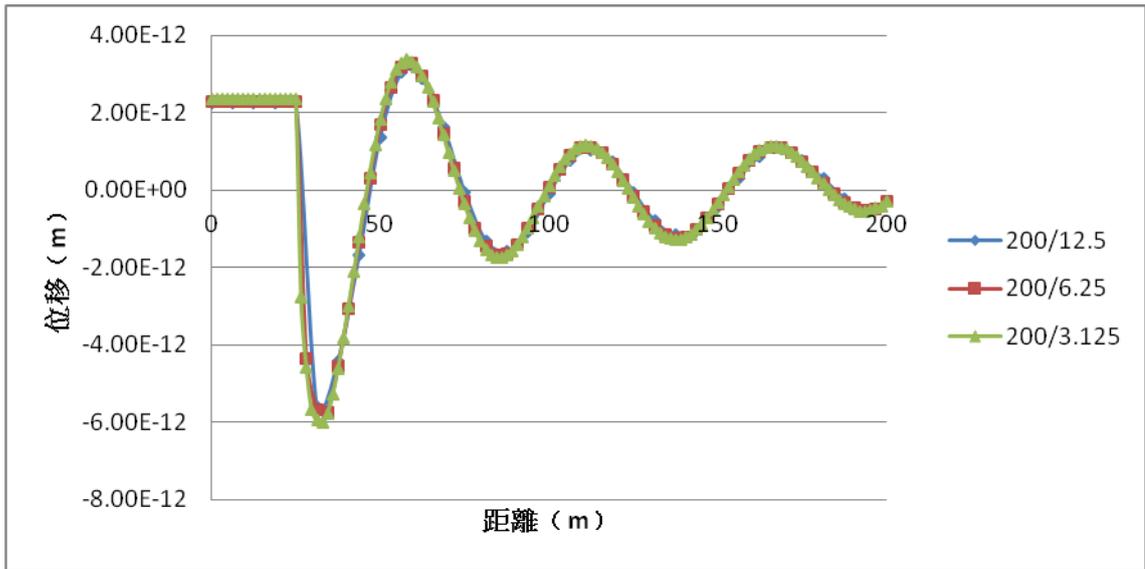


(a) 實部部分

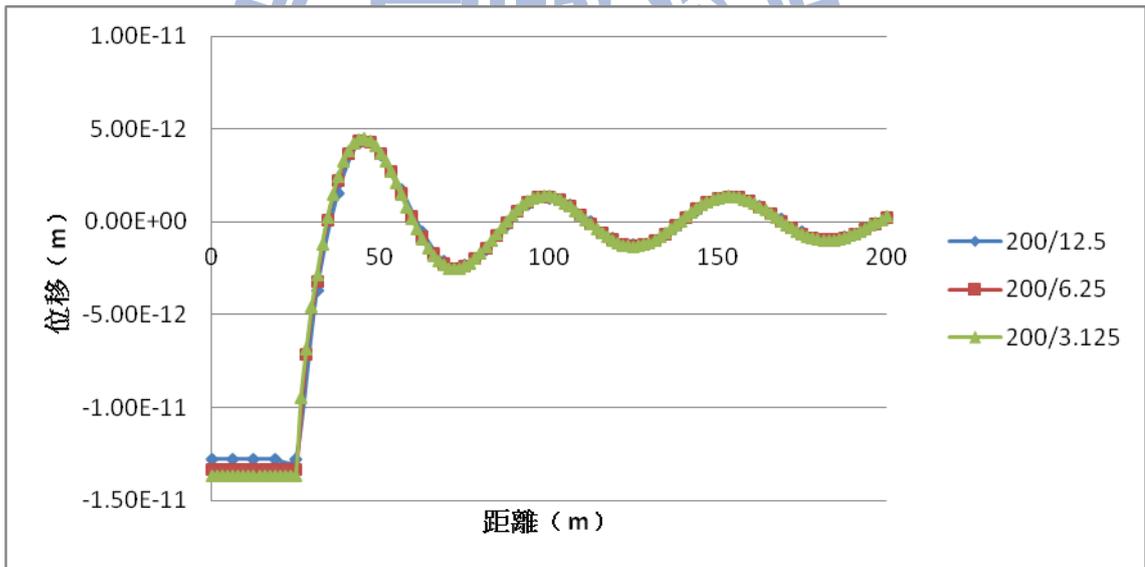


(b) 虛部部分

Fig. 3.46 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

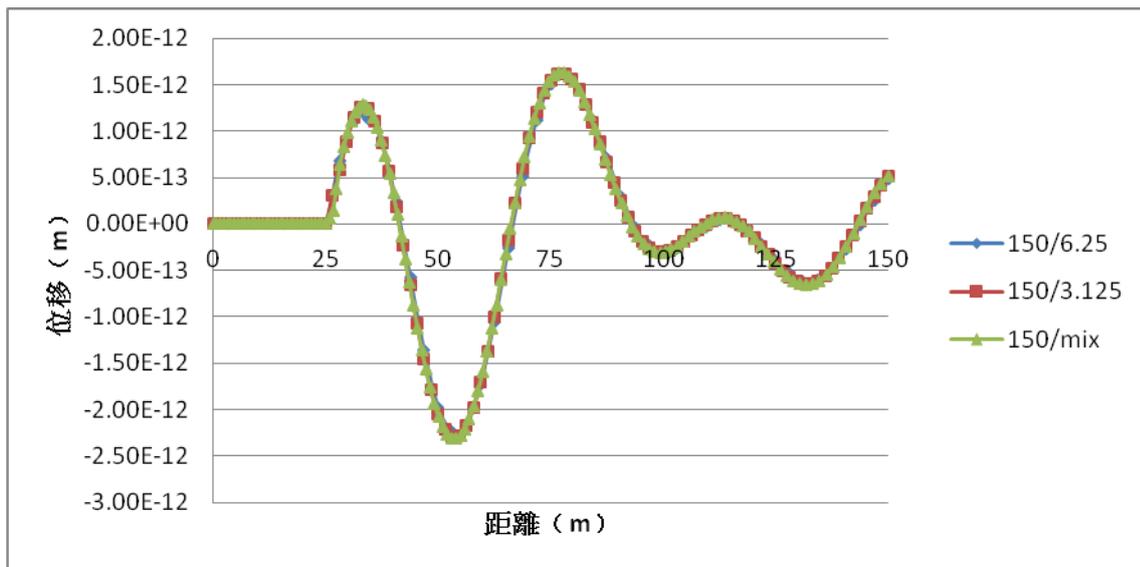


(a) 實部部分

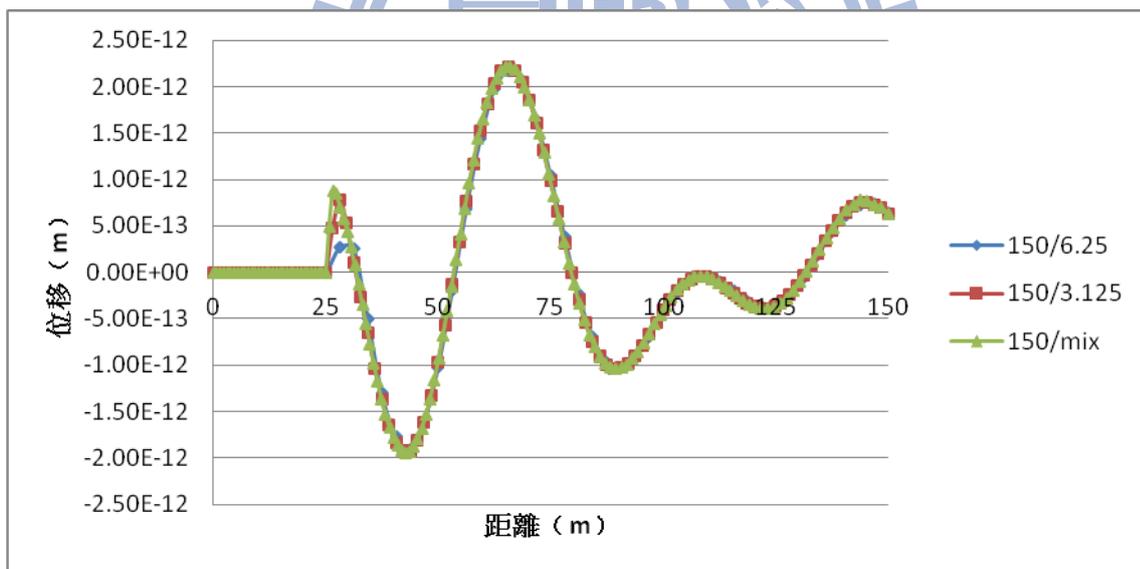


(b) 虛部部分

Fig. 3.47 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)

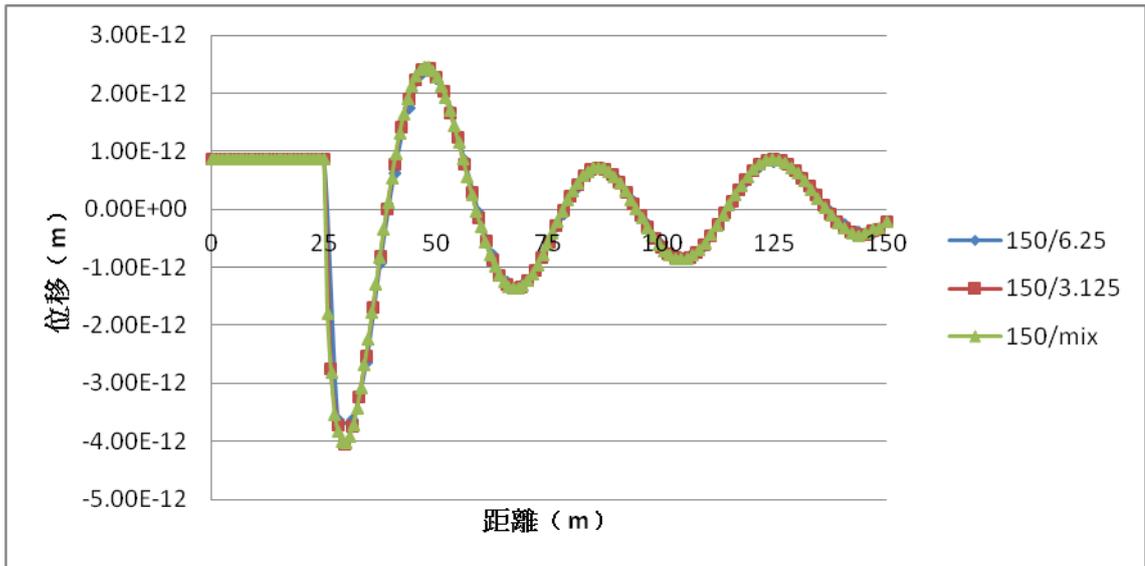


(a) 實部部分

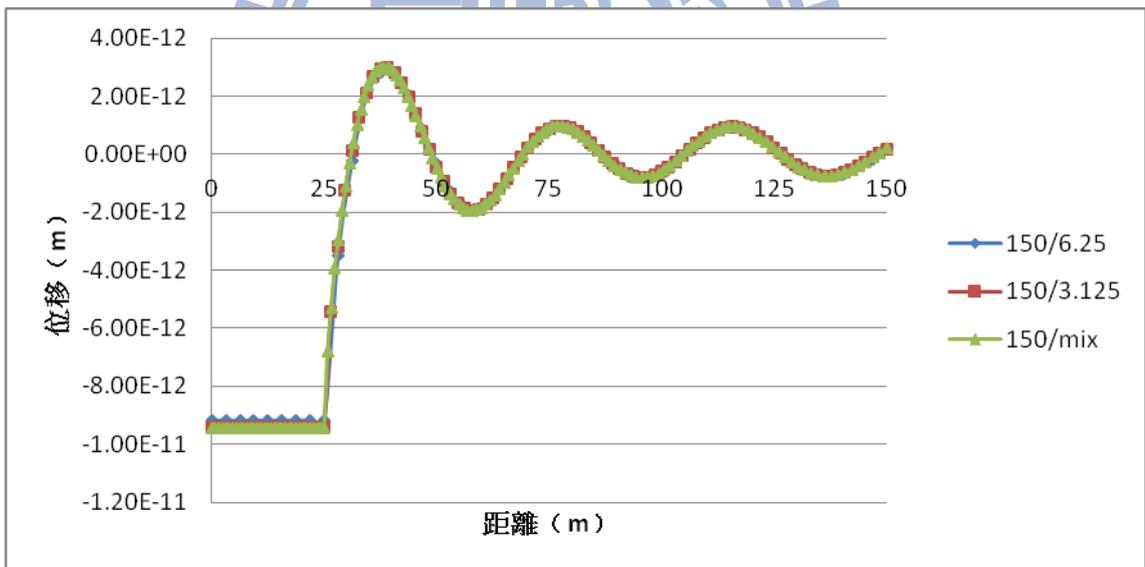


(b) 虛部部分

Fig. 3.48 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

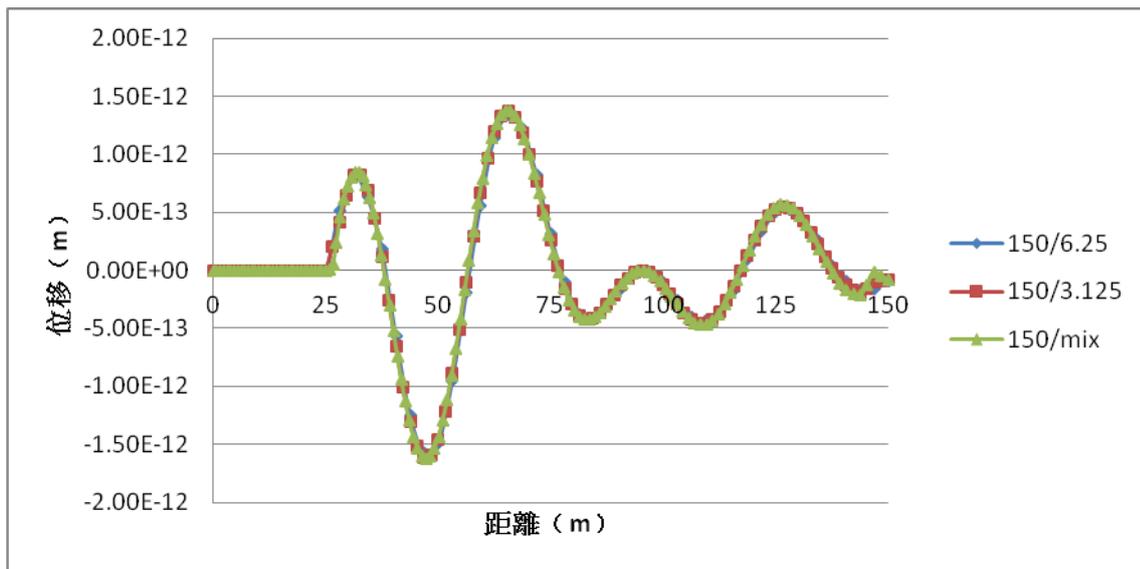


(a) 實部部分

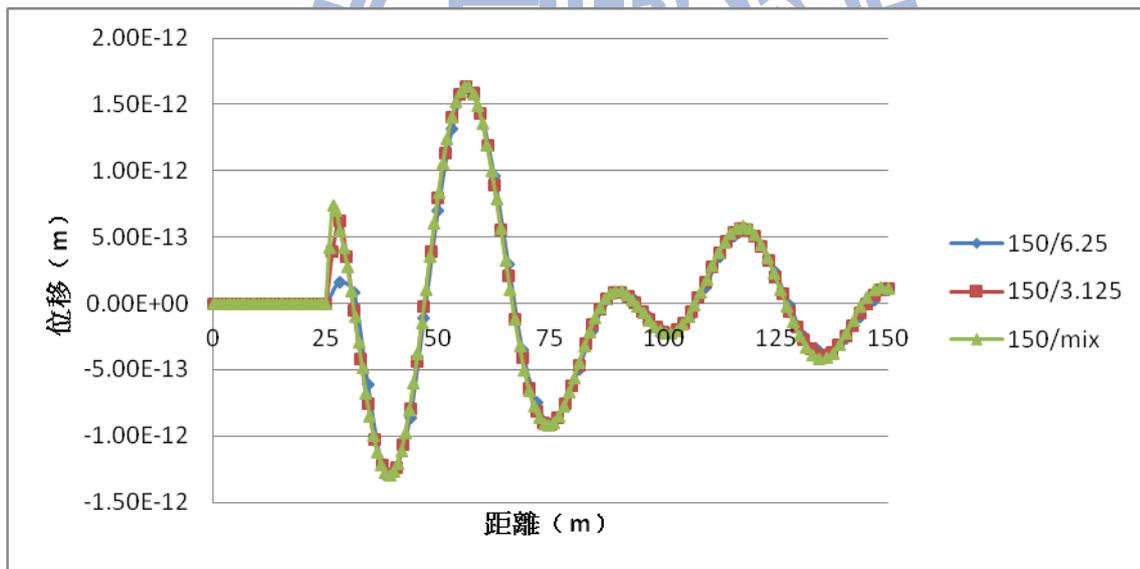


(b) 虛部部分

Fig. 3.49 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

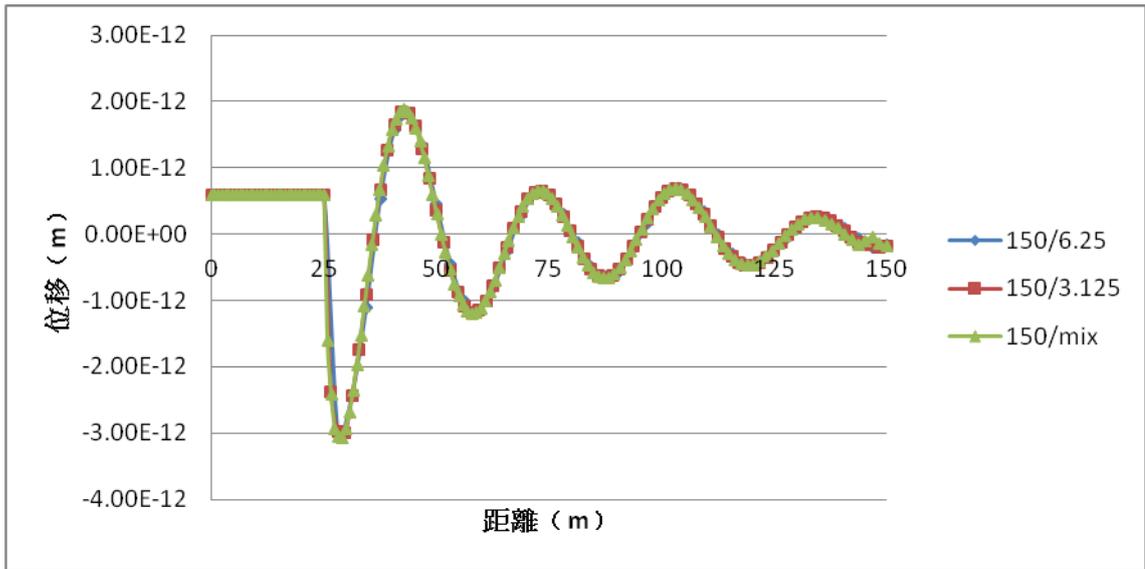


(a) 實部部分

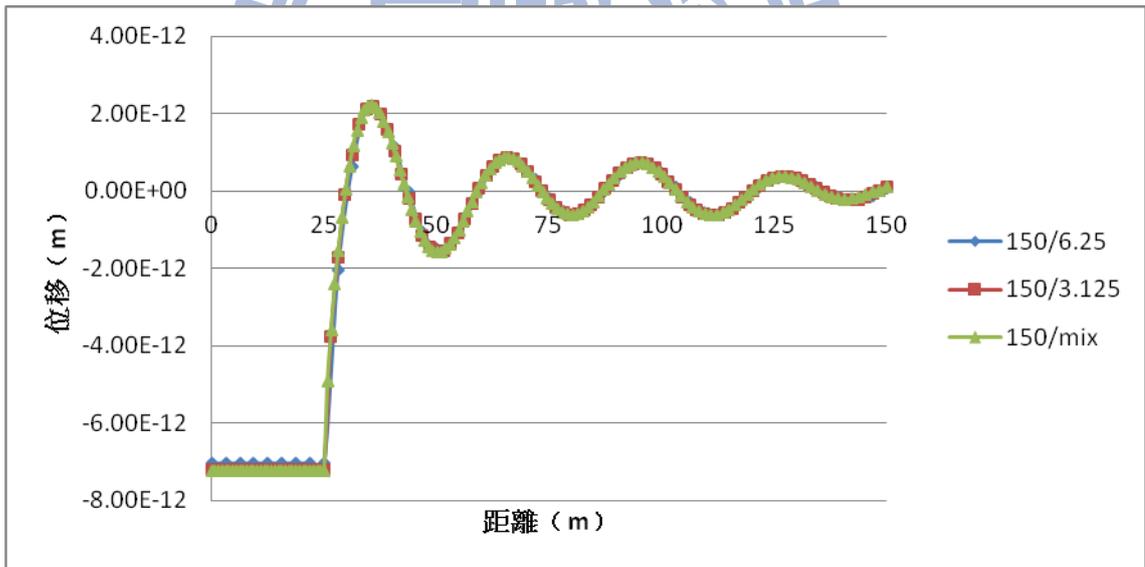


(b) 虛部部分

Fig. 3.50 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

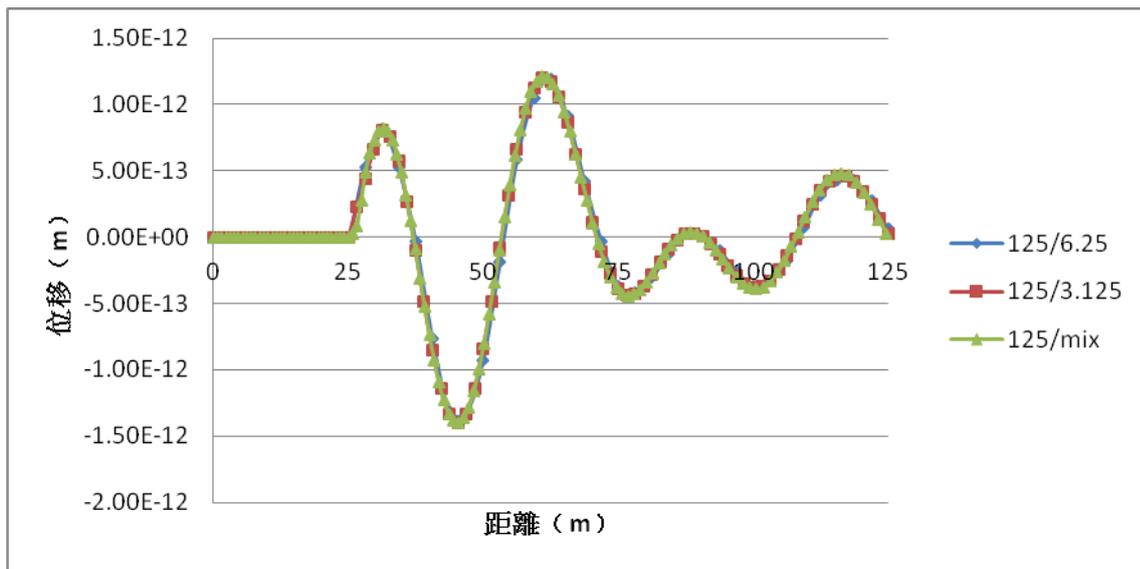


(a) 實部部分

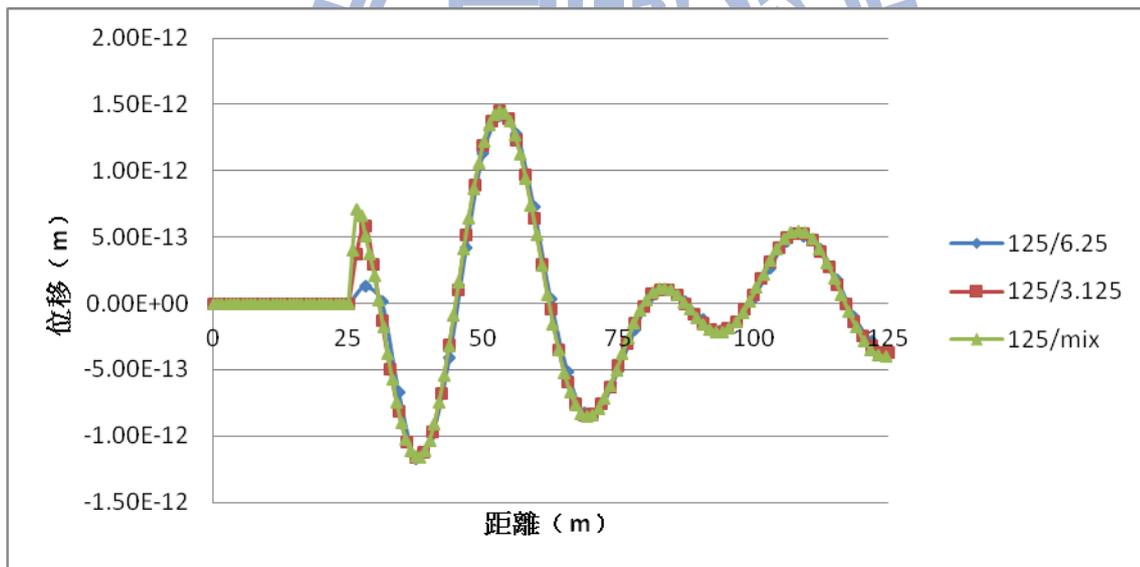


(b) 虛部部分

Fig. 3.51 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

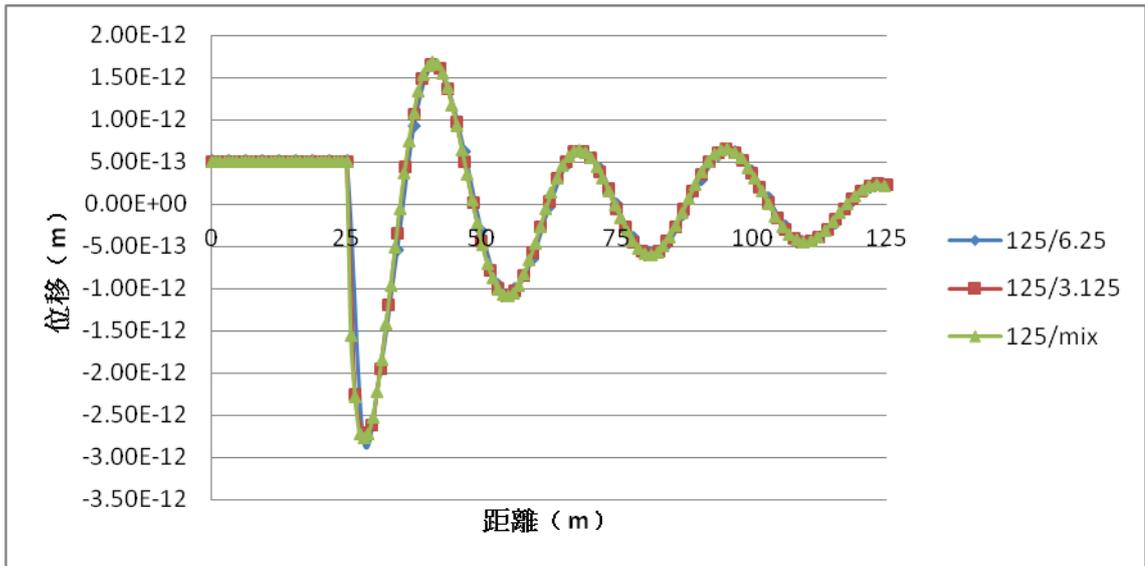


(a) 實部部分

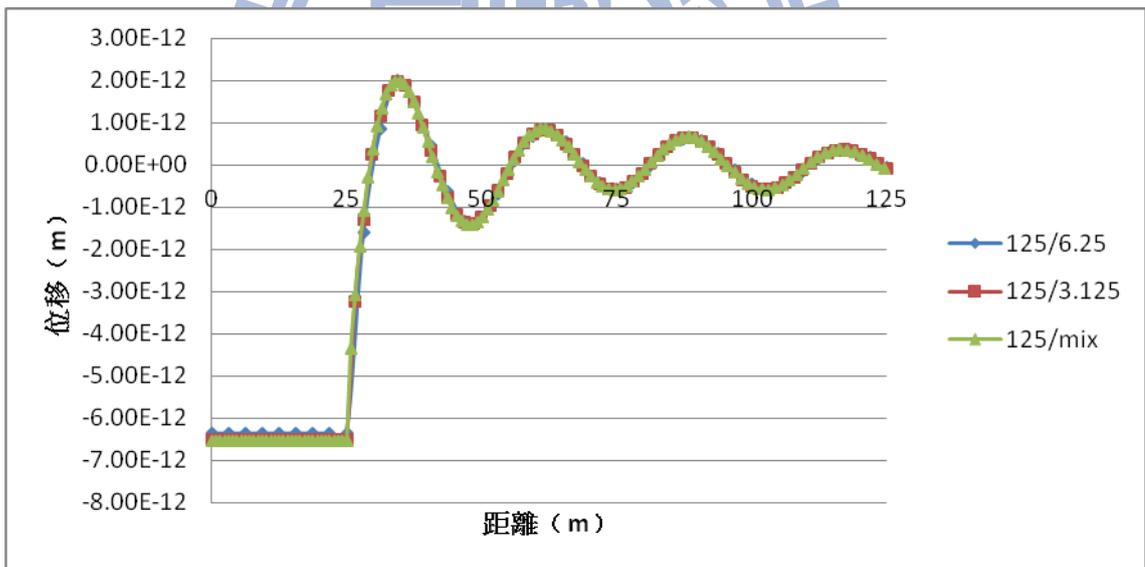


(b) 虛部部分

Fig. 3.52 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.53 模型二之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

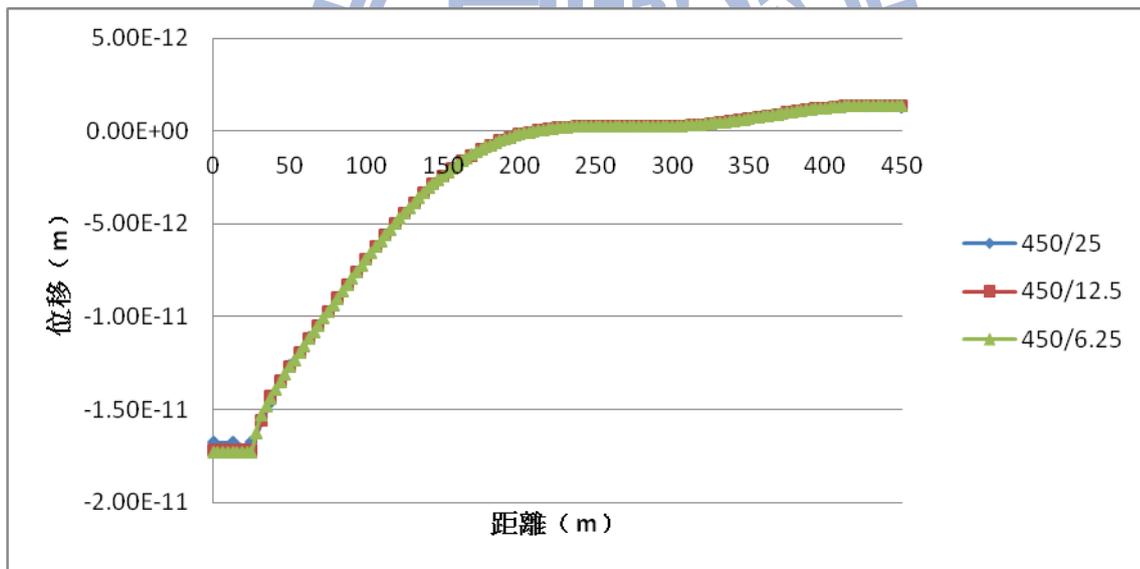
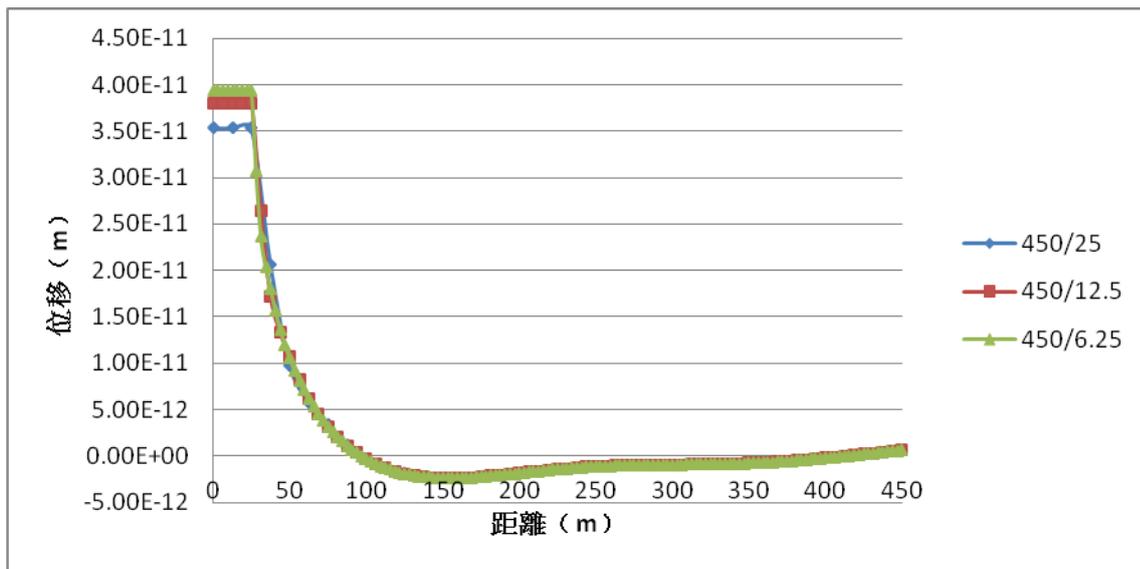
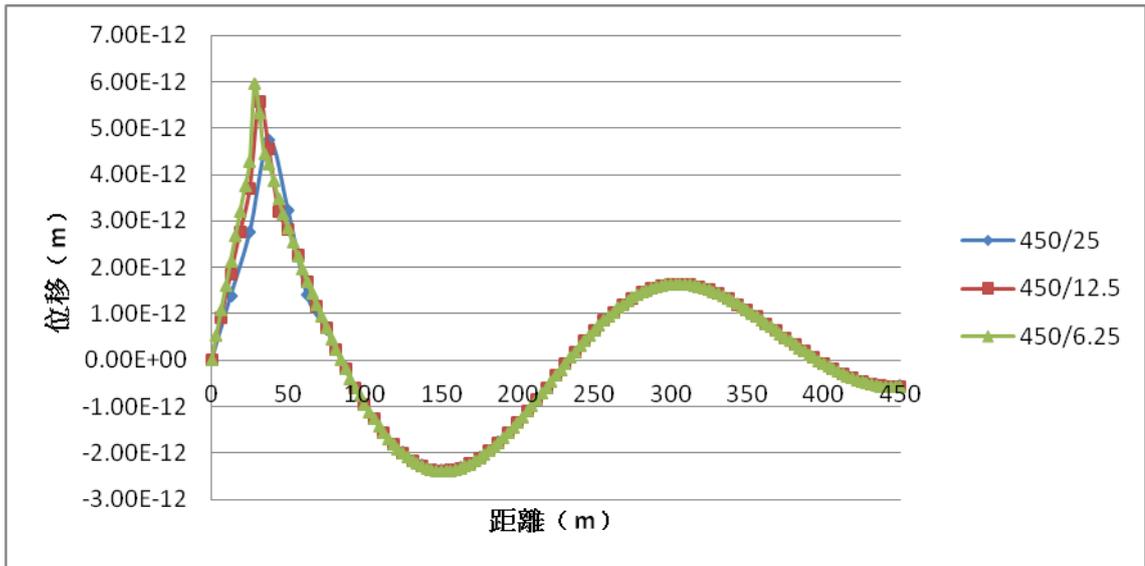
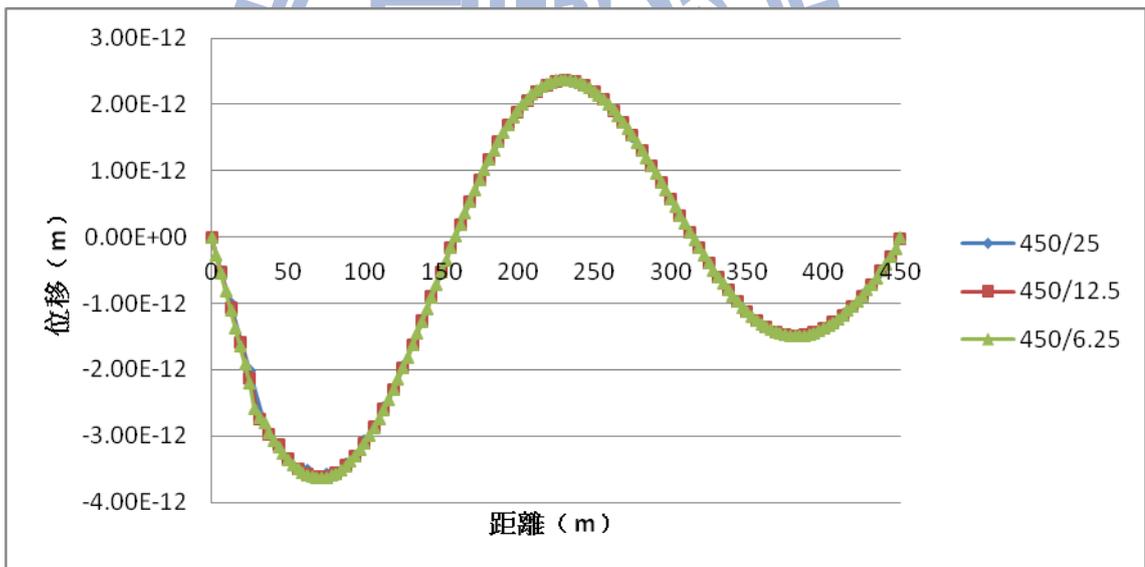


Fig. 3.54 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.55 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

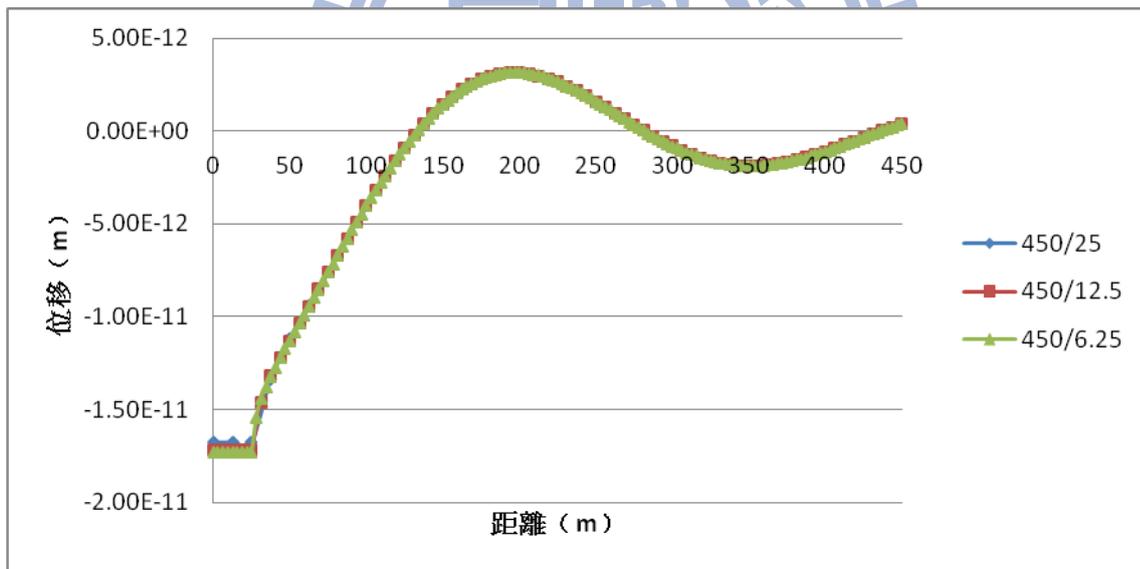
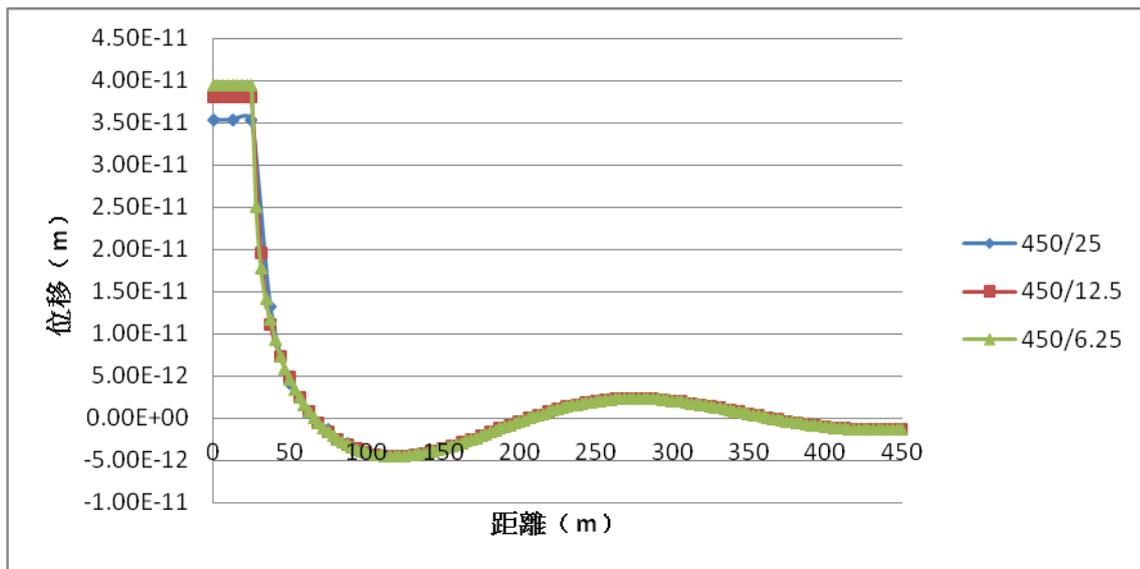
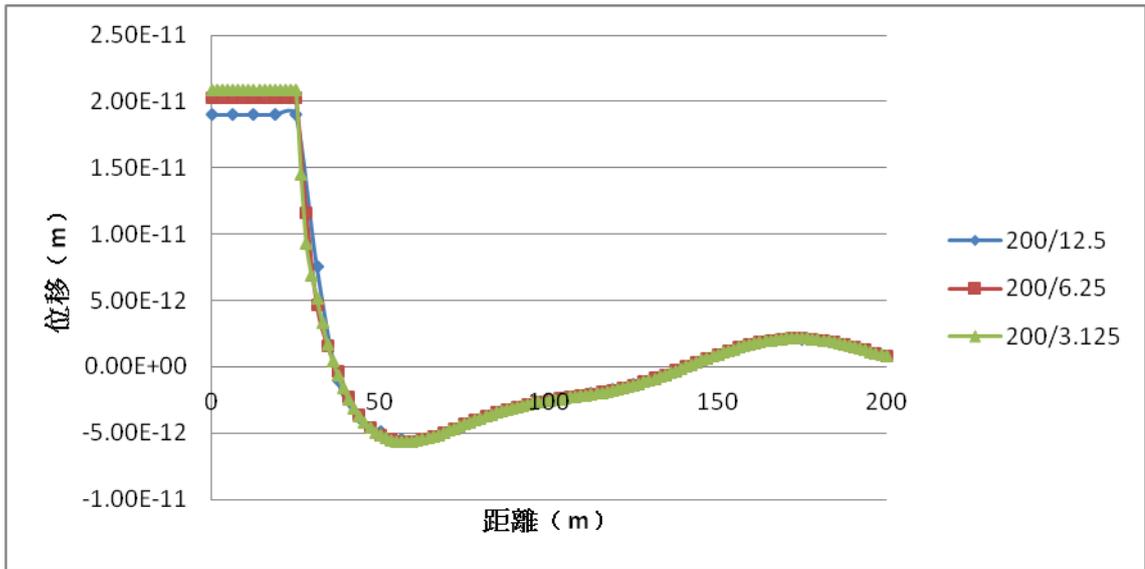
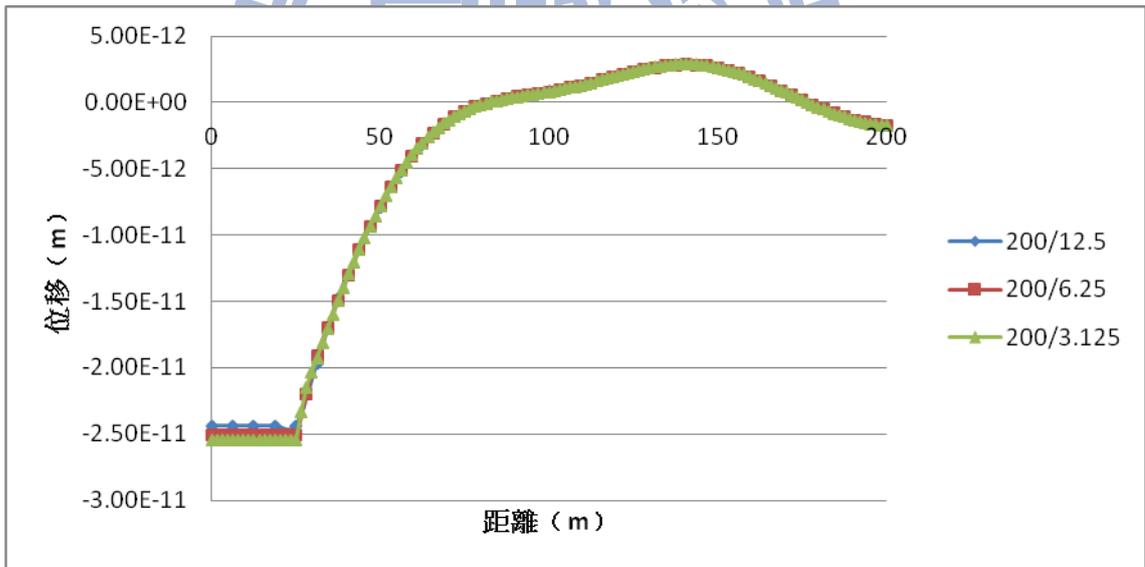


Fig. 3.56 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ)

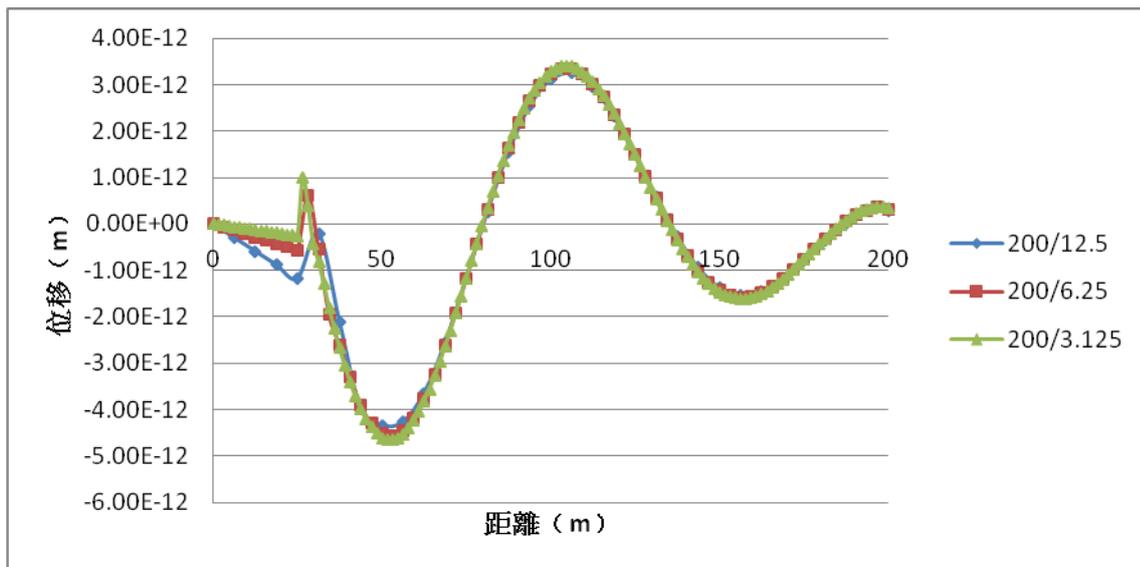


(a) 實部部分

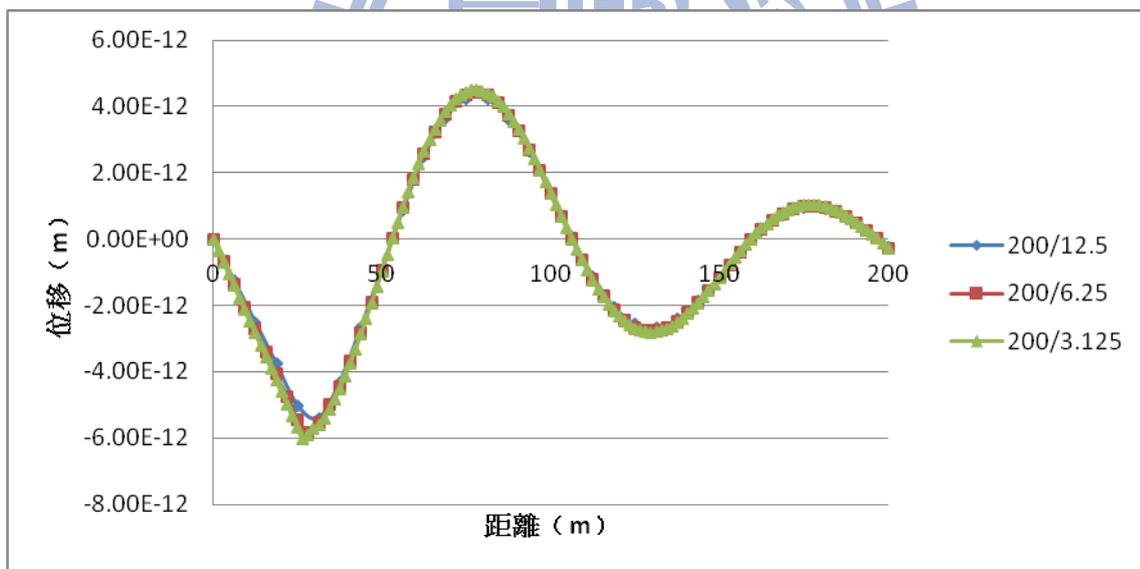


(b) 虛部部分

Fig. 3.57 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

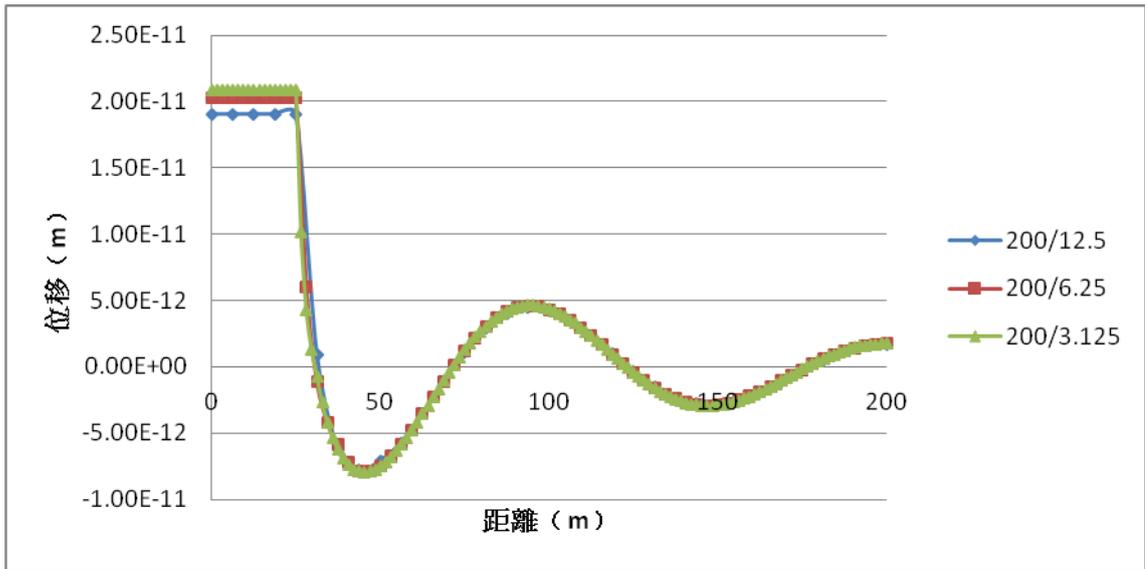


(a) 實部部分

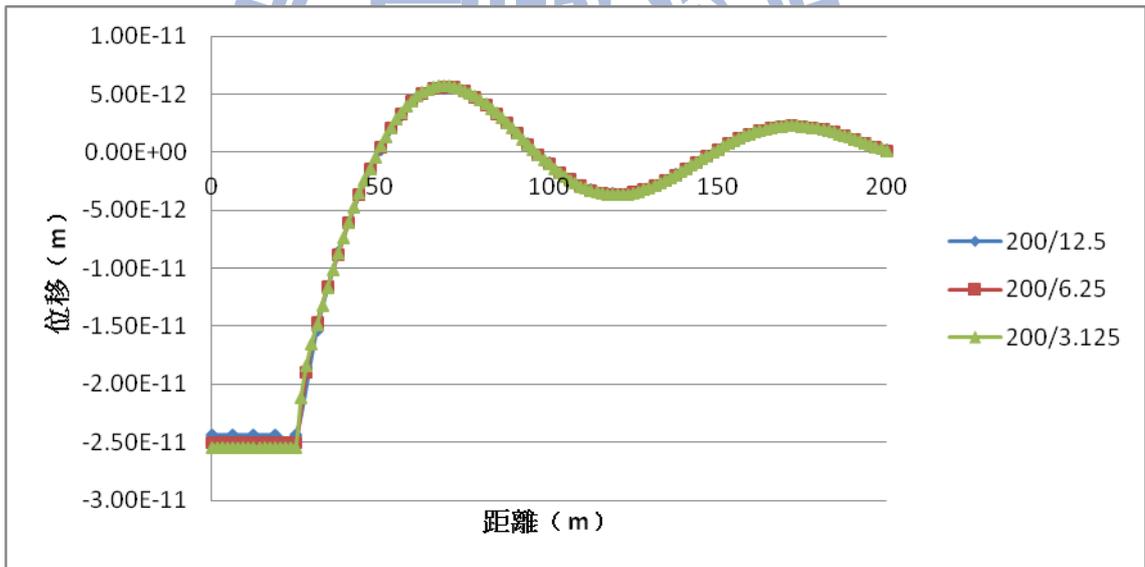


(b) 虛部部分

Fig. 3.58 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

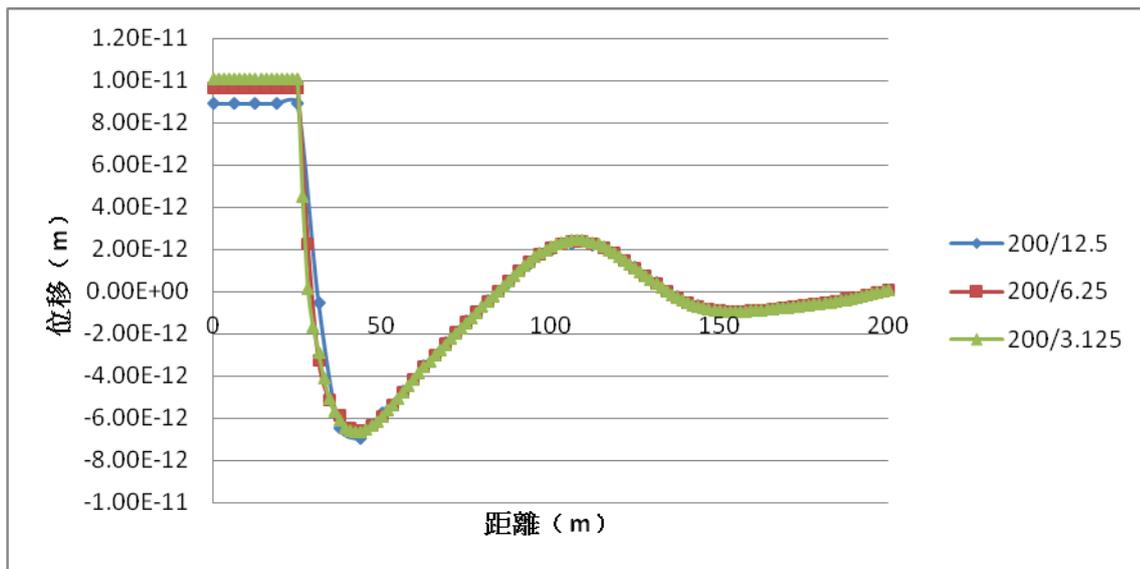


(a) 實部部分

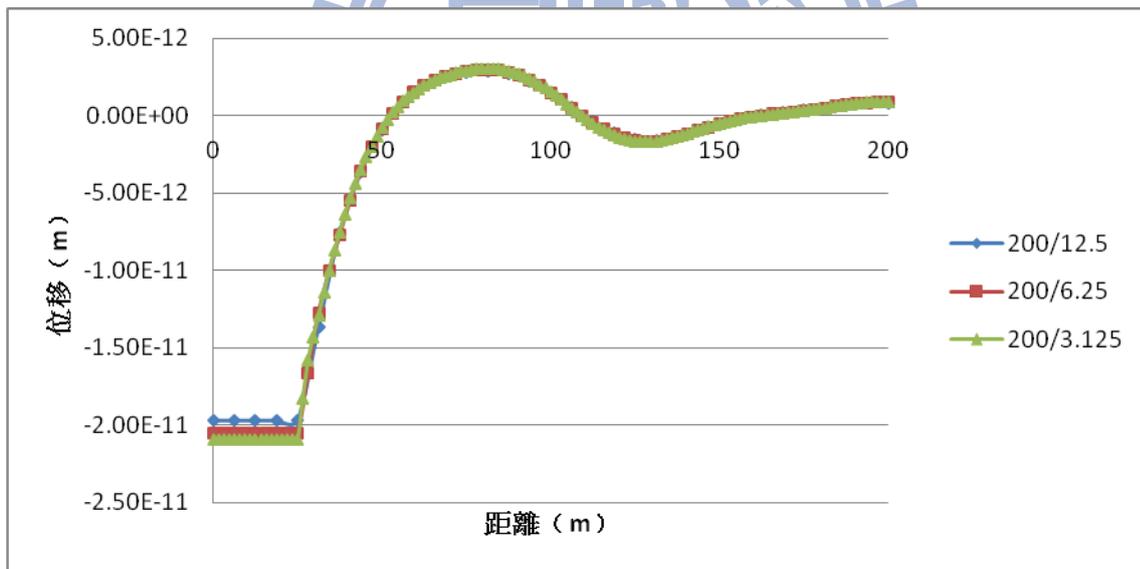


(b) 虛部部分

Fig. 3.59 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_θ)

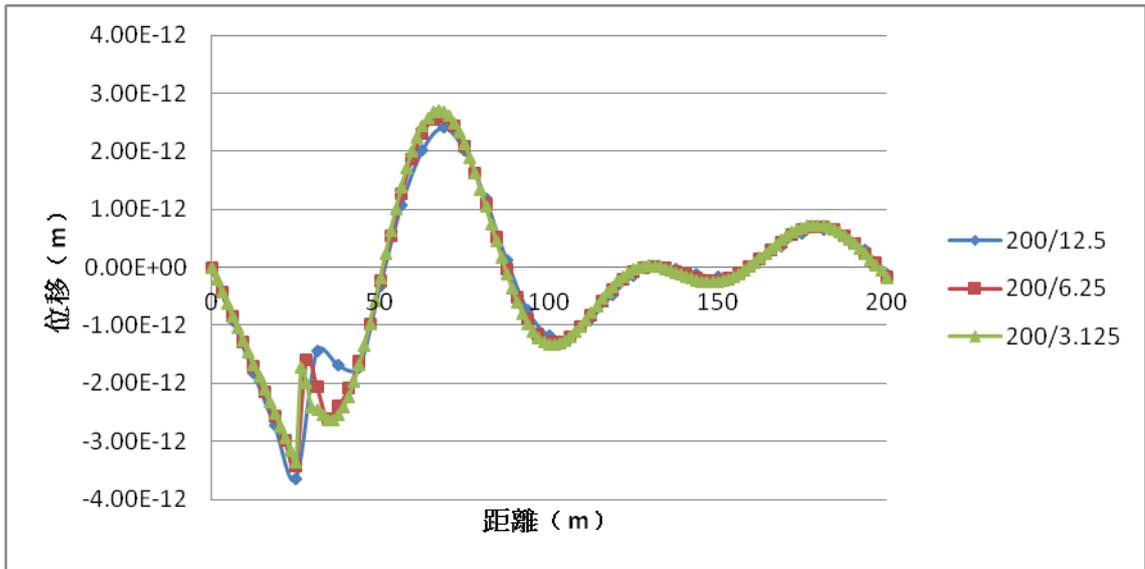


(a) 實部部分

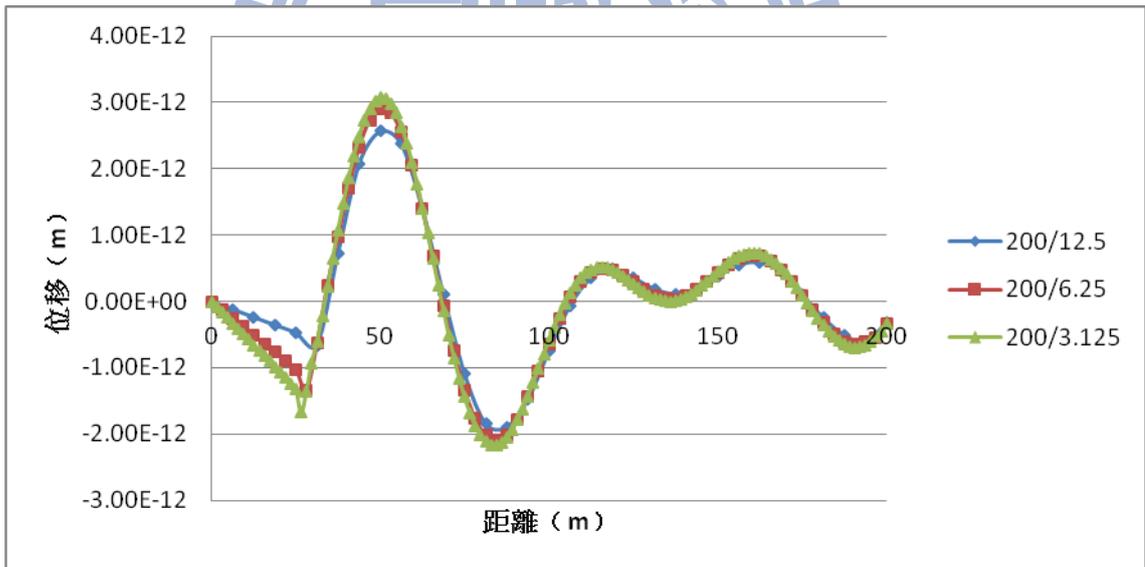


(b) 虛部部分

Fig. 3.60 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.61 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)

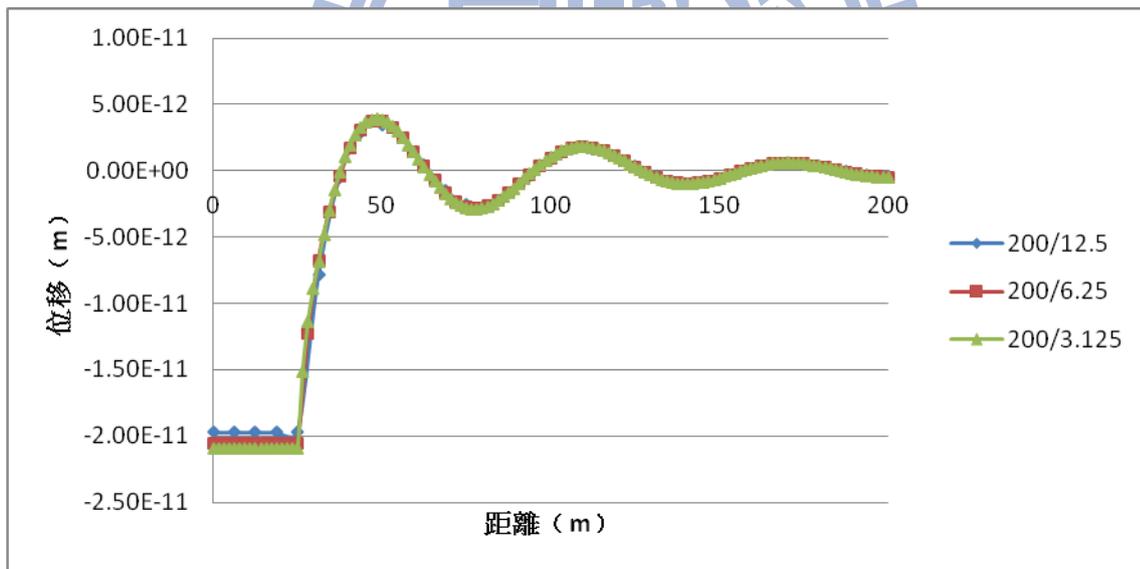
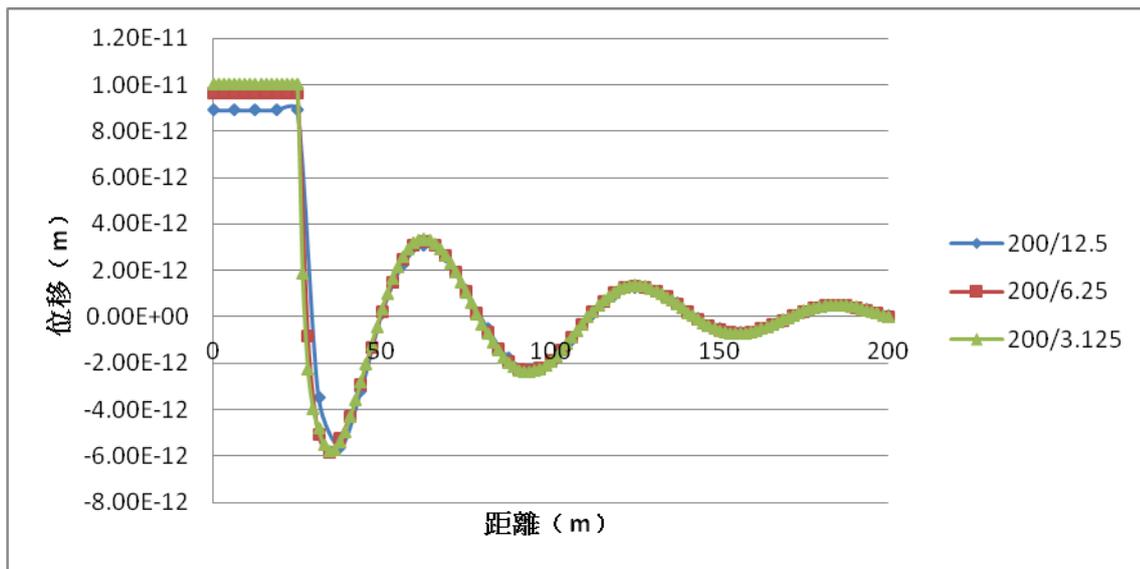
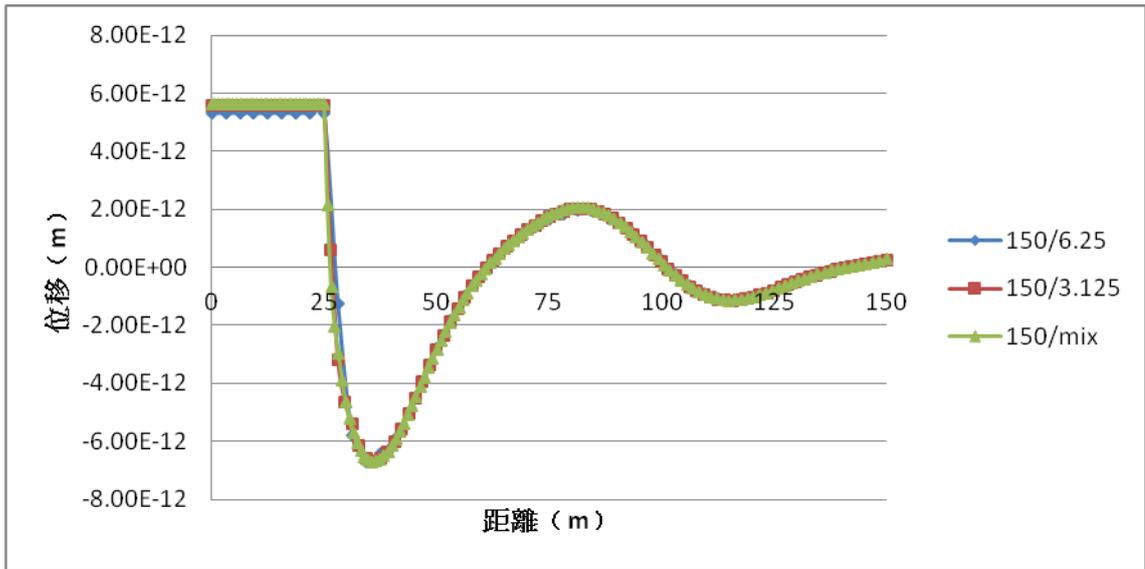
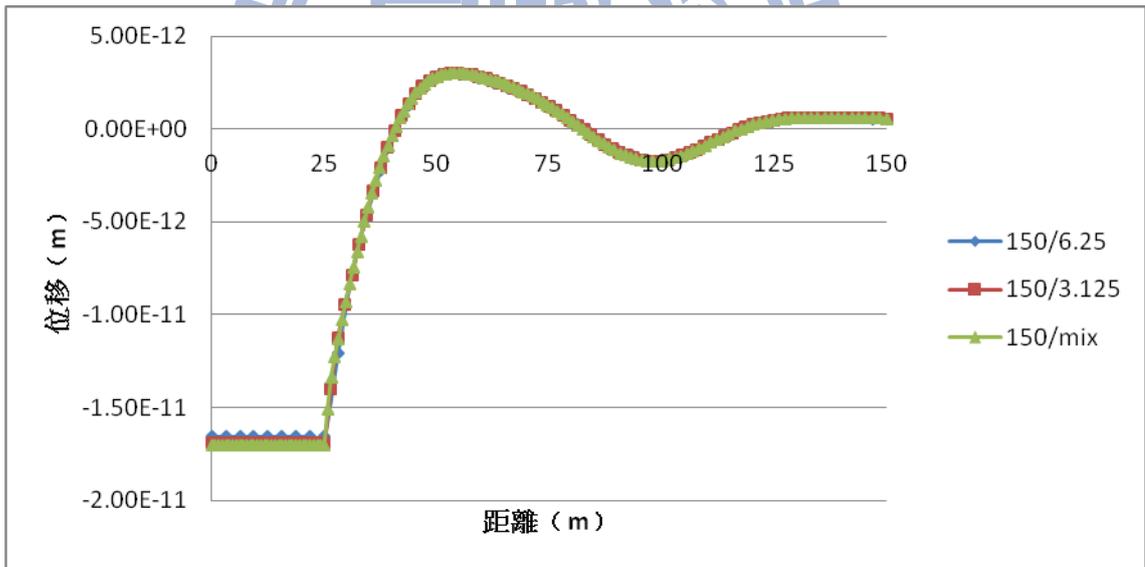


Fig. 3.62 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ)

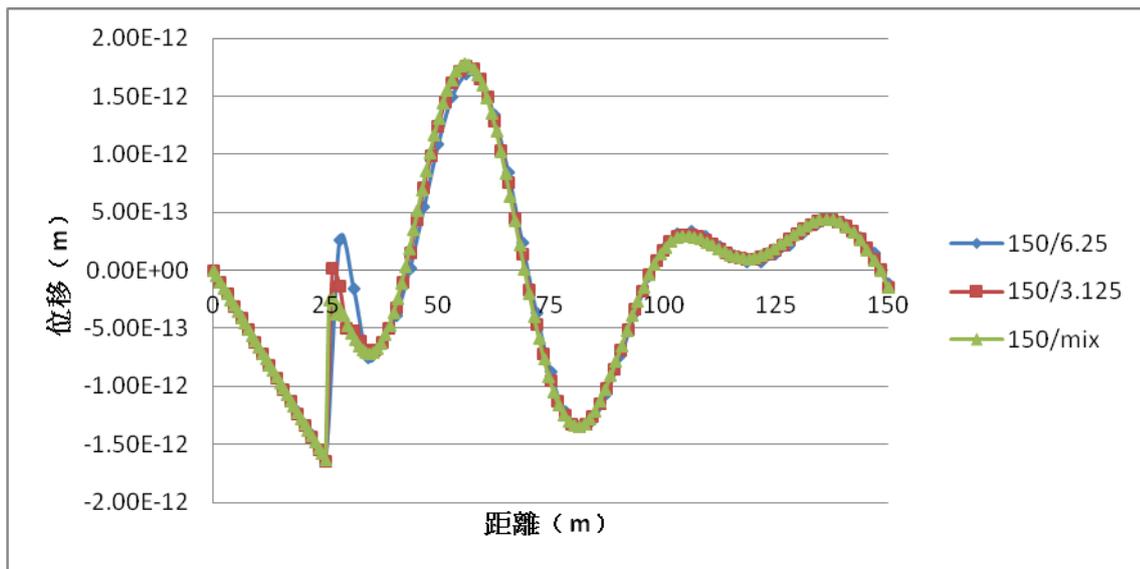


(a) 實部部分

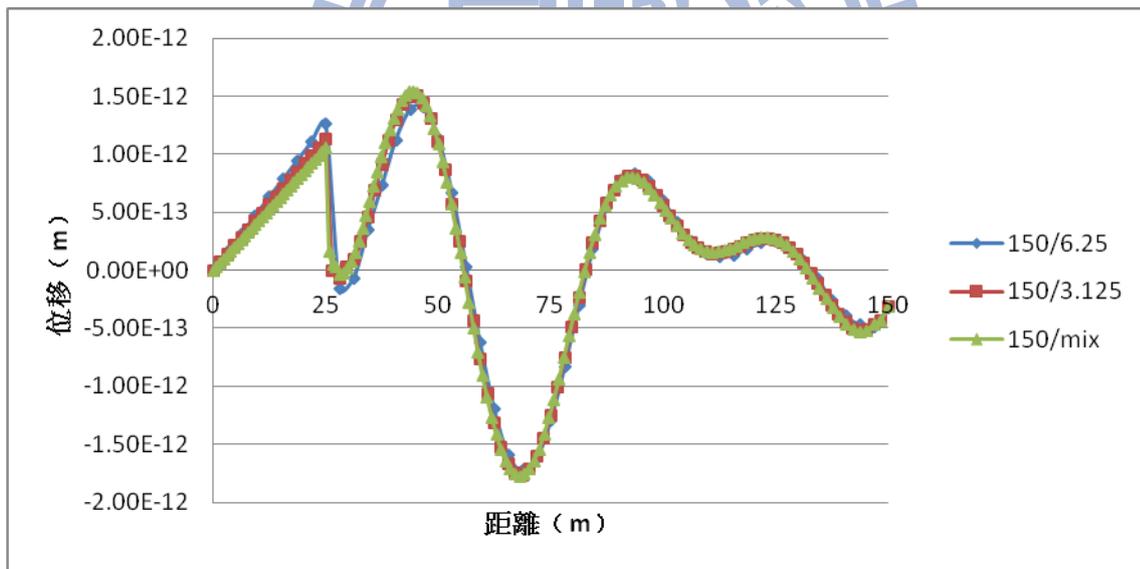


(b) 虛部部分

Fig. 3.63 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

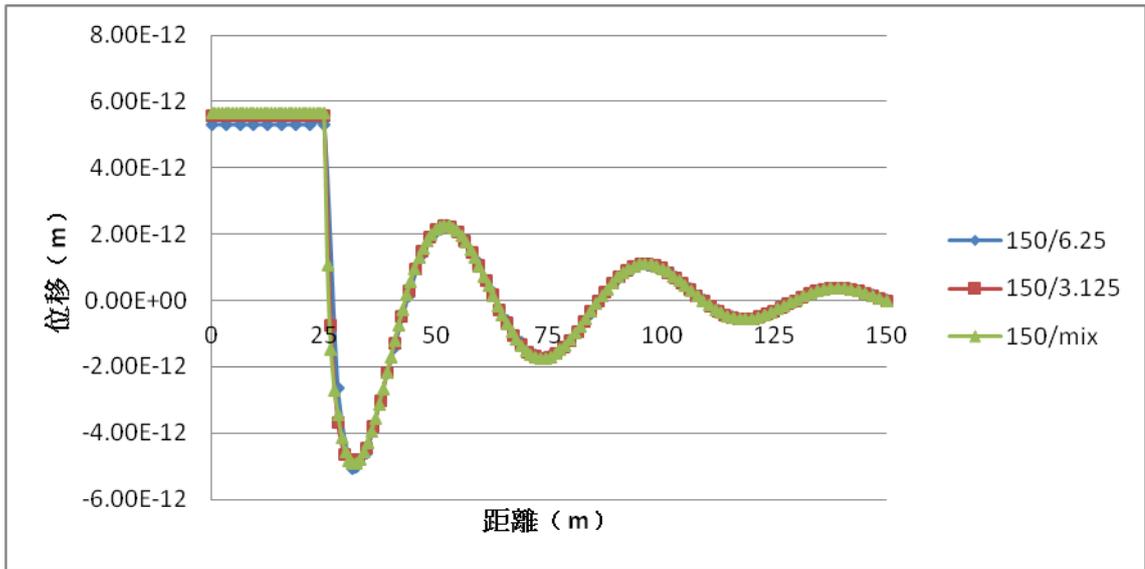


(a) 實部部分

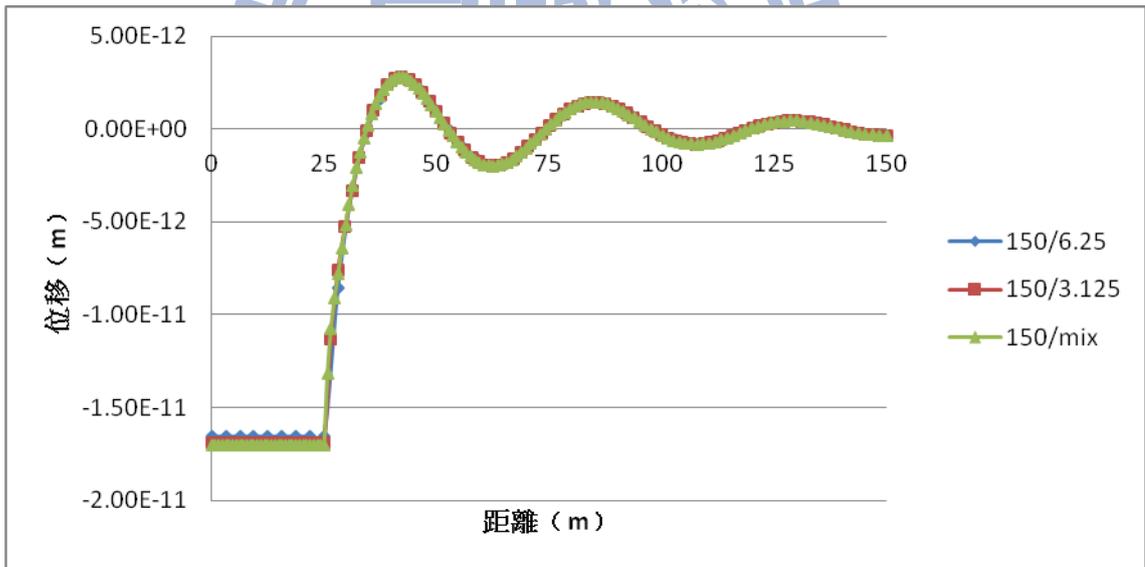


(b) 虛部部分

Fig. 3.64 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

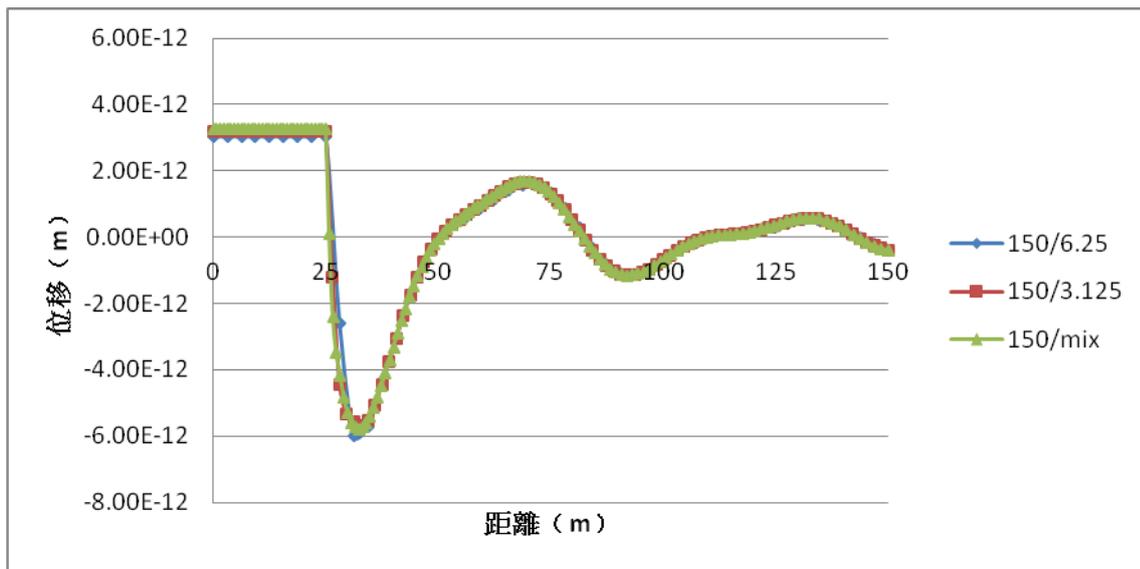


(a) 實部部分

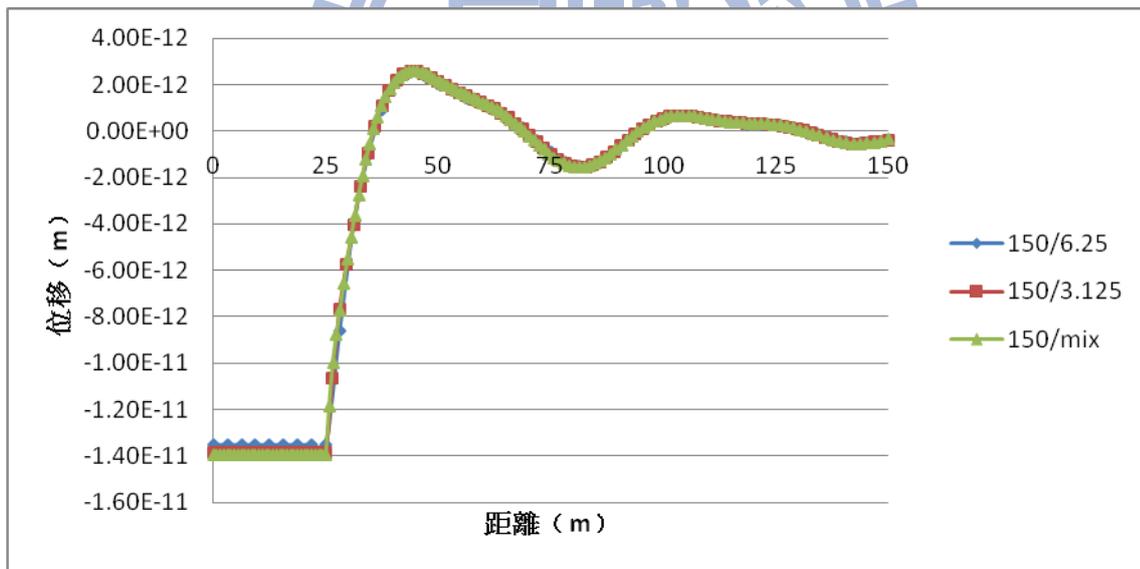


(b) 虛部部分

Fig. 3.65 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.66 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

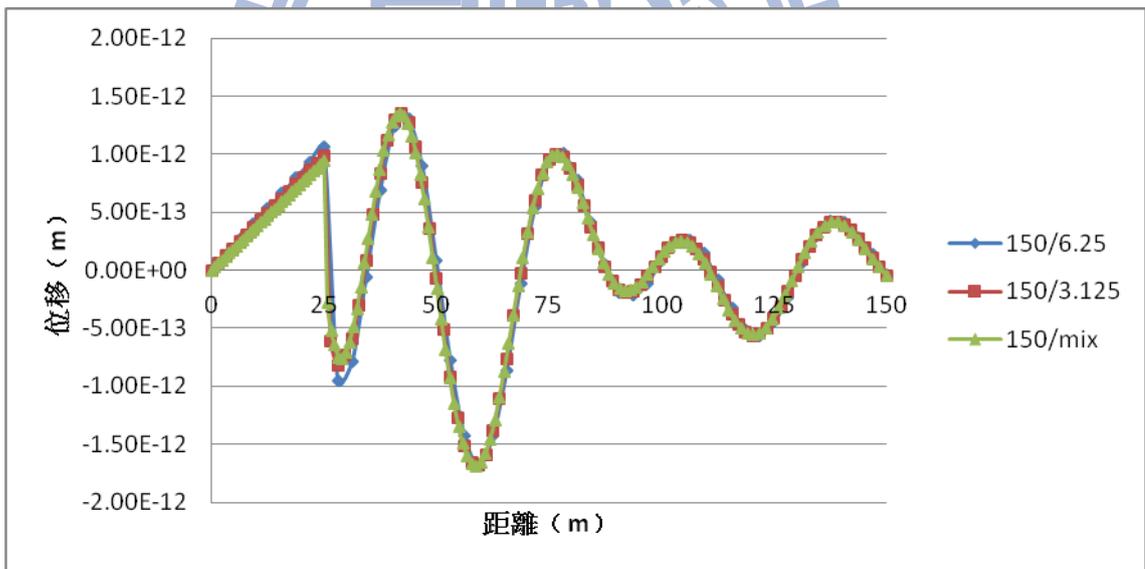
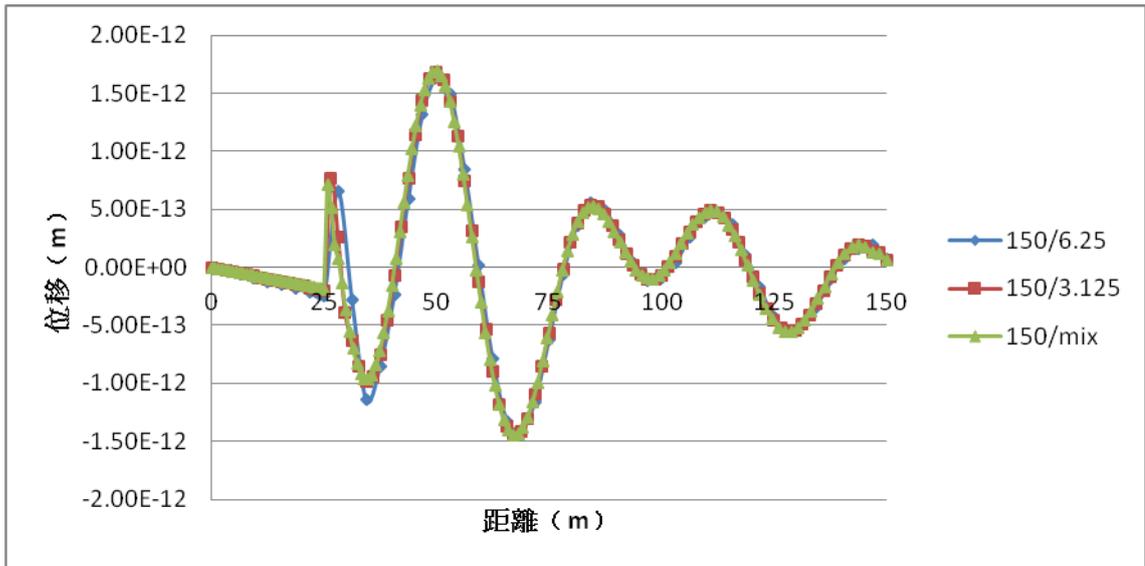
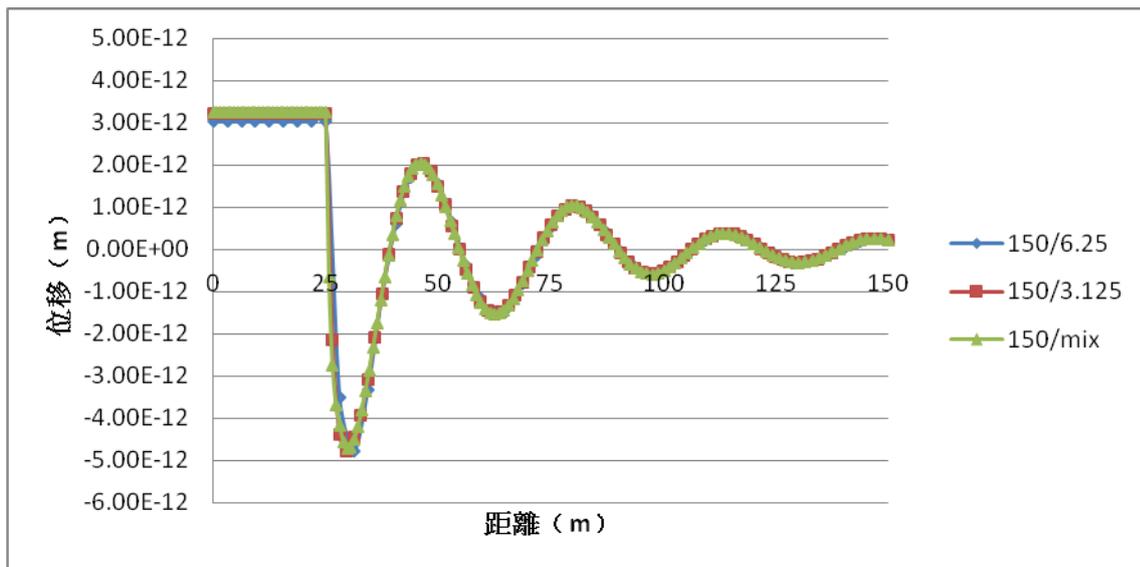
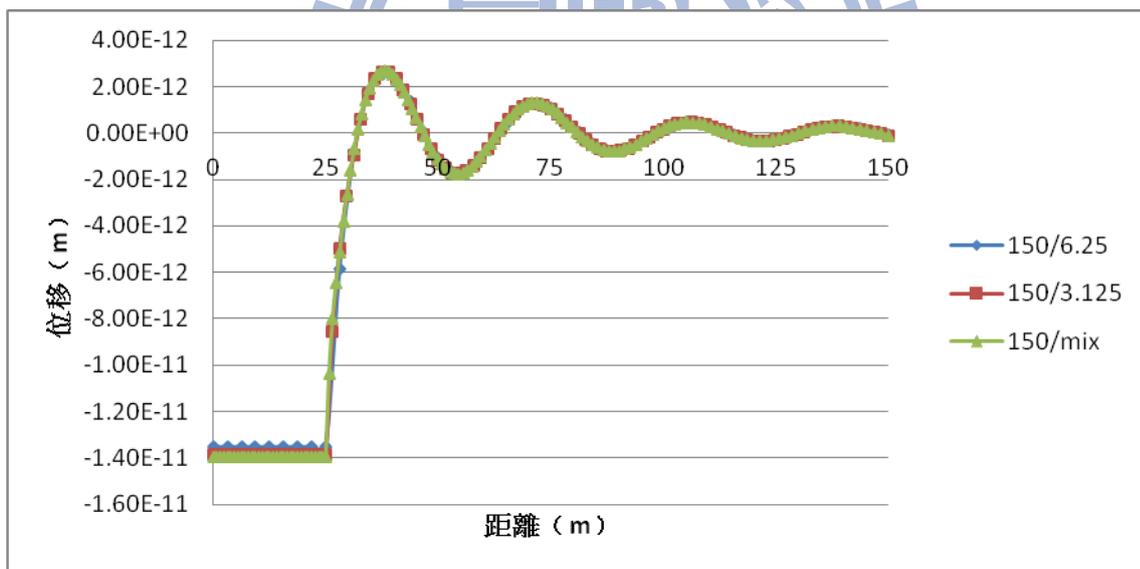


Fig. 3.67 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

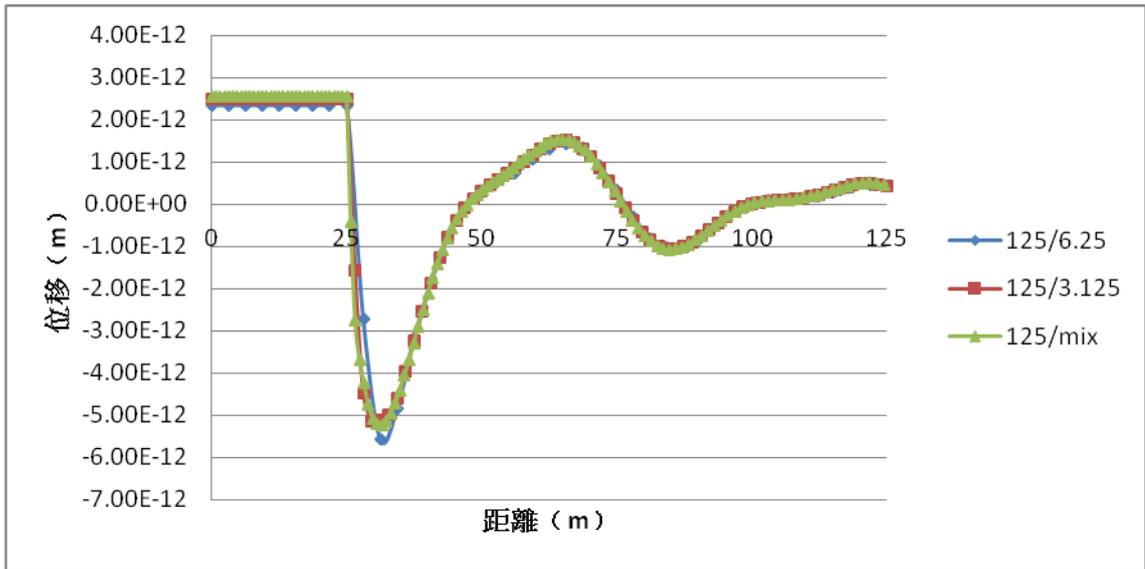


(a) 實部部分

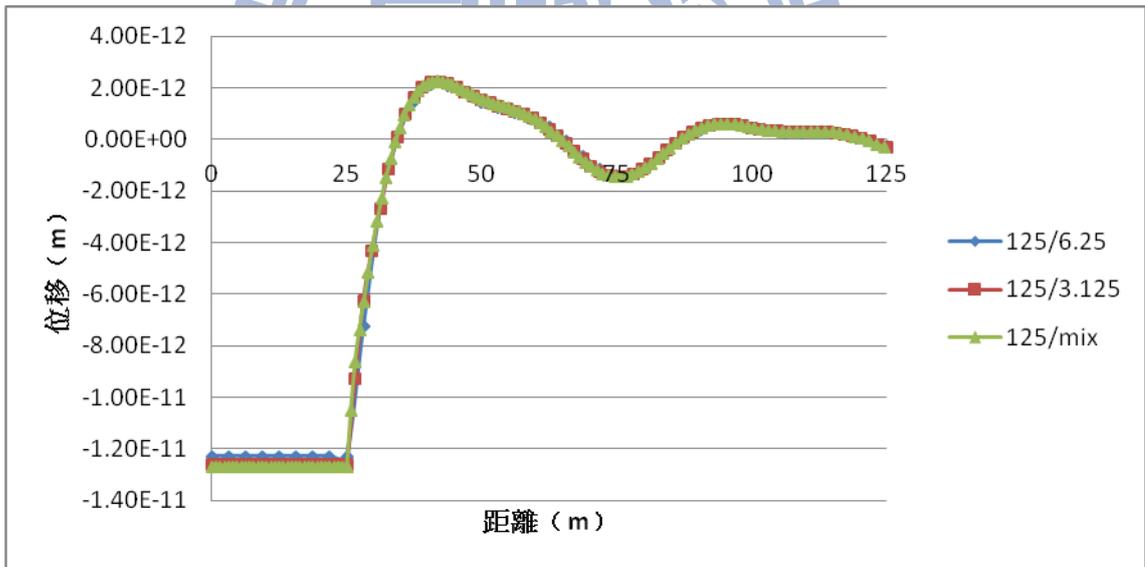


(b) 虛部部分

Fig. 3.68 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ)

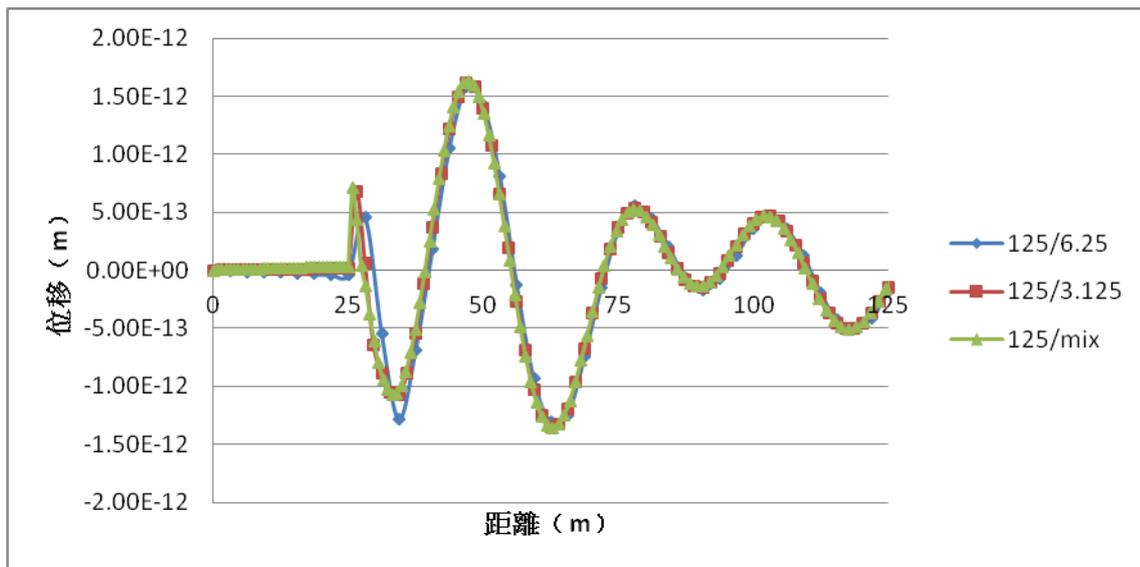


(a) 實部部分

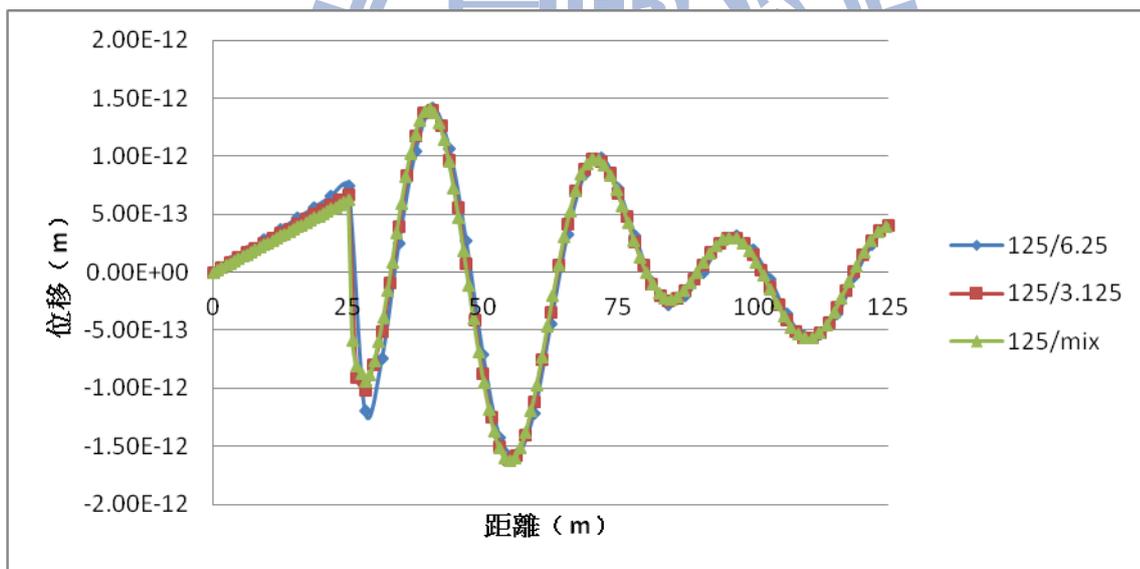


(b) 虛部部分

Fig. 3.69 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)

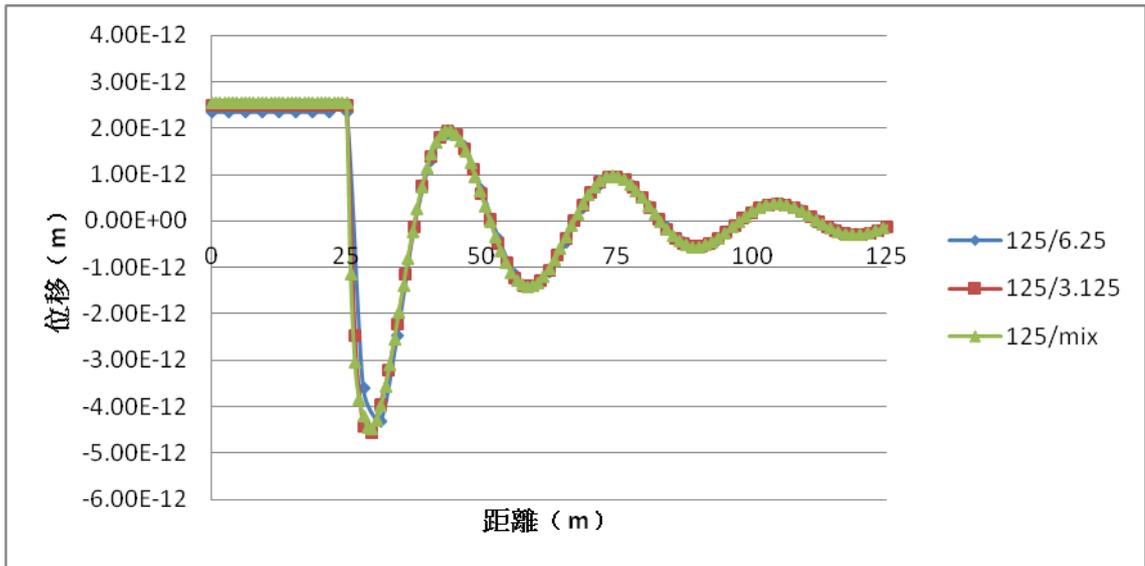


(a) 實部部分

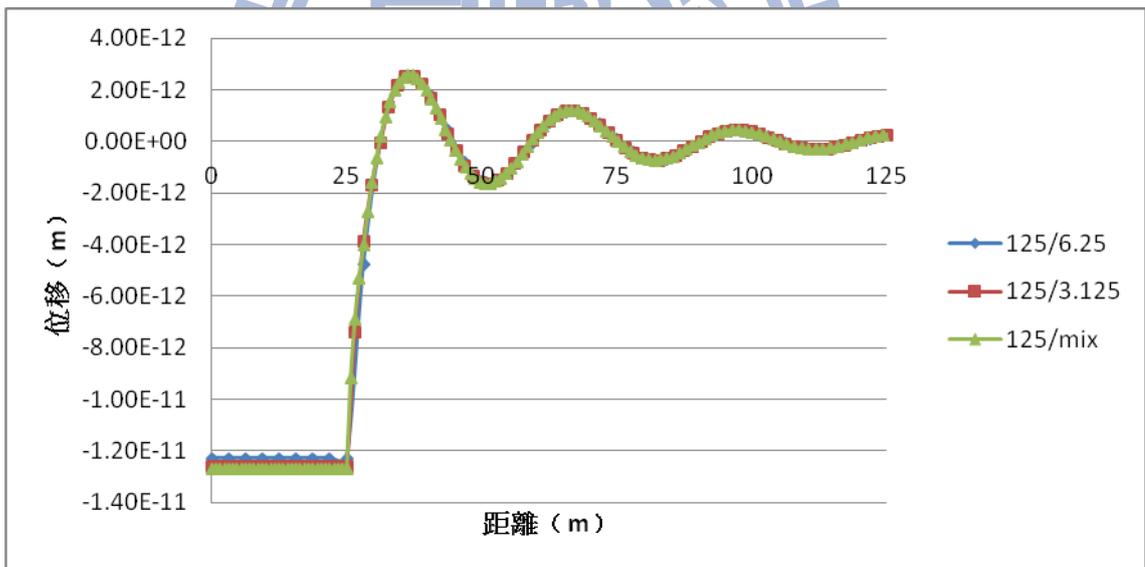


(b) 虛部部分

Fig. 3.70 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

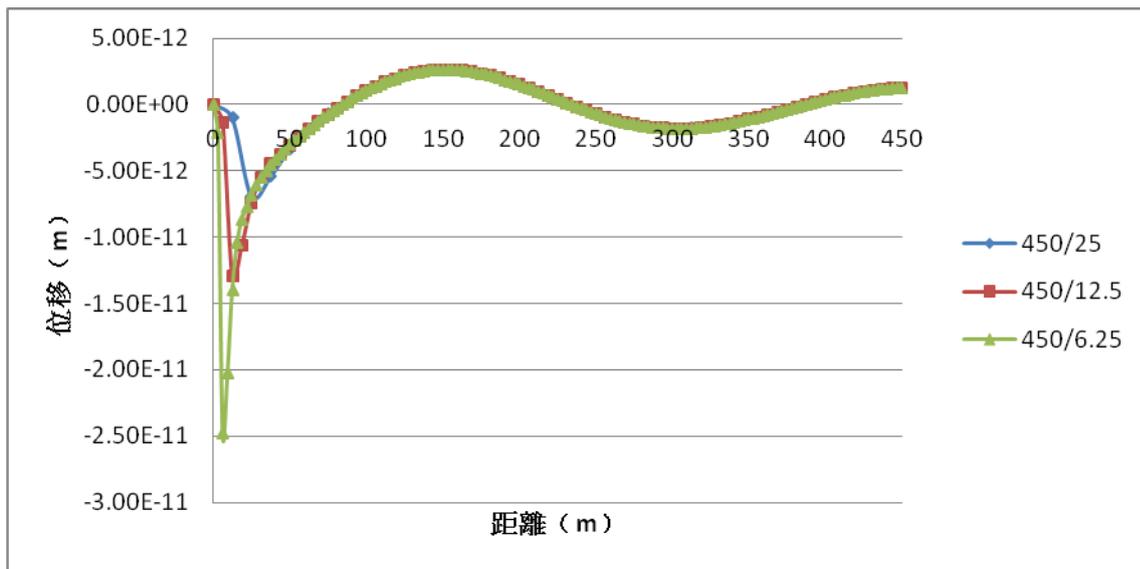


(a) 實部部分

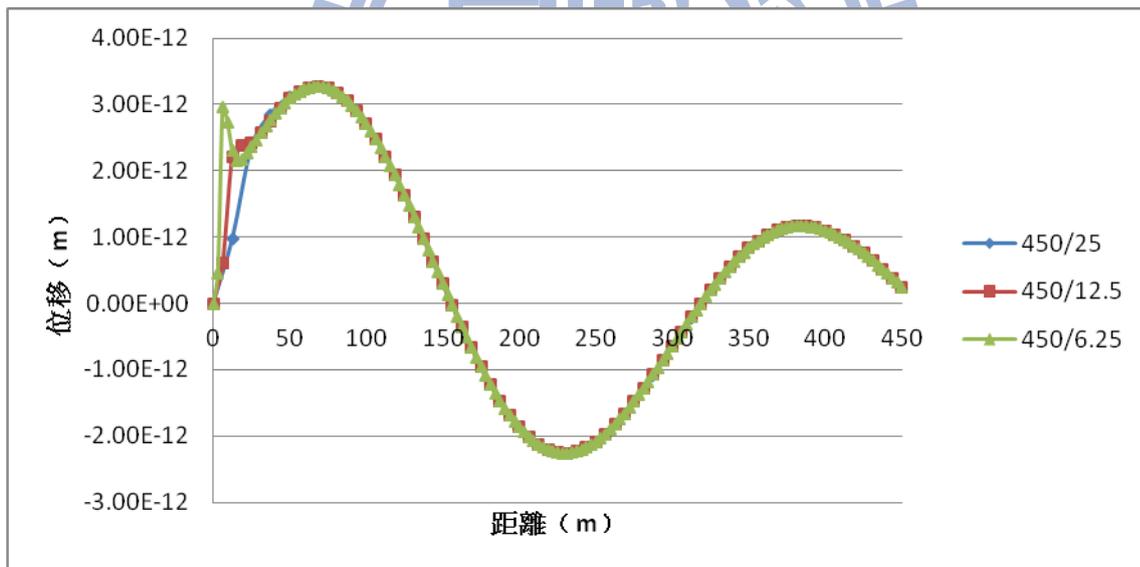


(b) 虛部部分

Fig. 3.71 模型二之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ)

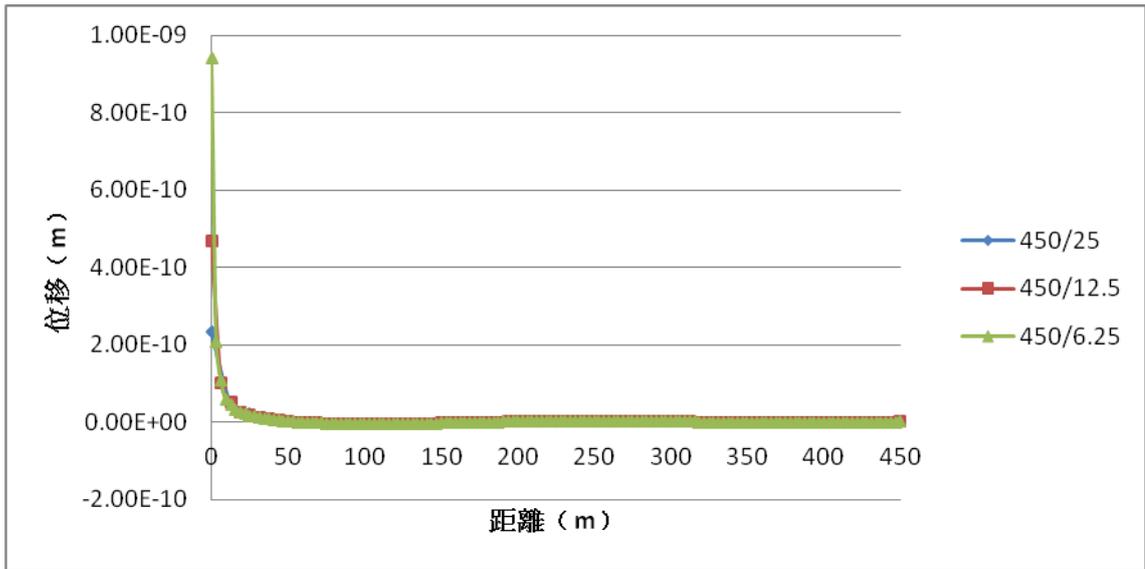


(a) 實部部分

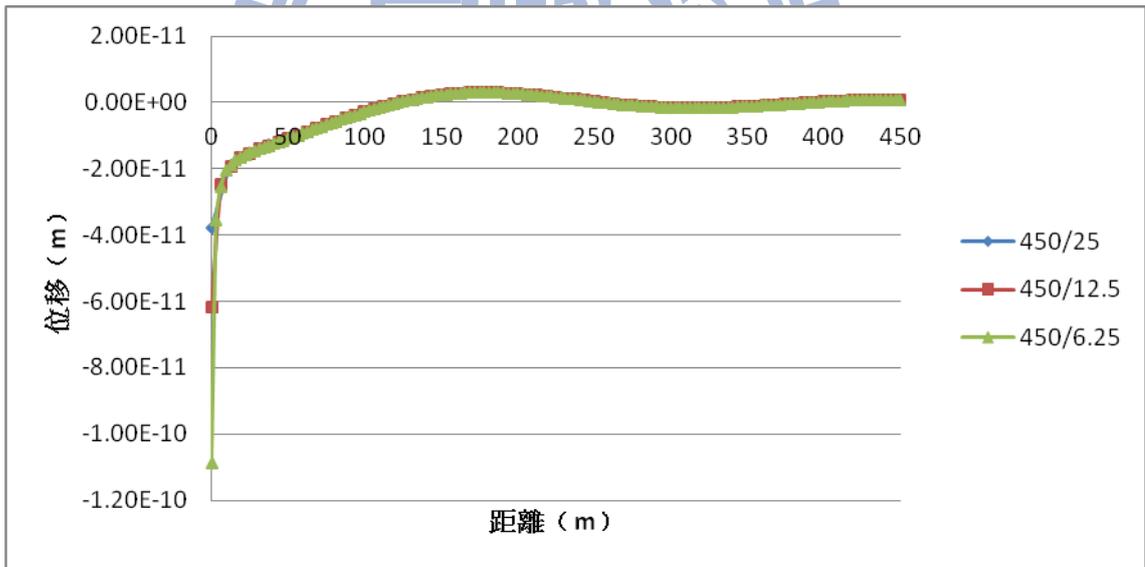


(b) 虛部部分

Fig. 3.72 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

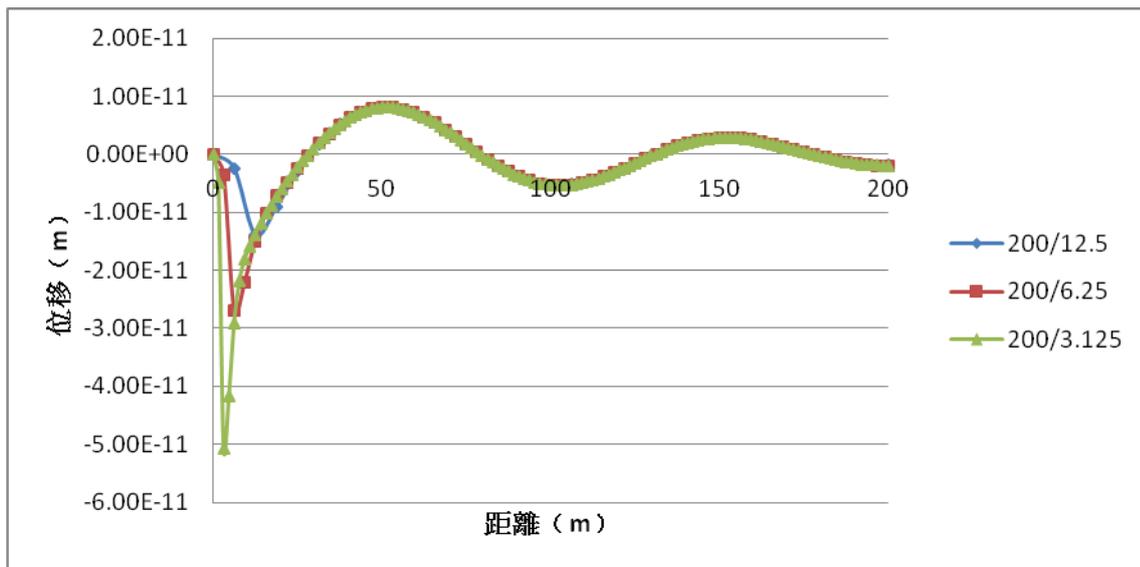


(a) 實部部分

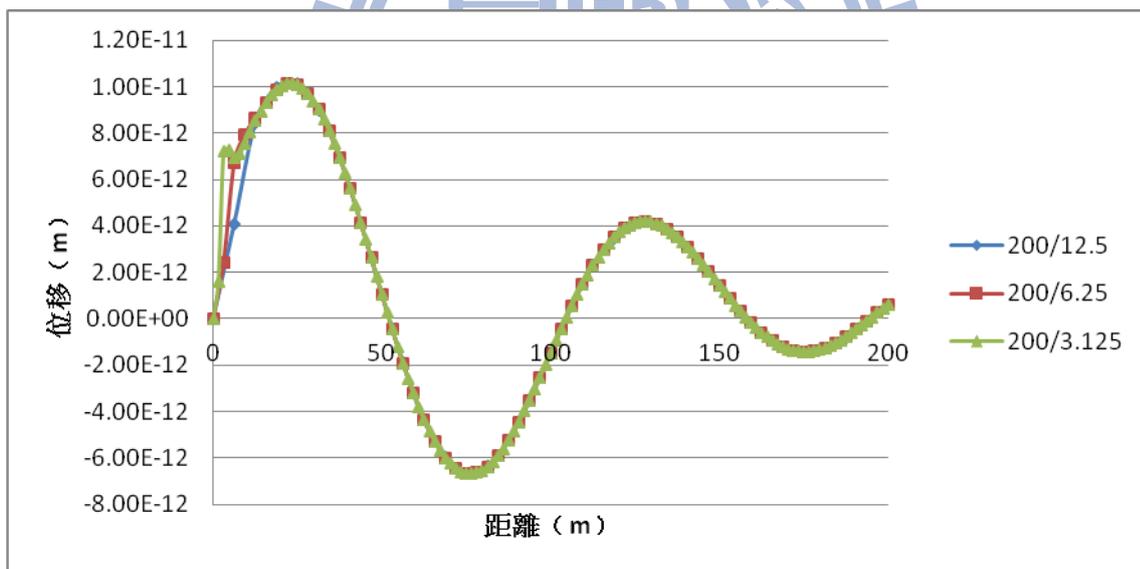


(b) 虛部部分

Fig. 3.73 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.74 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

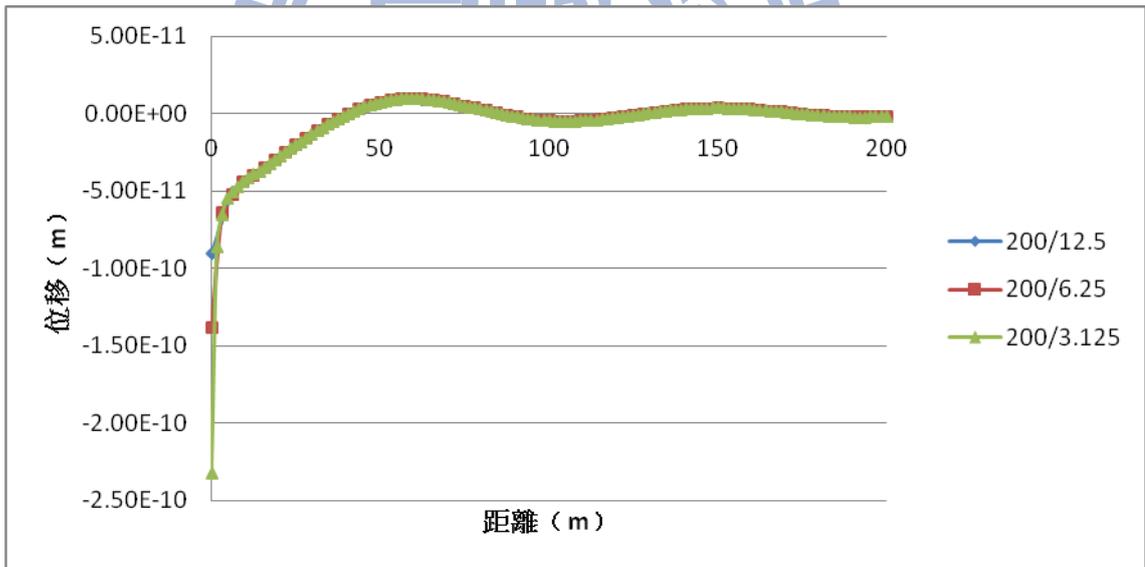
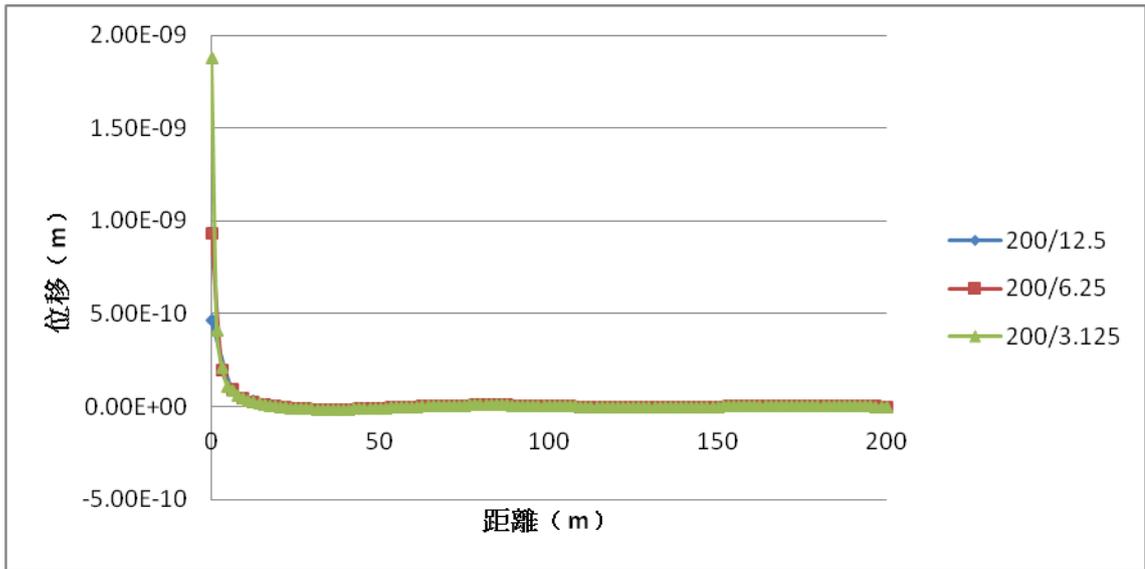
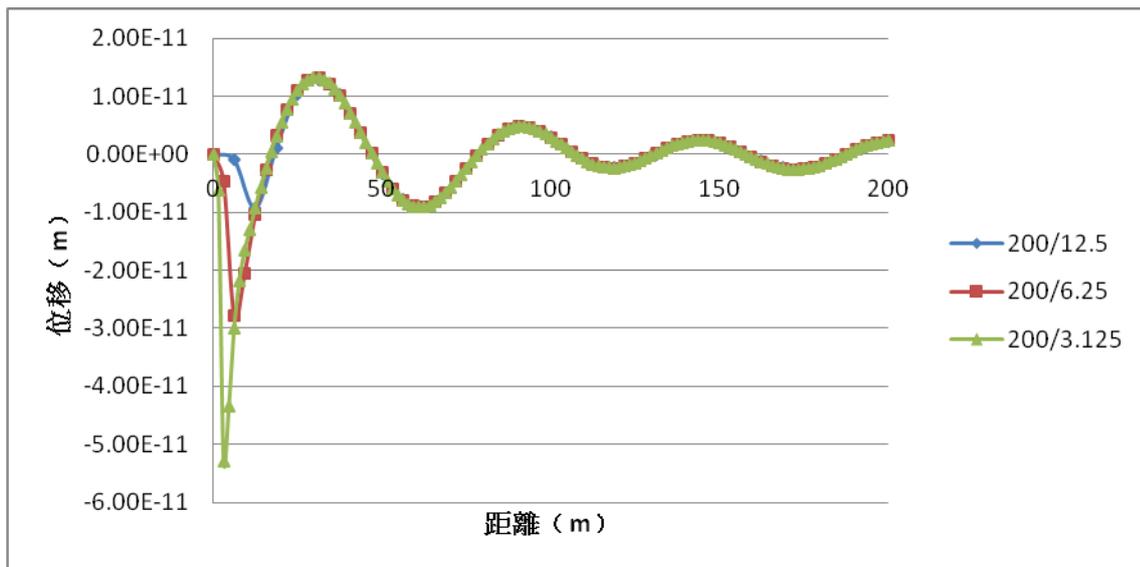
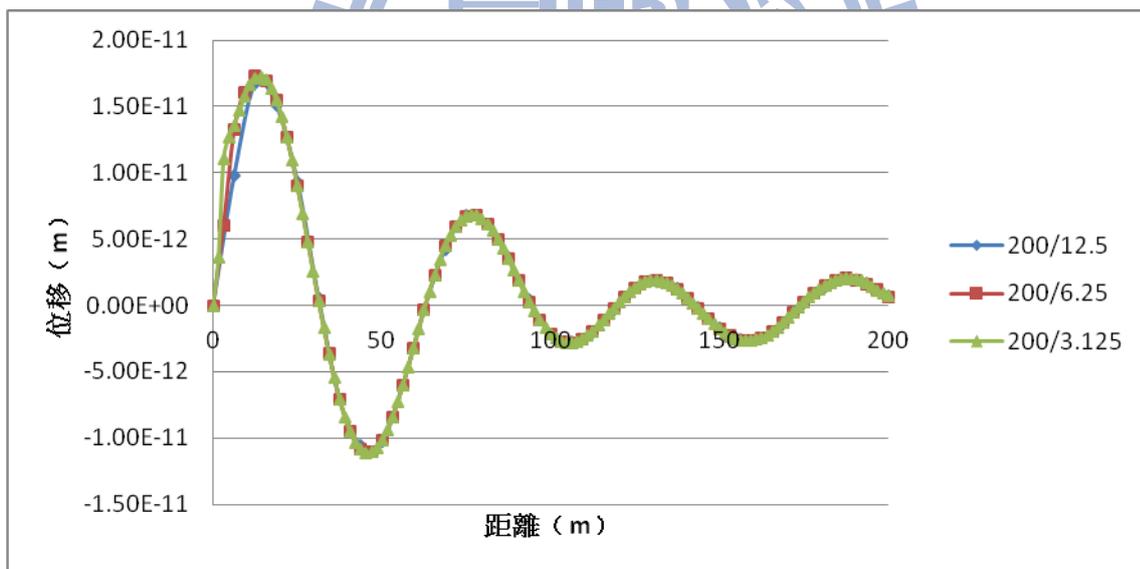


Fig. 3.75 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

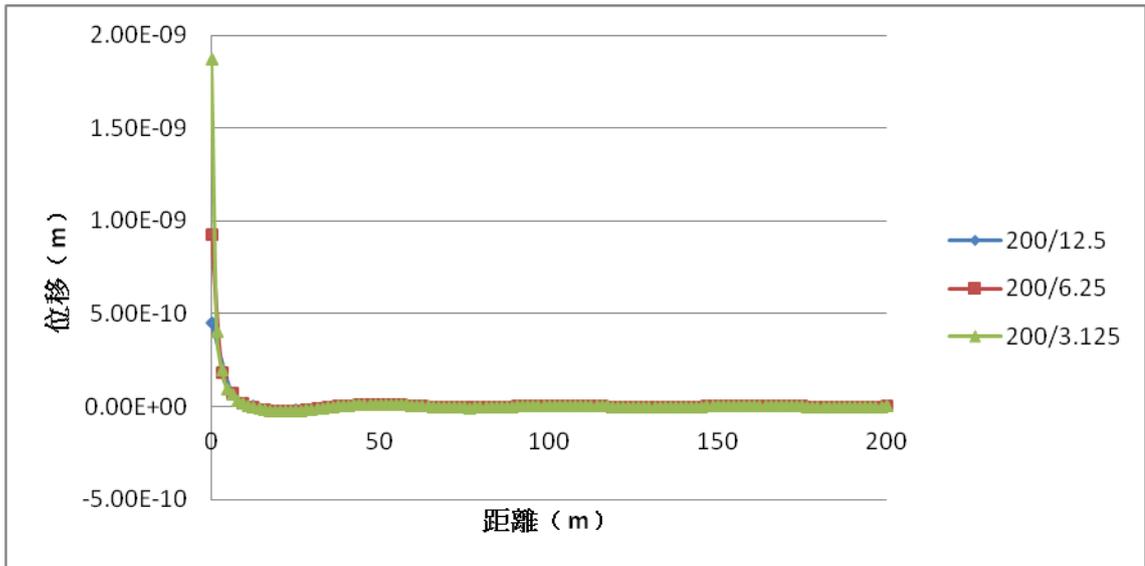


(a) 實部部分

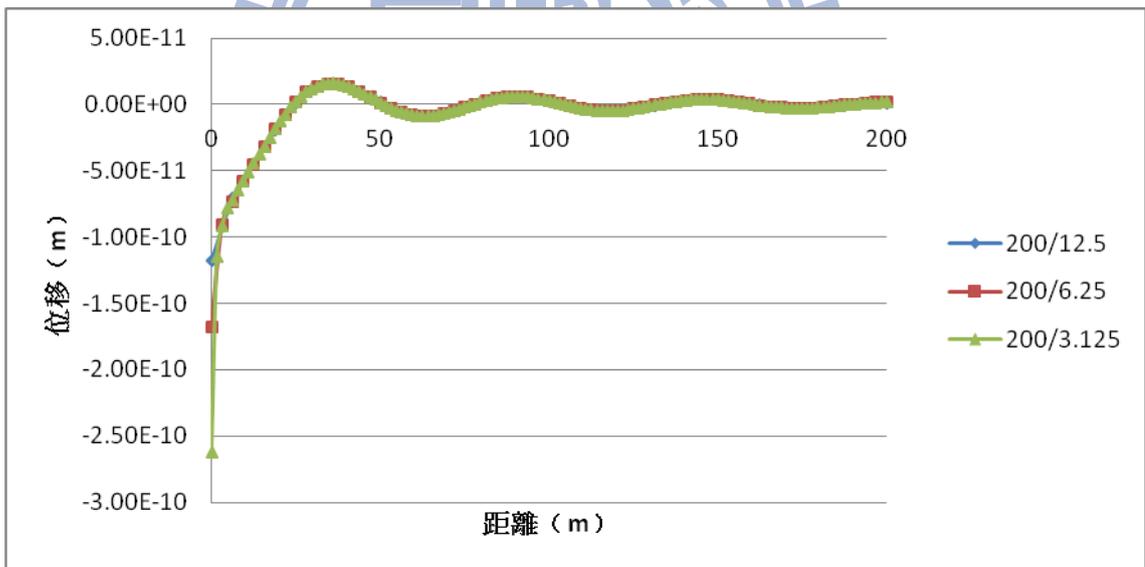


(b) 虛部部分

Fig. 3.76 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

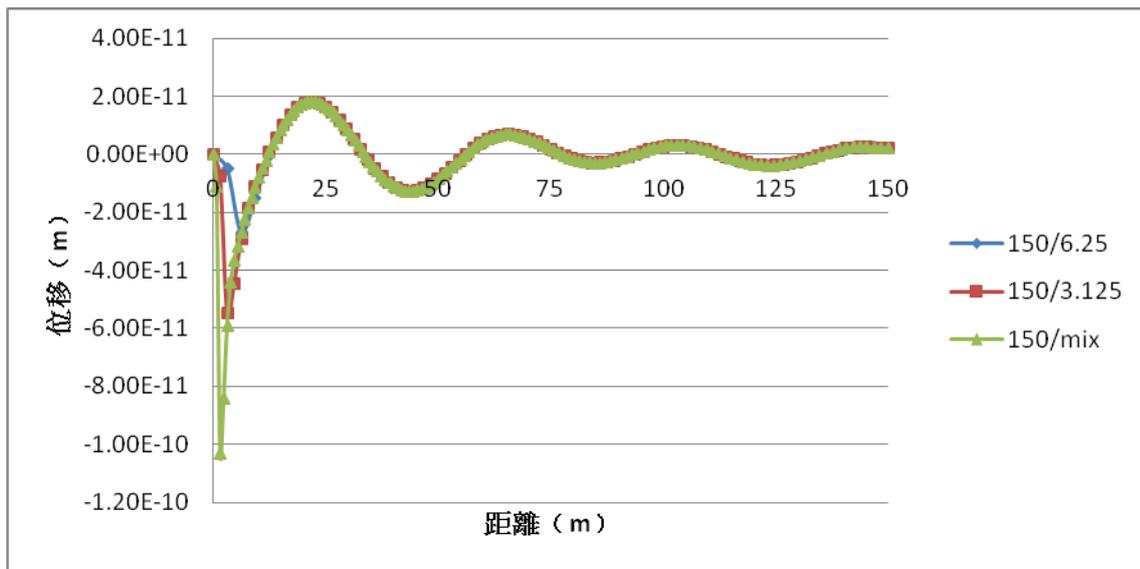


(a) 實部部分

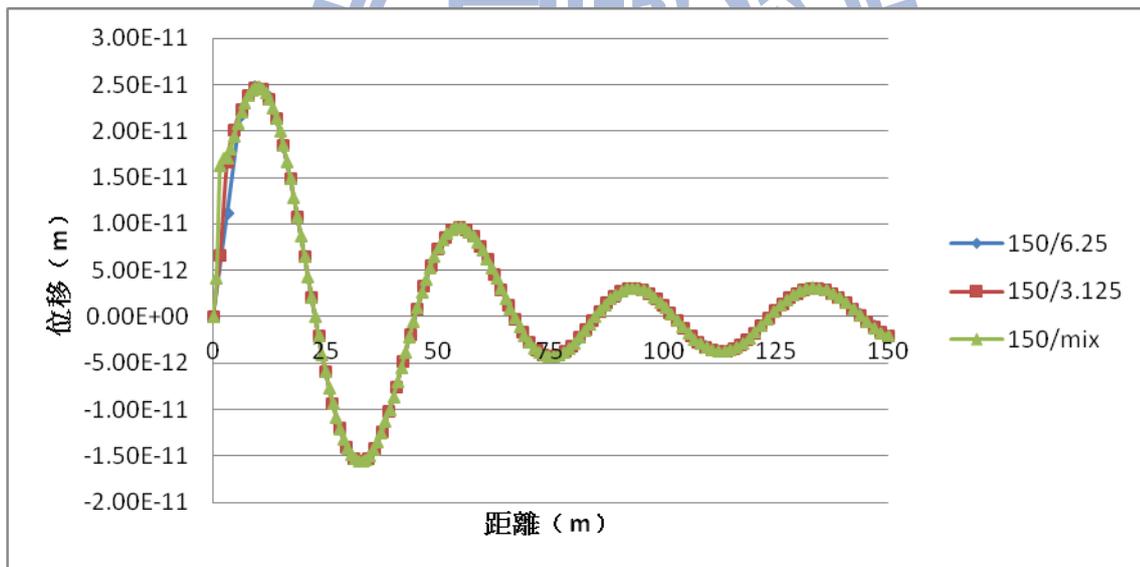


(b) 虛部部分

Fig. 3.77 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.78 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

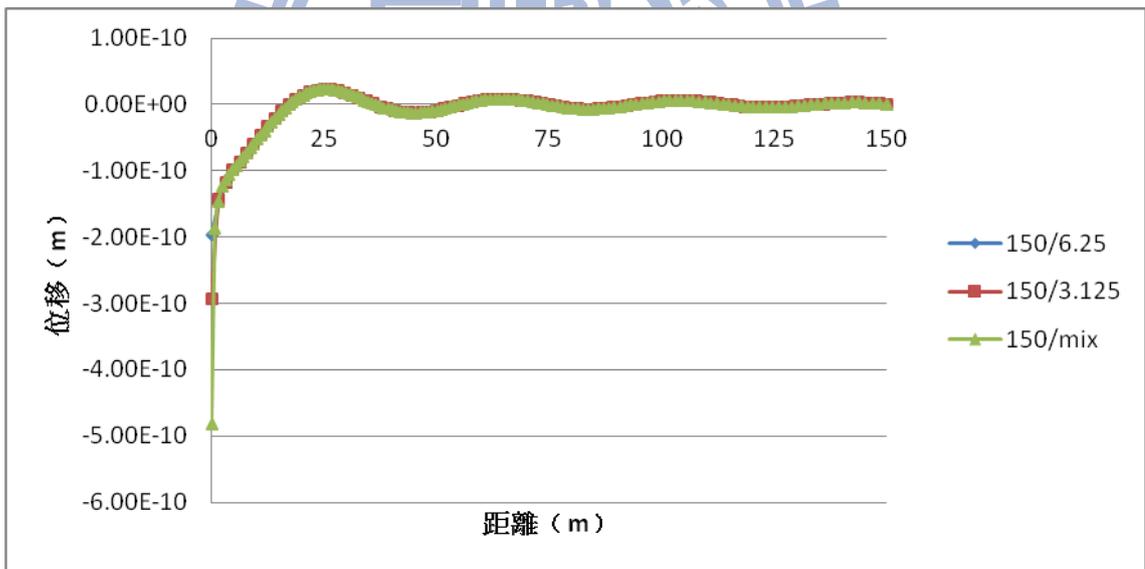
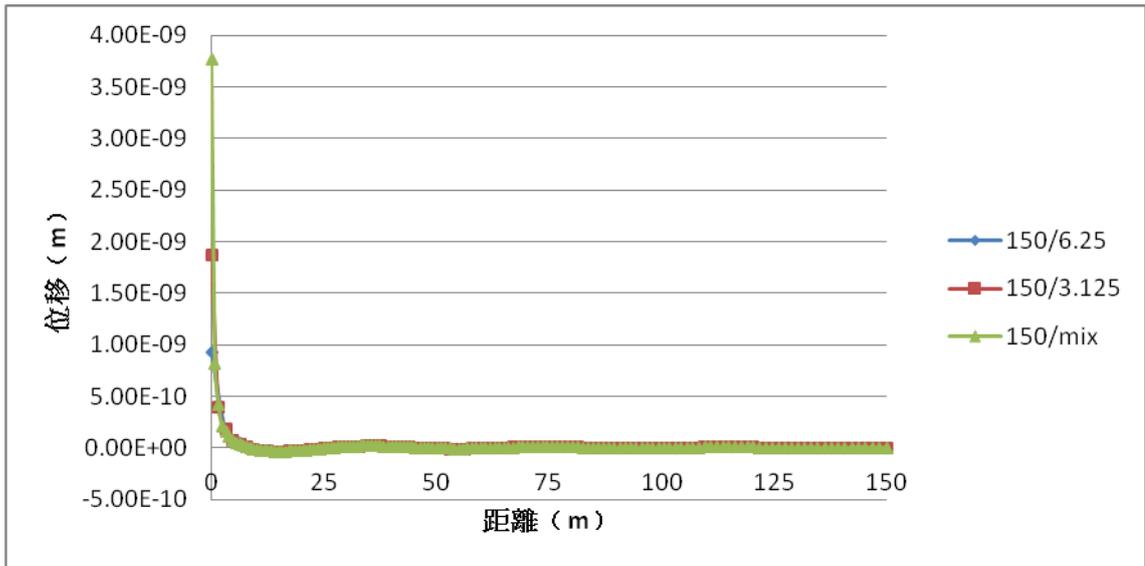
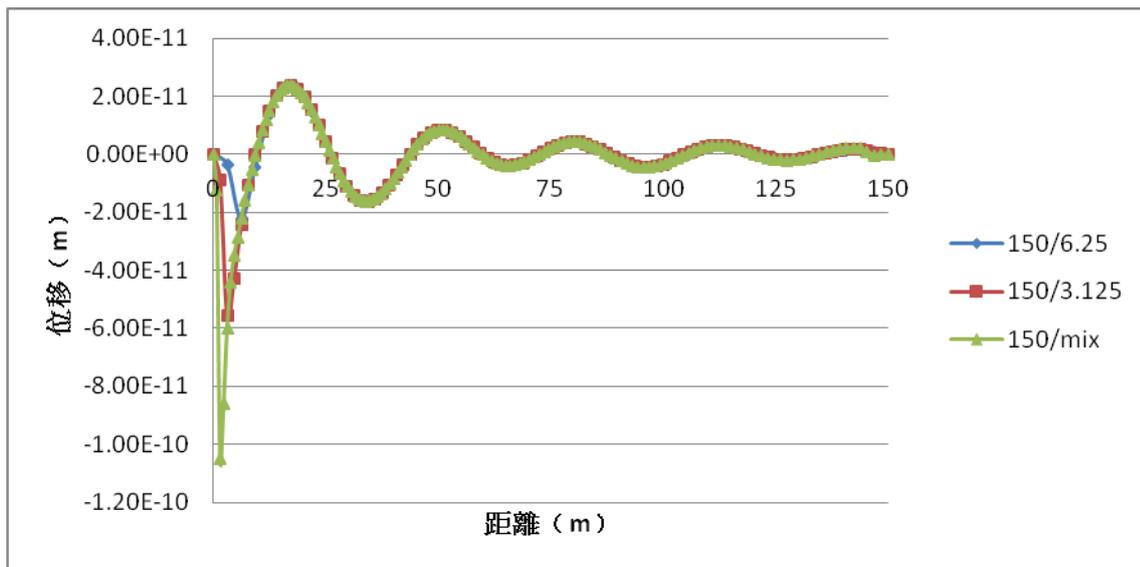
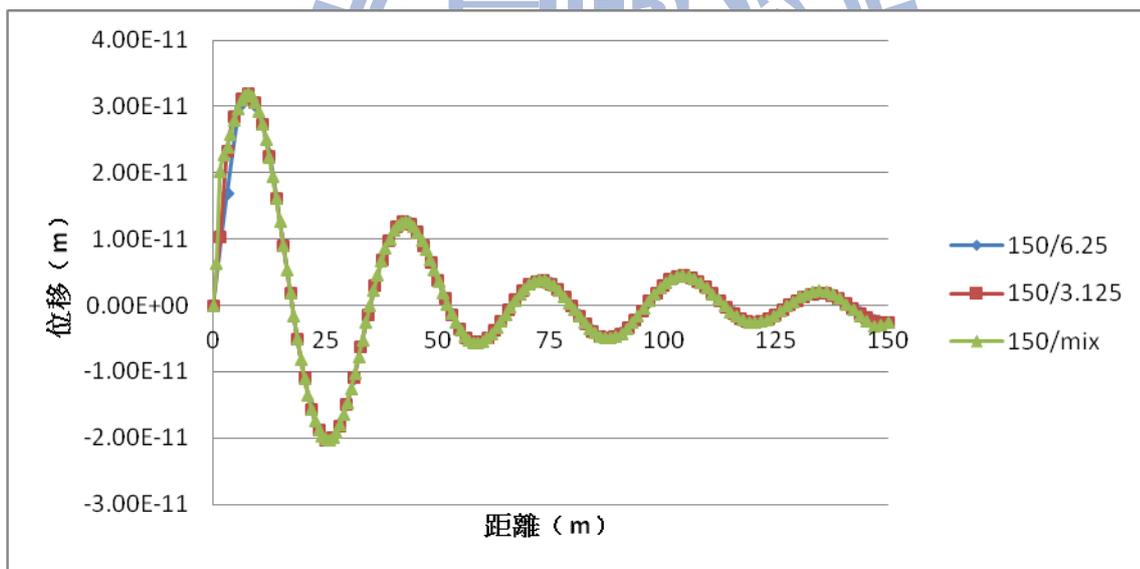


Fig. 3.79 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

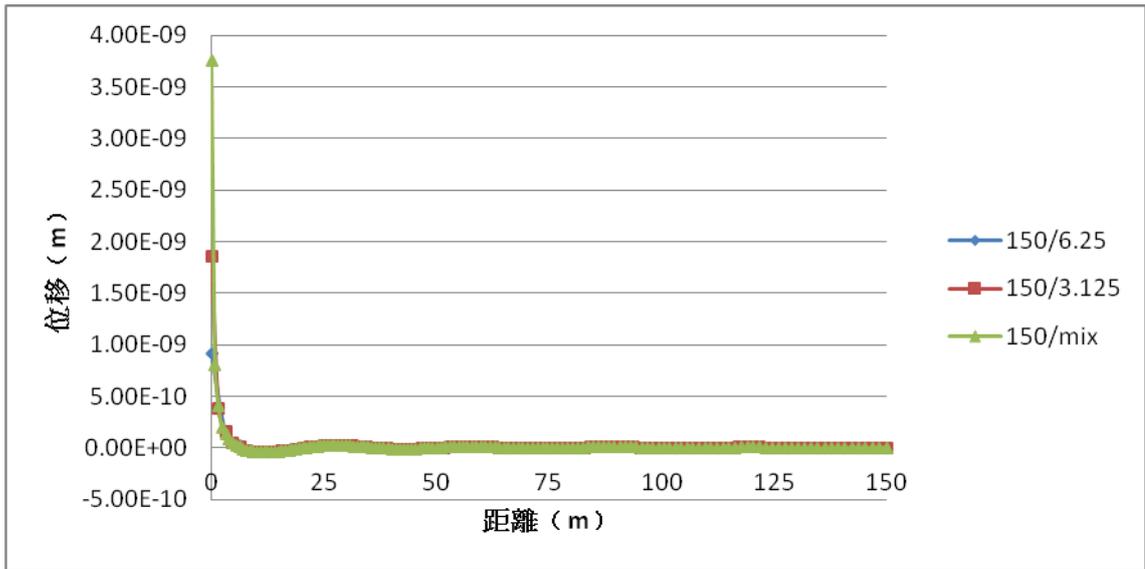


(a) 實部部分

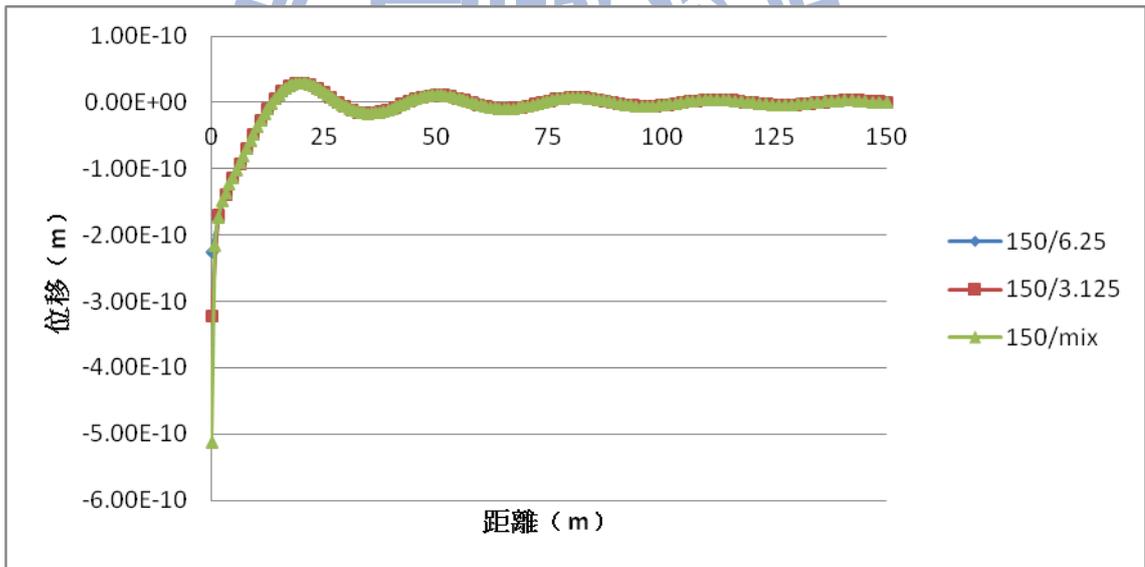


(b) 虛部部分

Fig. 3.80 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

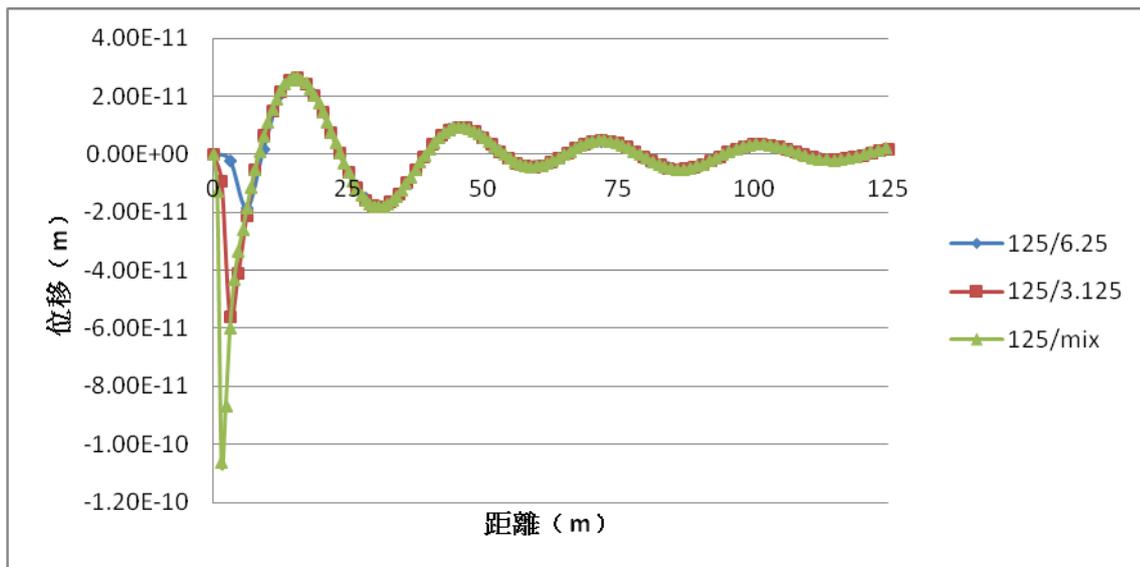


(a) 實部部分

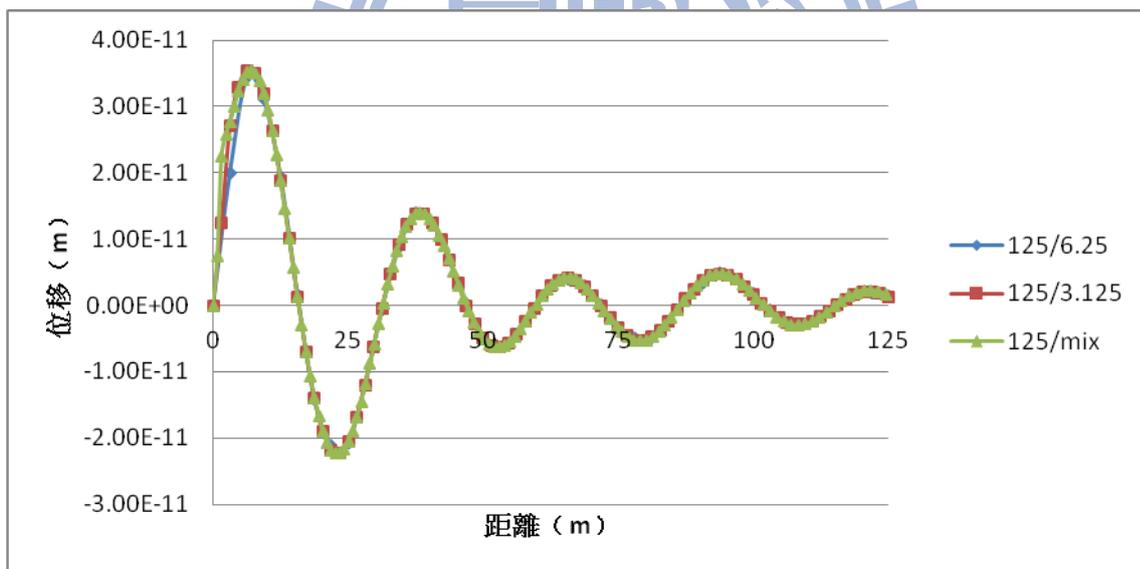


(b) 虛部部分

Fig. 3.81 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

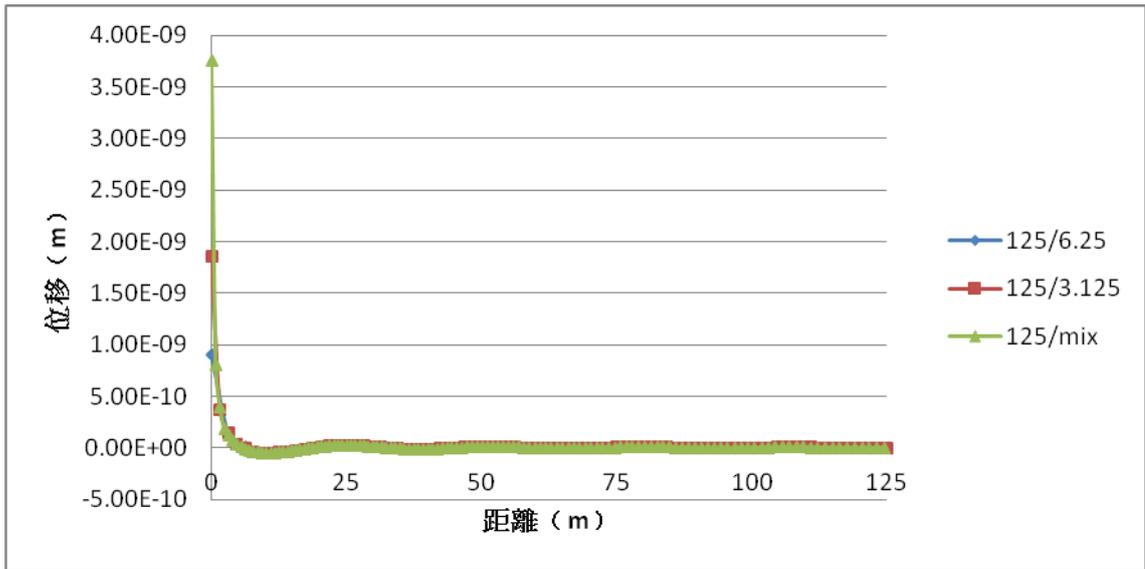


(a) 實部部分

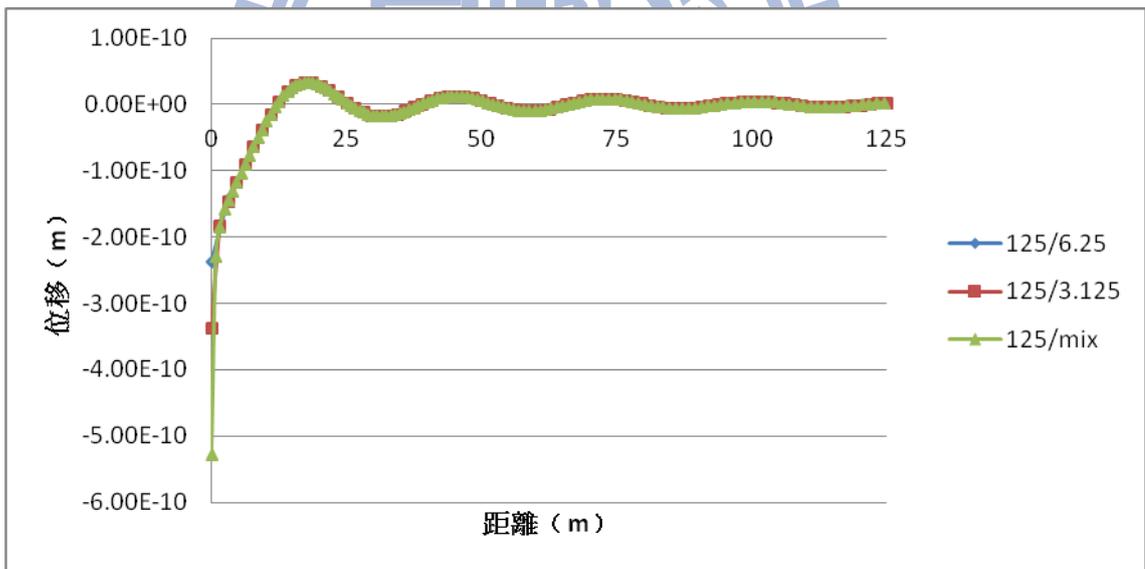


(b) 虛部部分

Fig. 3.82 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)

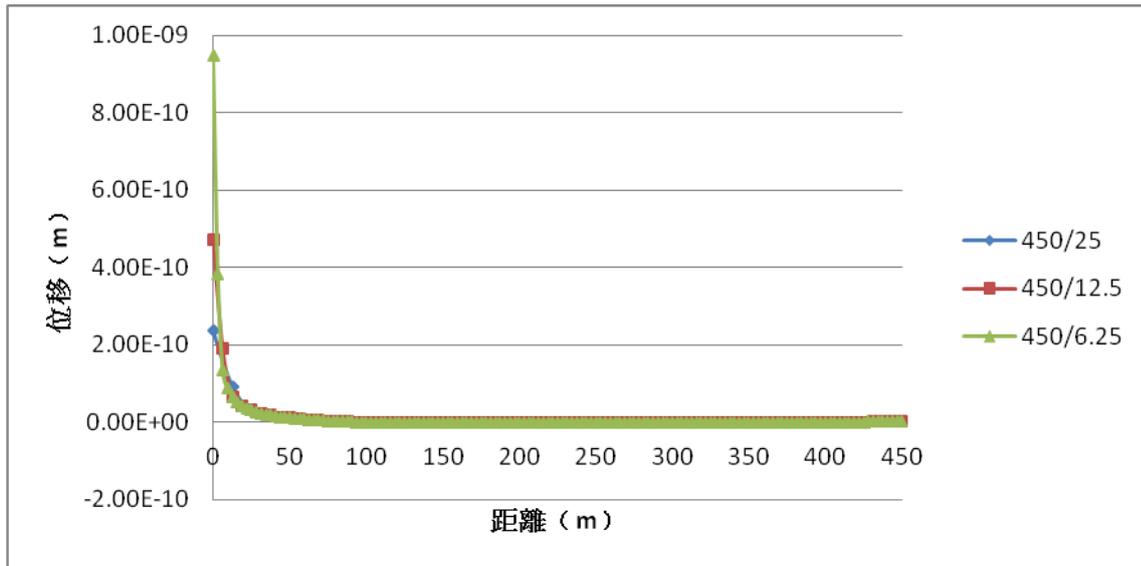


(a) 實部部分

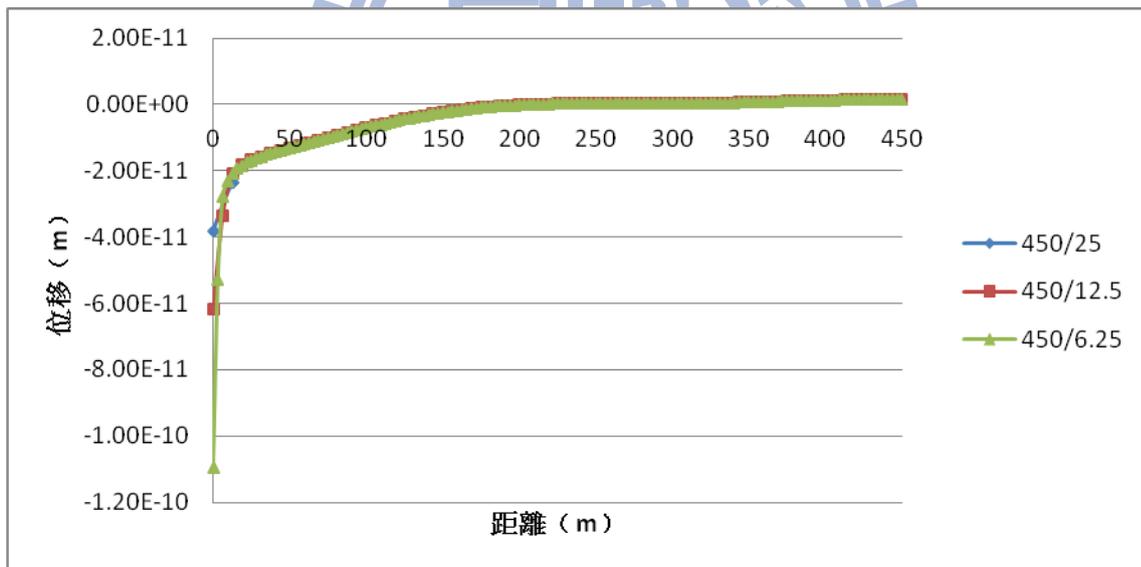


(b) 虛部部分

Fig. 3.83 模型三之元素大小收斂性分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

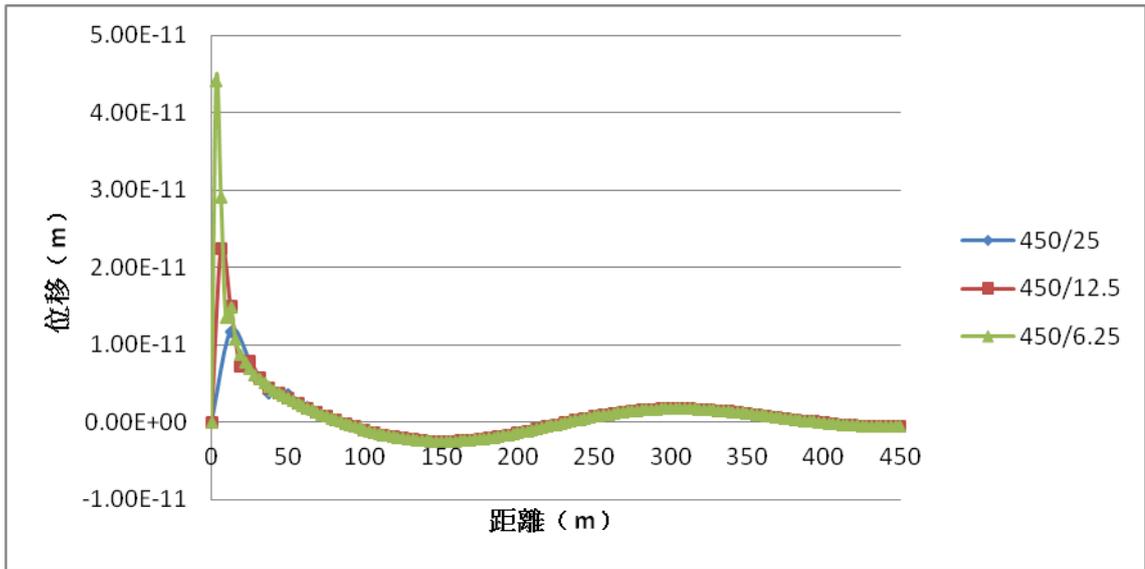


(a) 實部部分

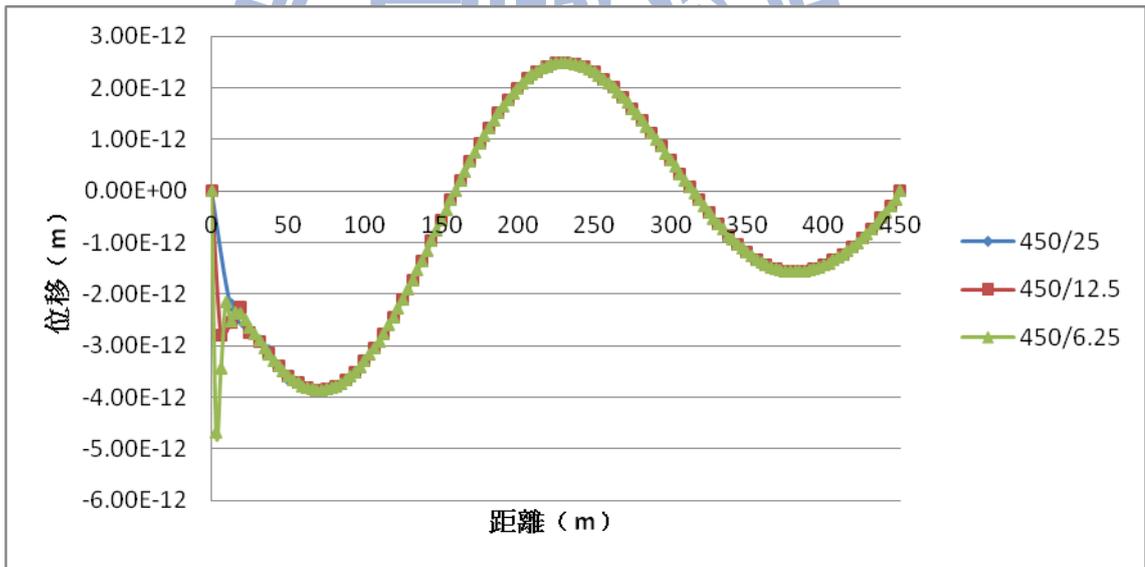


(b) 虛部部分

Fig. 3.84 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

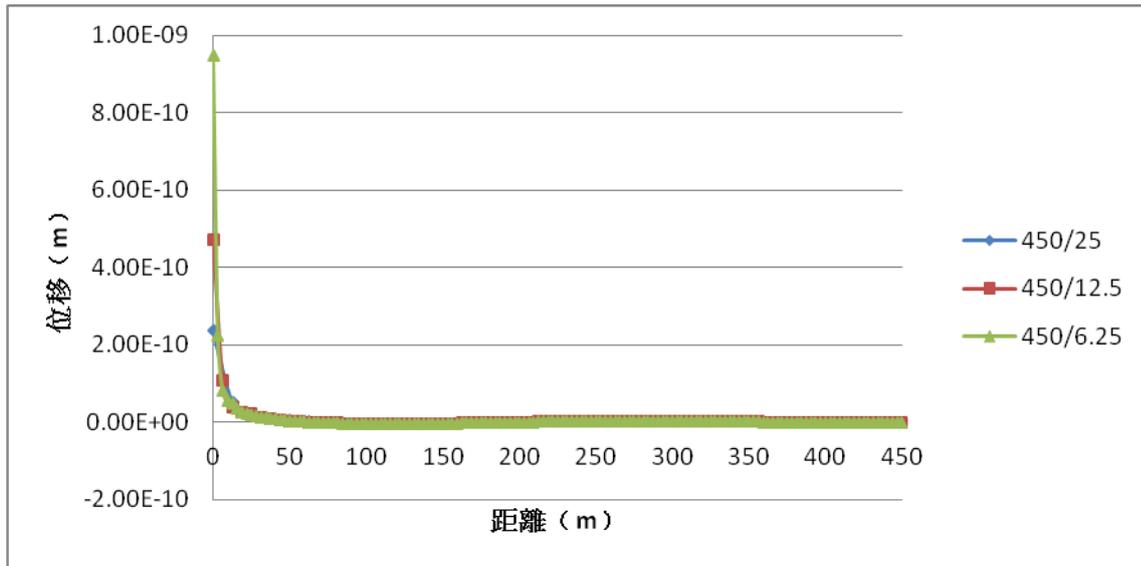


(a) 實部部分

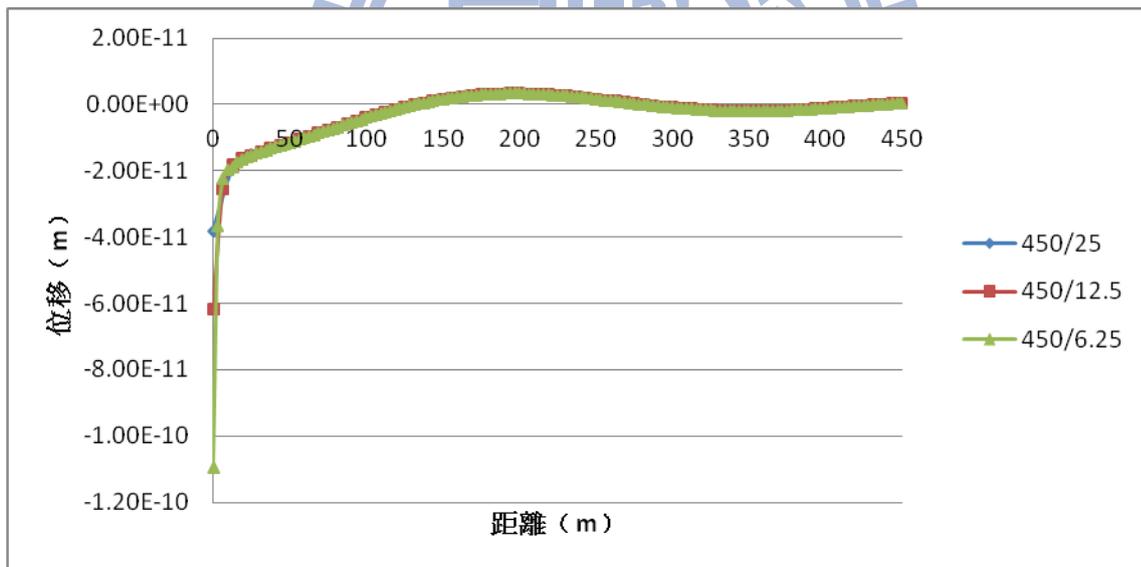


(b) 虛部部分

Fig. 3.85 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

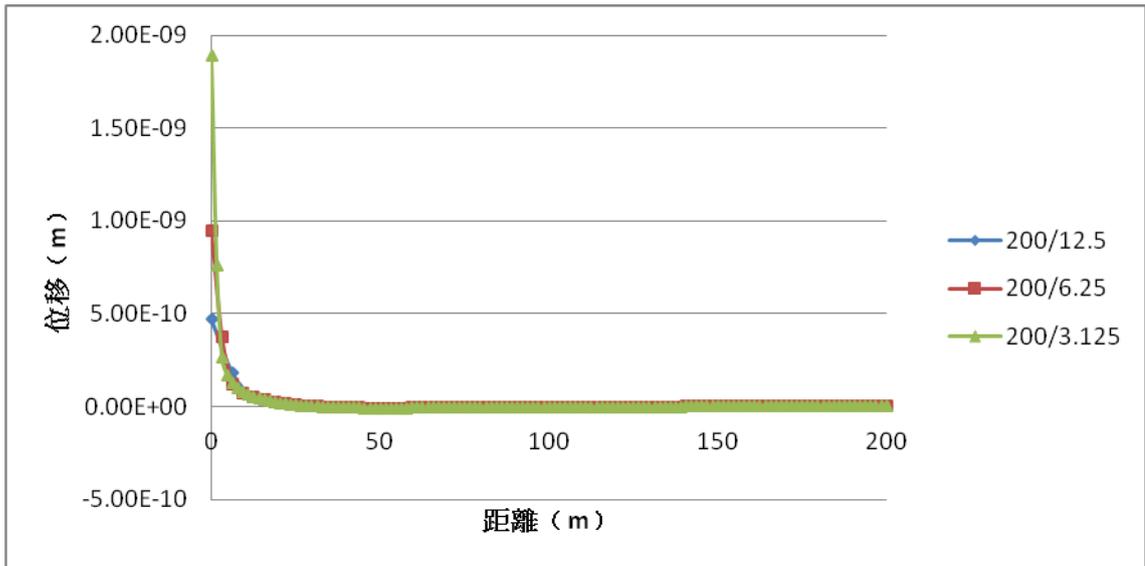


(a) 實部部分

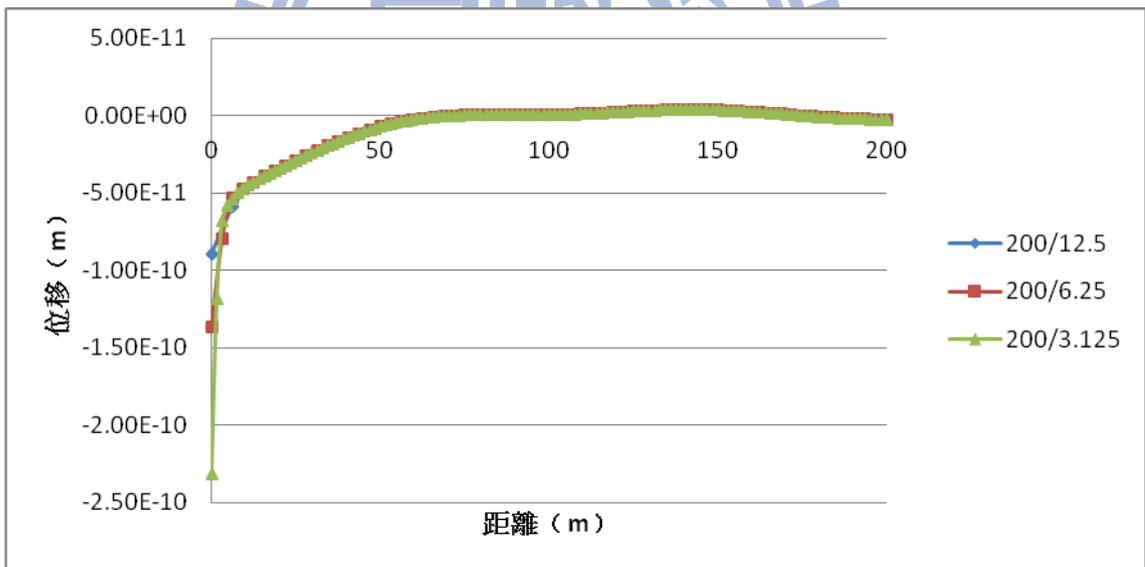


(b) 虛部部分

Fig. 3.86 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ)

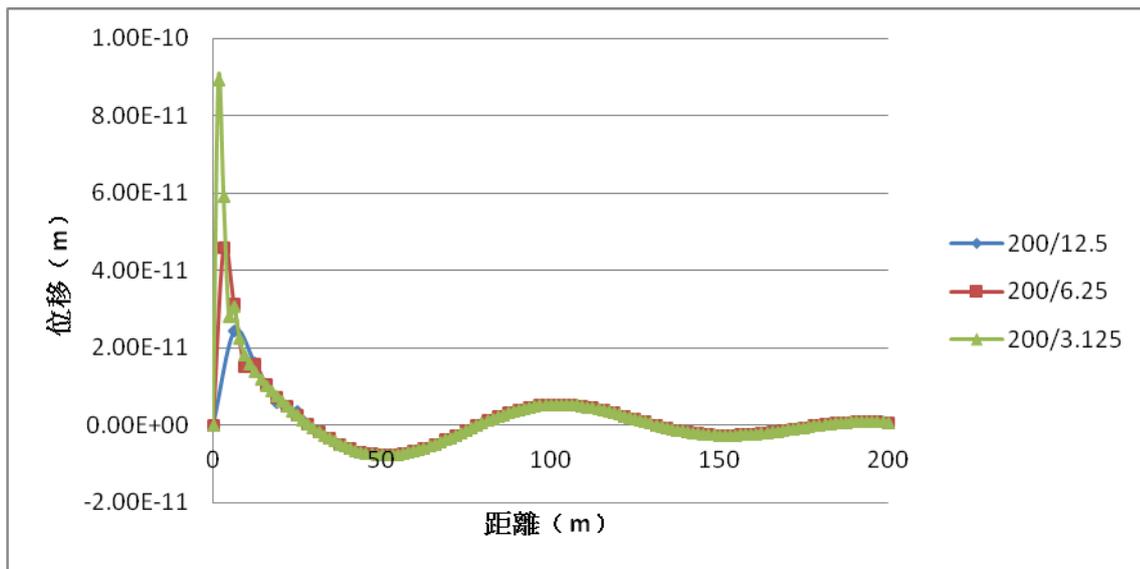


(a) 實部部分

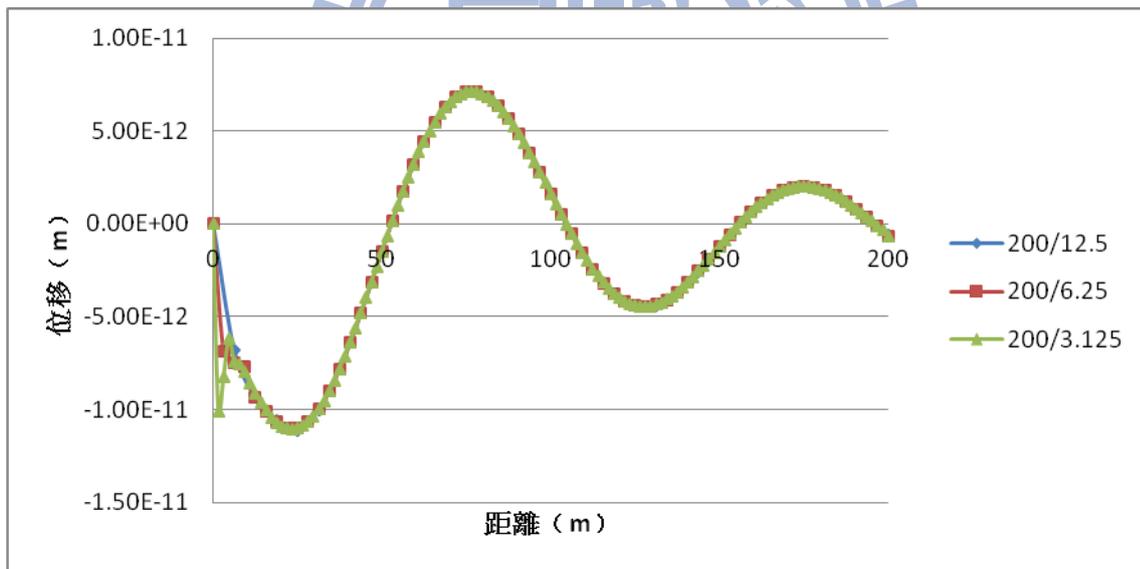


(b) 虛部部分

Fig. 3.87 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

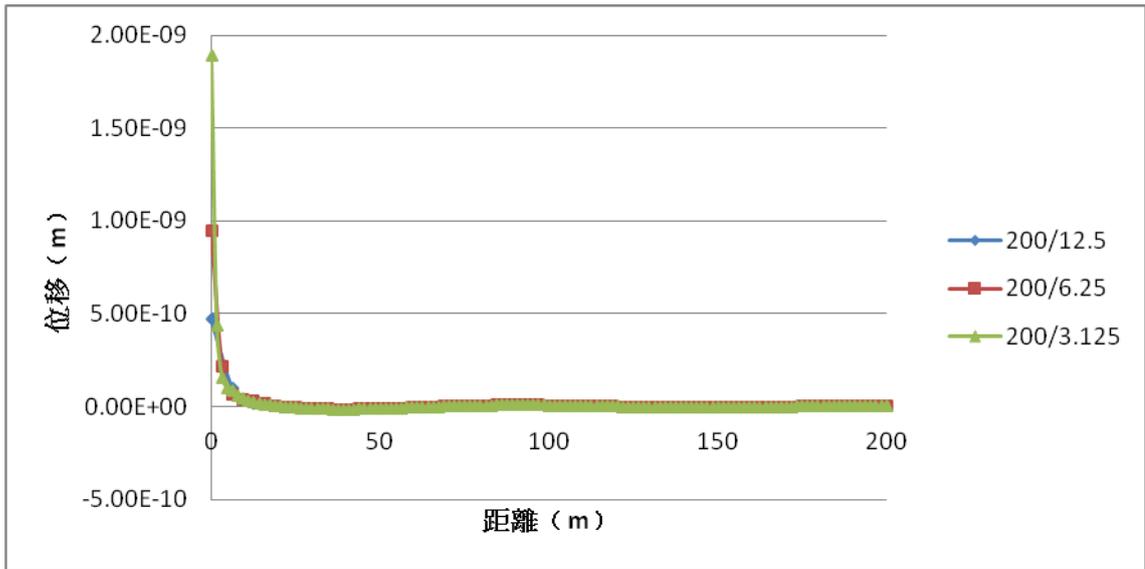


(a) 實部部分

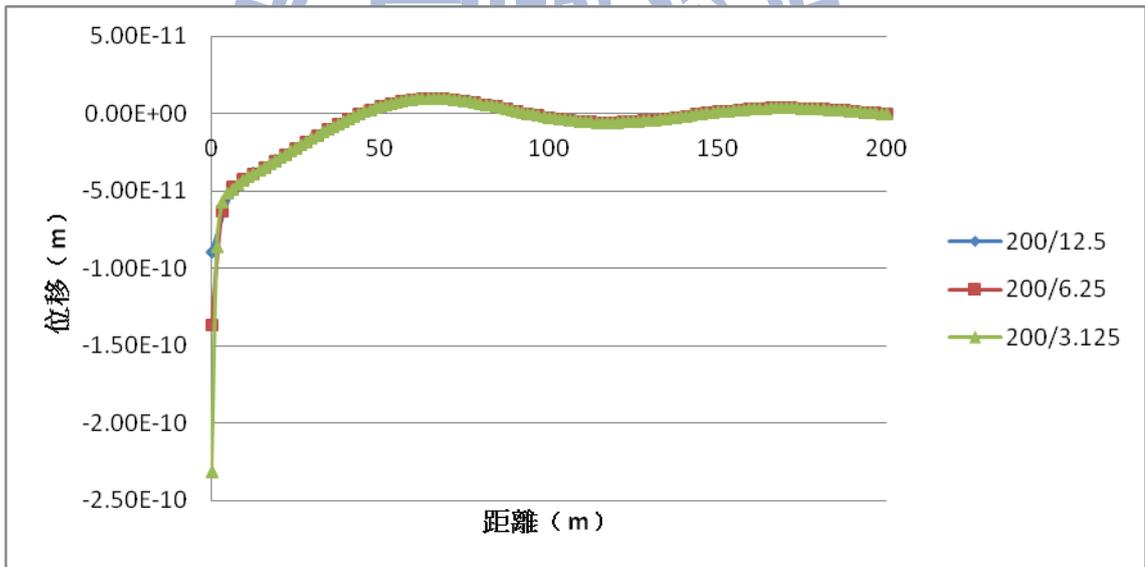


(b) 虛部部分

Fig. 3.88 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

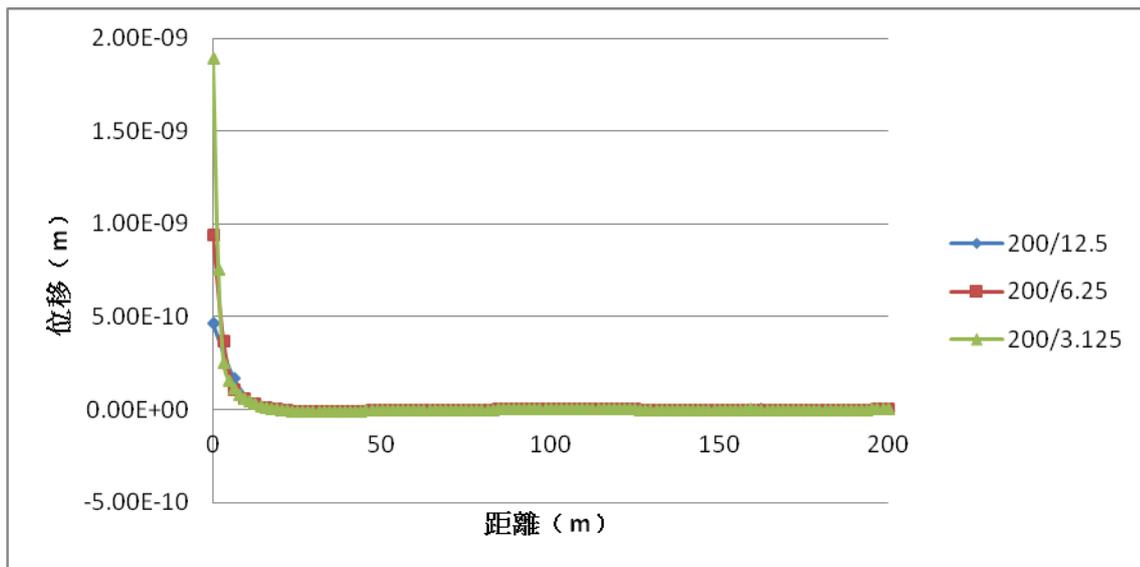


(a) 實部部分

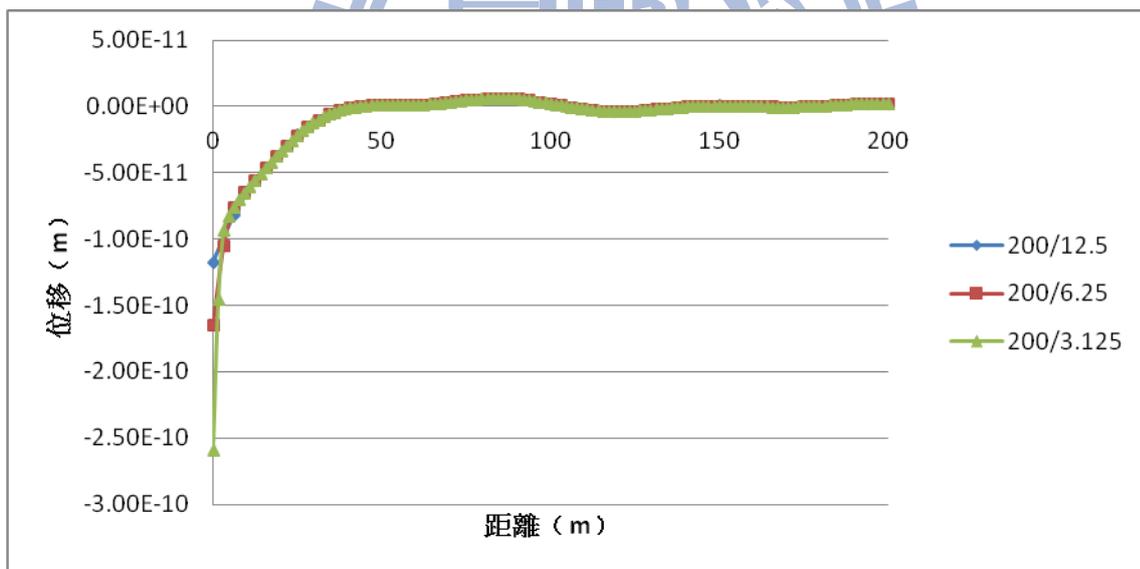


(b) 虛部部分

Fig. 3.89 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_θ)

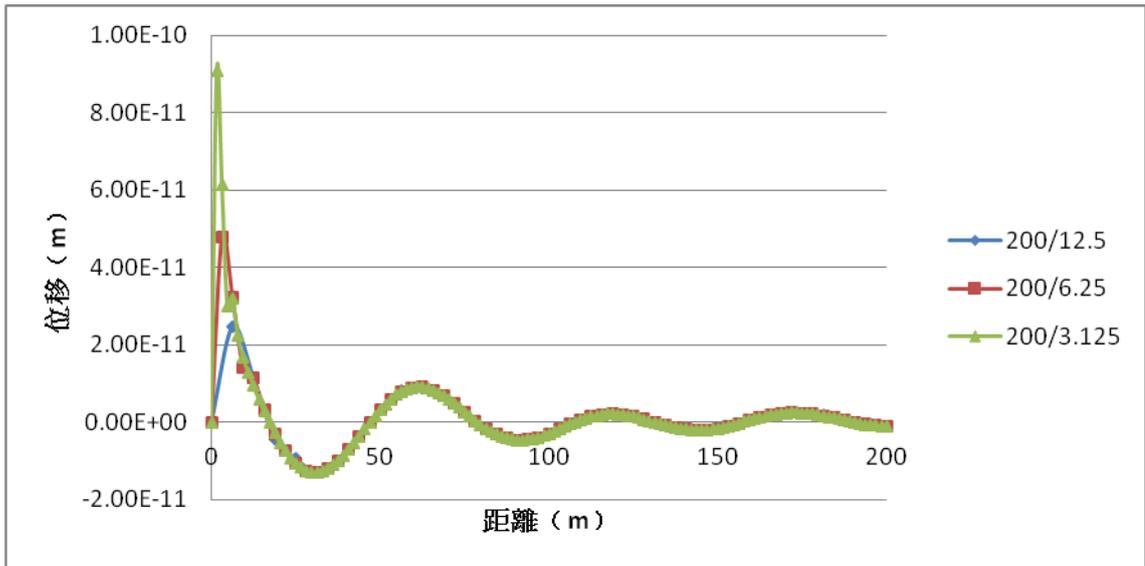


(a) 實部部分

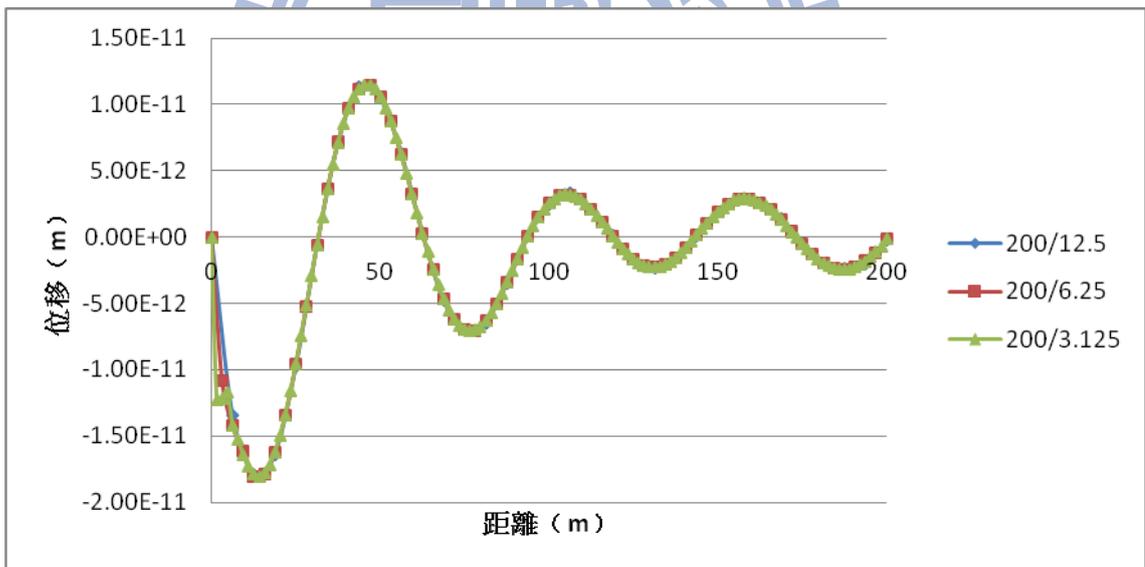


(b) 虛部部分

Fig. 3.90 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

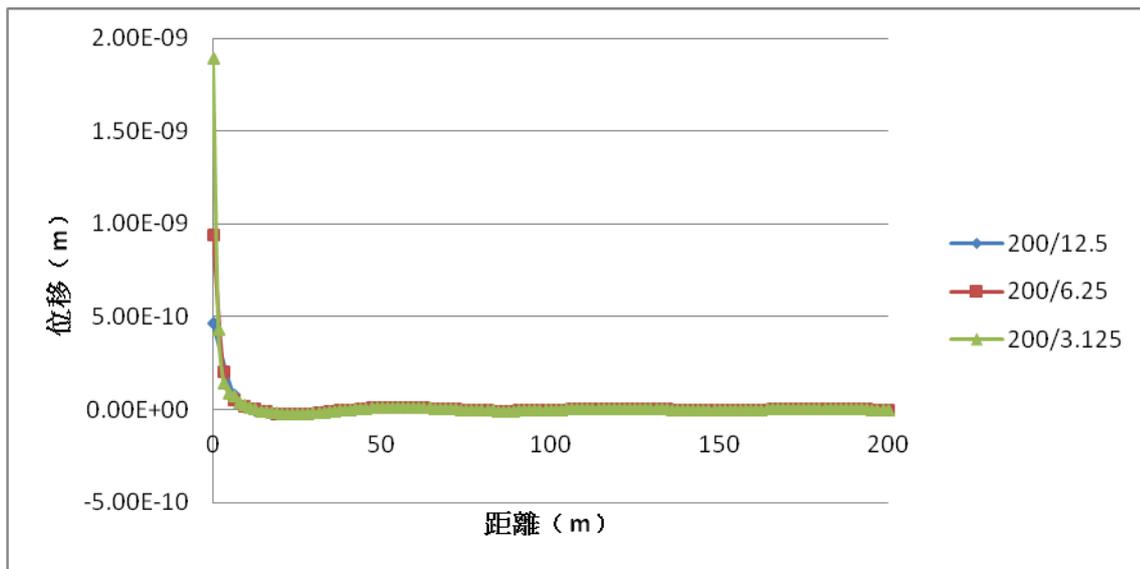


(a) 實部部分

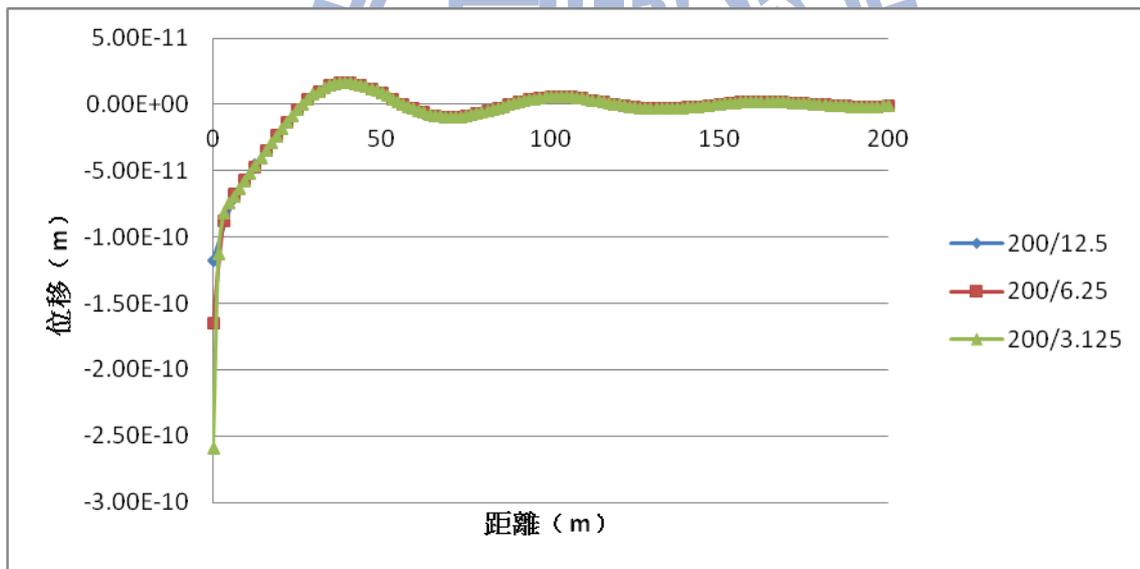


(b) 虛部部分

Fig. 3.91 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)

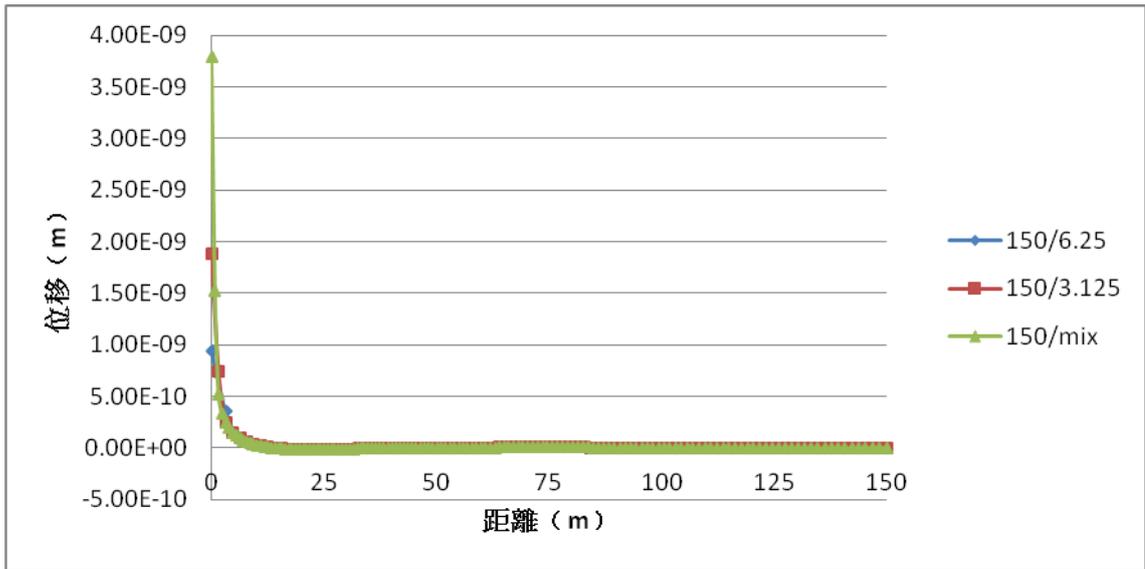


(a) 實部部分

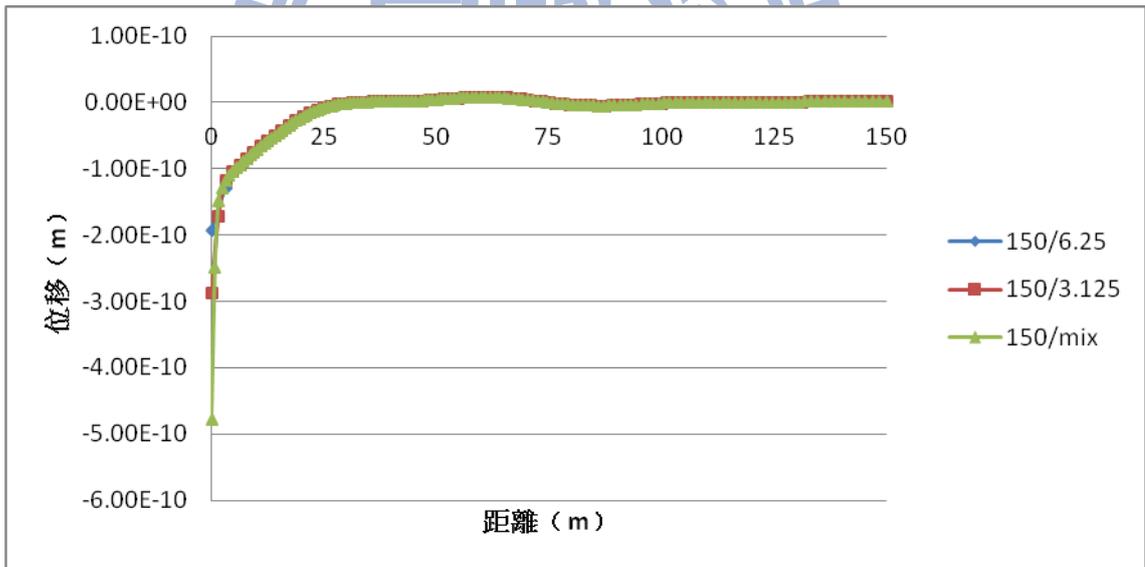


(b) 虛部部分

Fig. 3.92 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ)

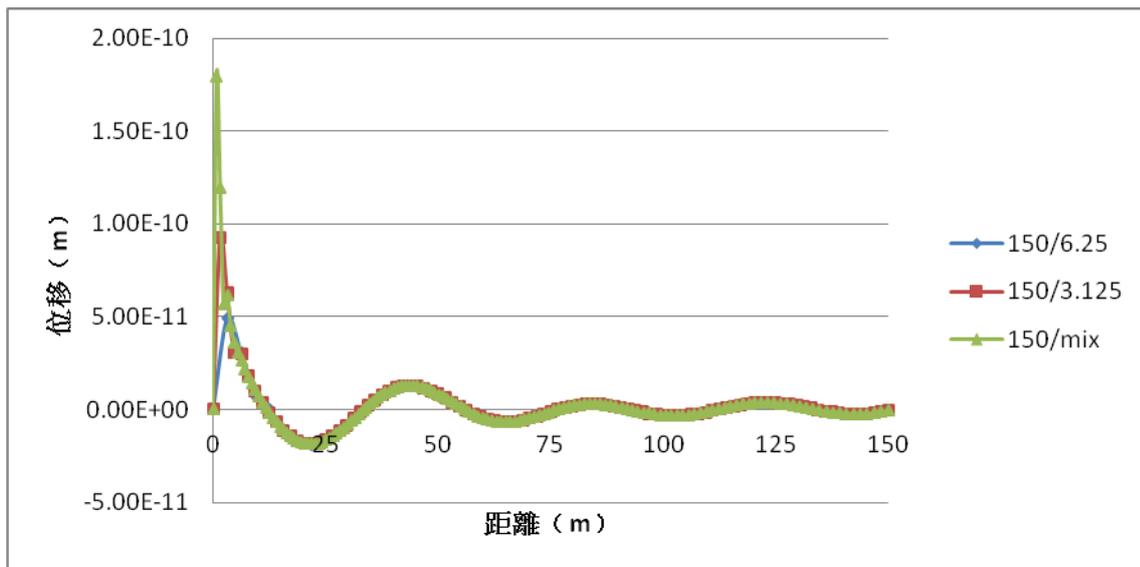


(a) 實部部分

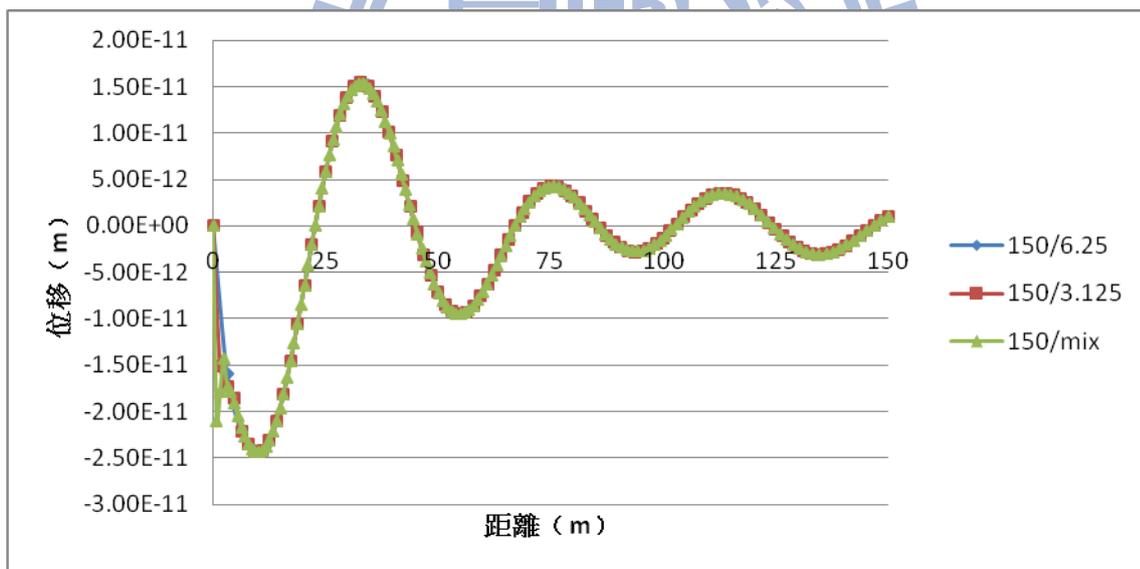


(b) 虛部部分

Fig. 3.93 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

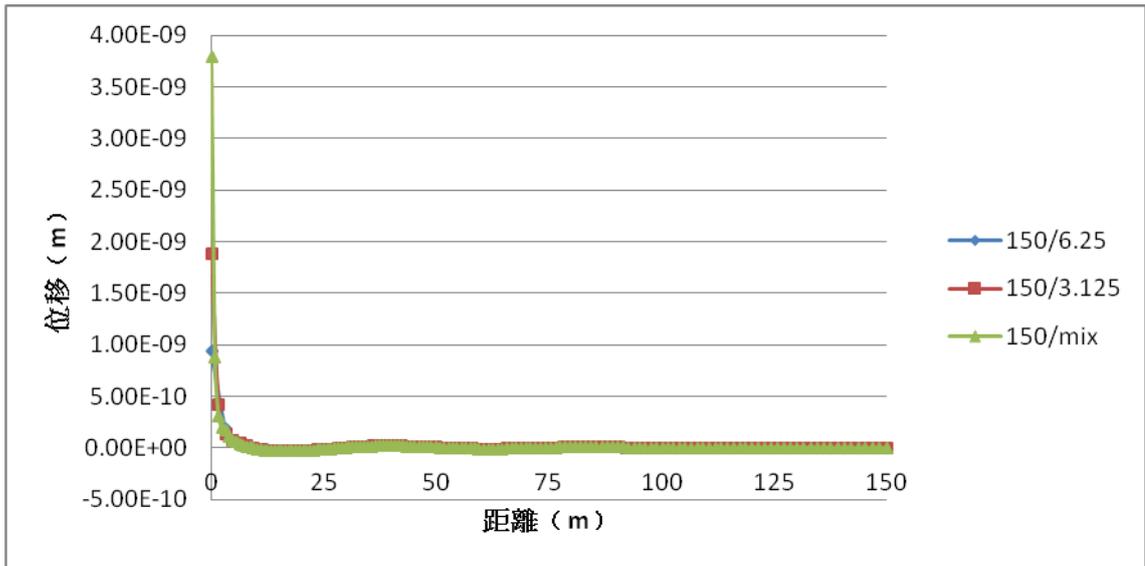


(a) 實部部分

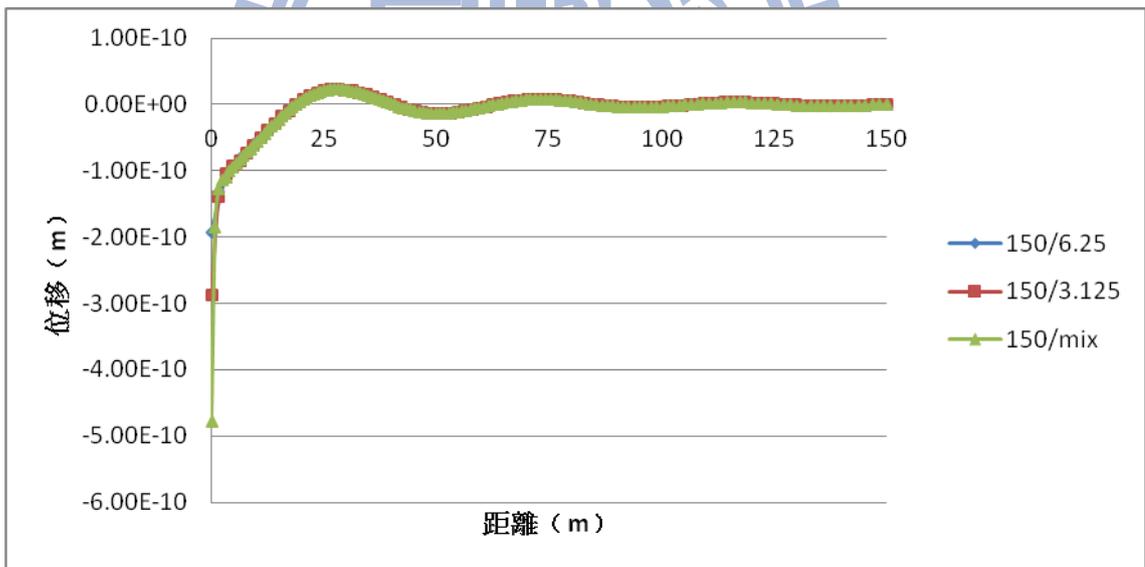


(b) 虛部部分

Fig. 3.94 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.95 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ)

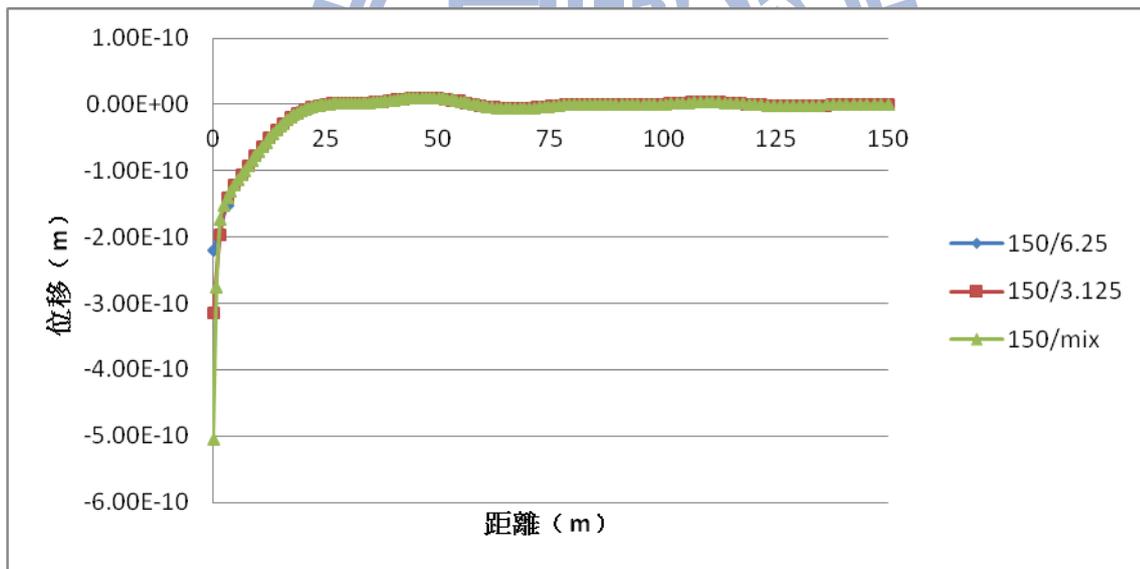
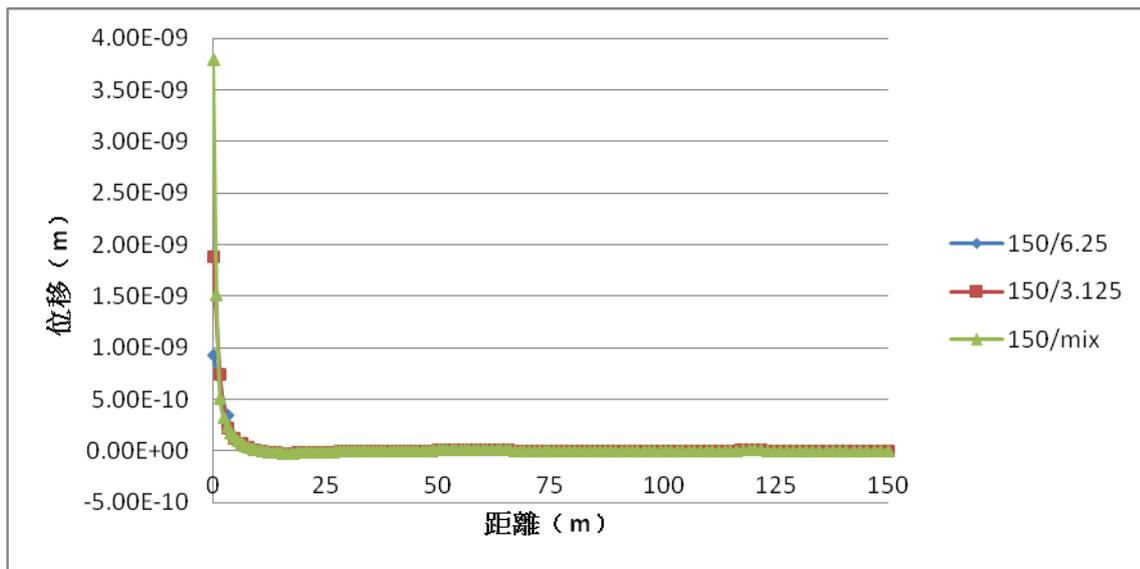
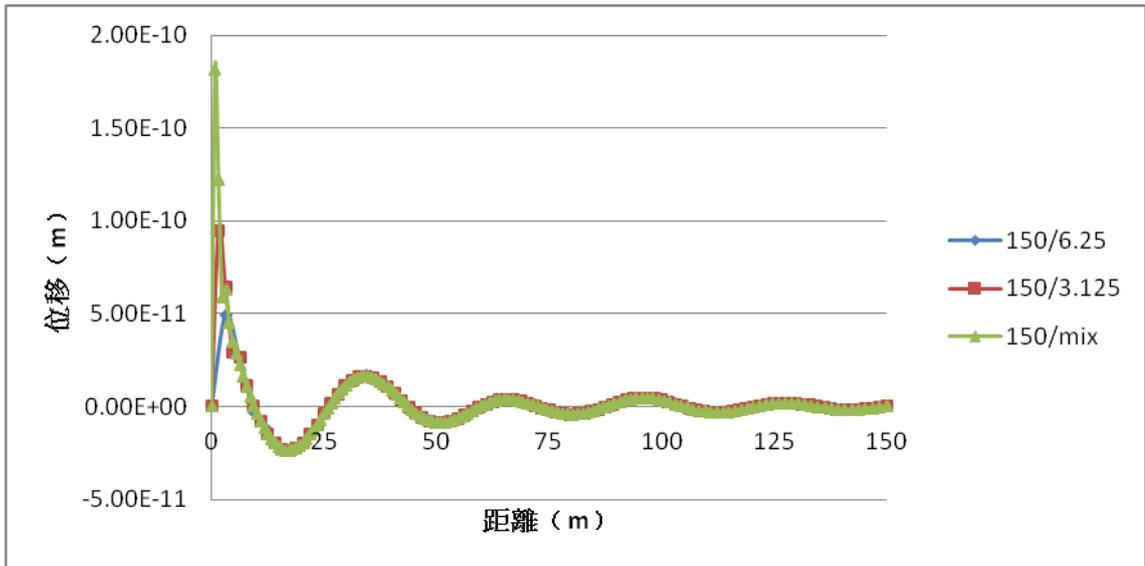
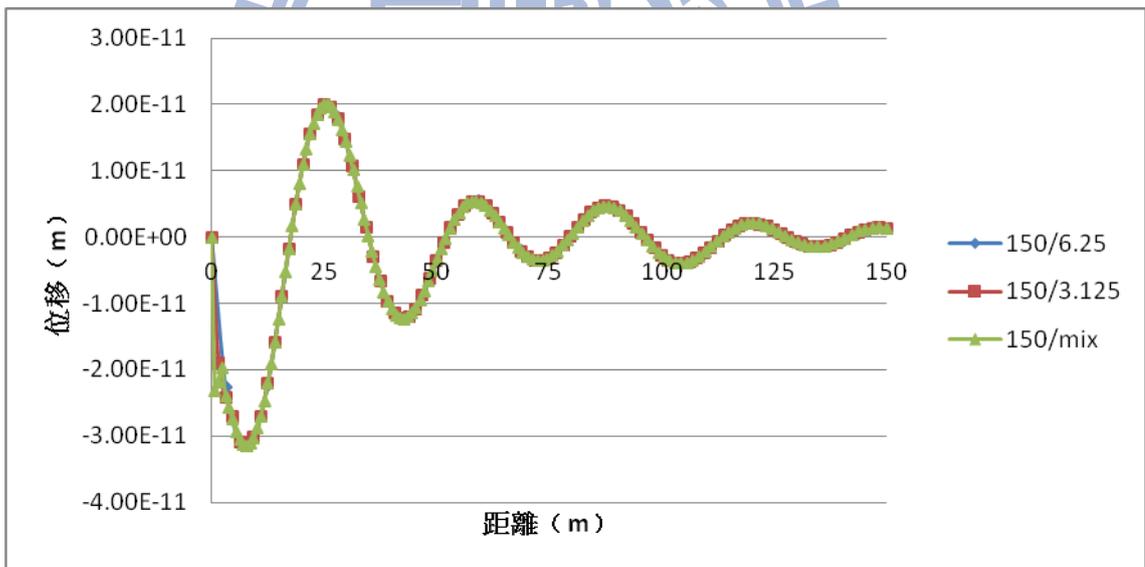


Fig. 3.96 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.97 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

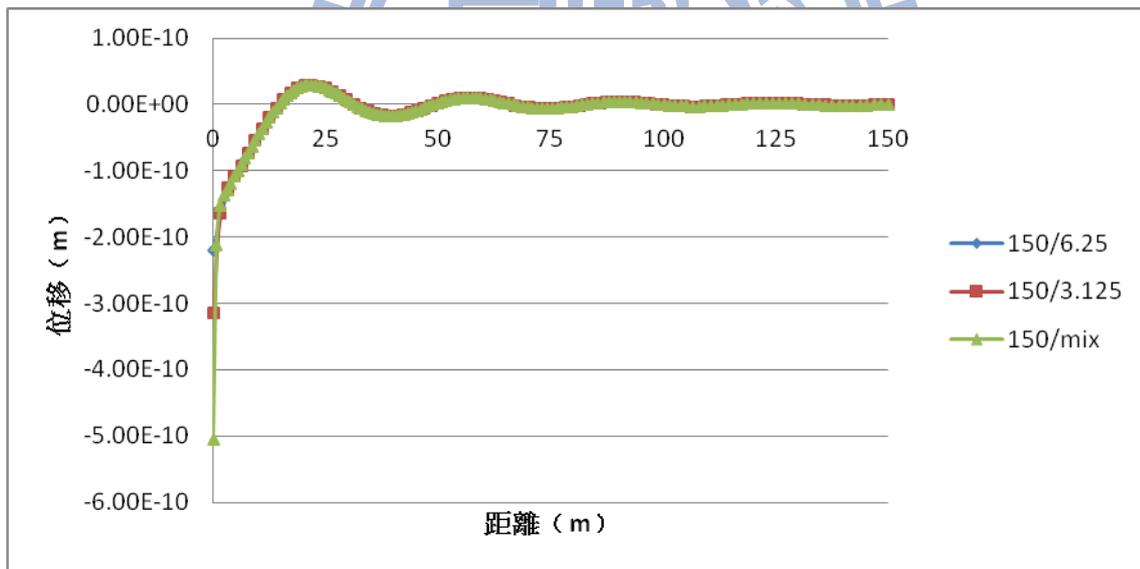
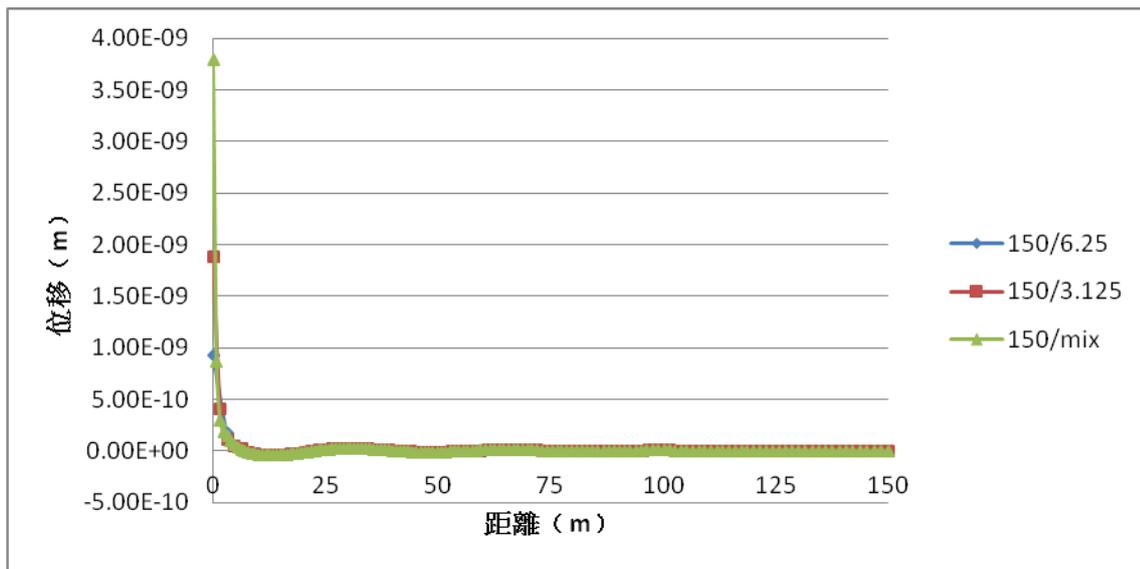
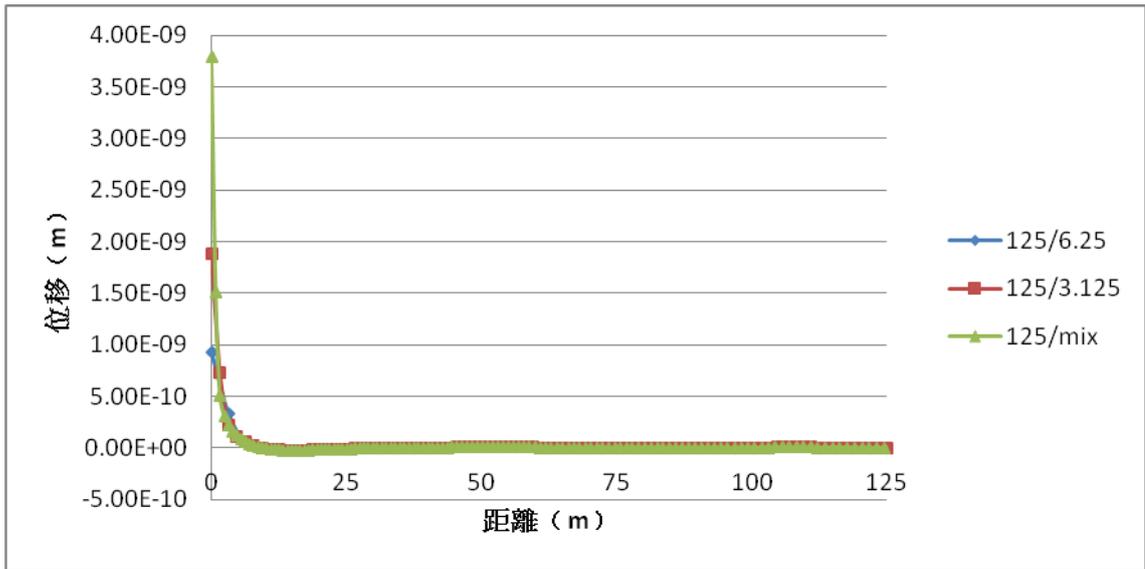
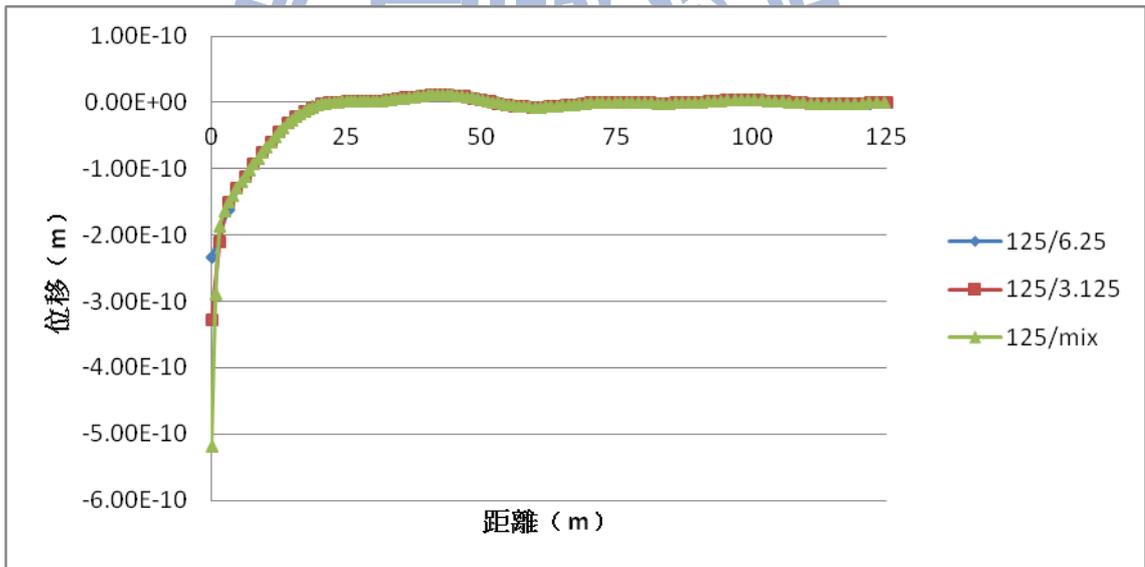


Fig. 3.98 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ)

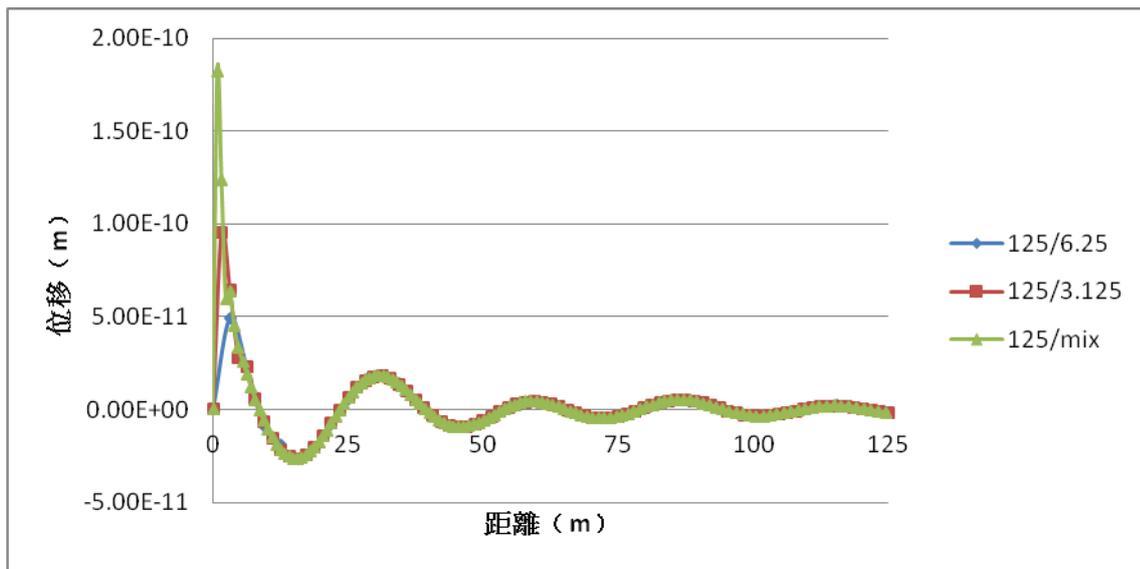


(a) 實部部分

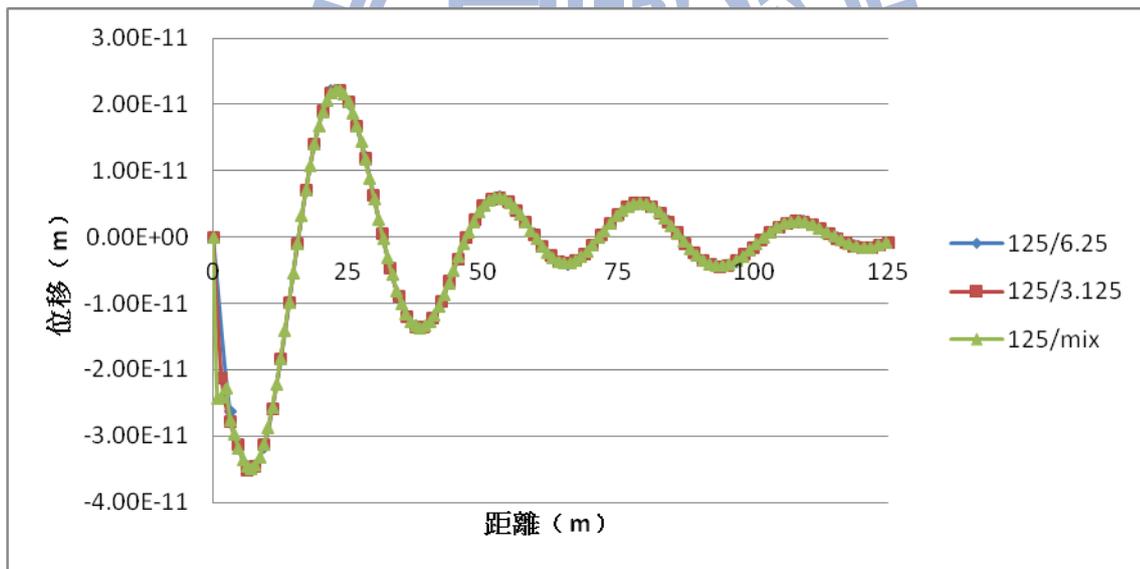


(b) 虛部部分

Fig. 3.99 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.100 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

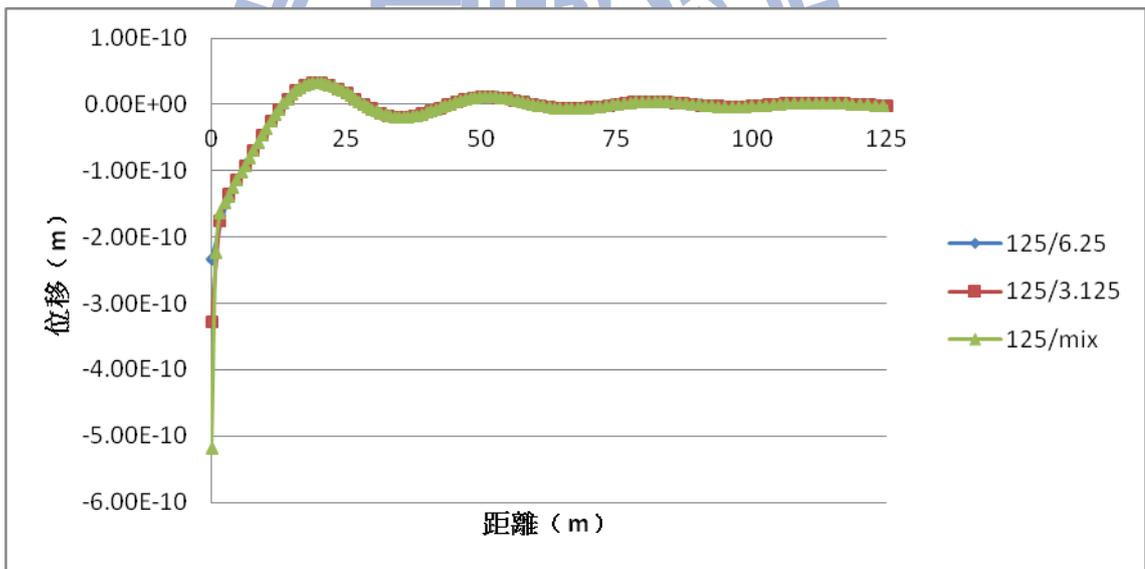
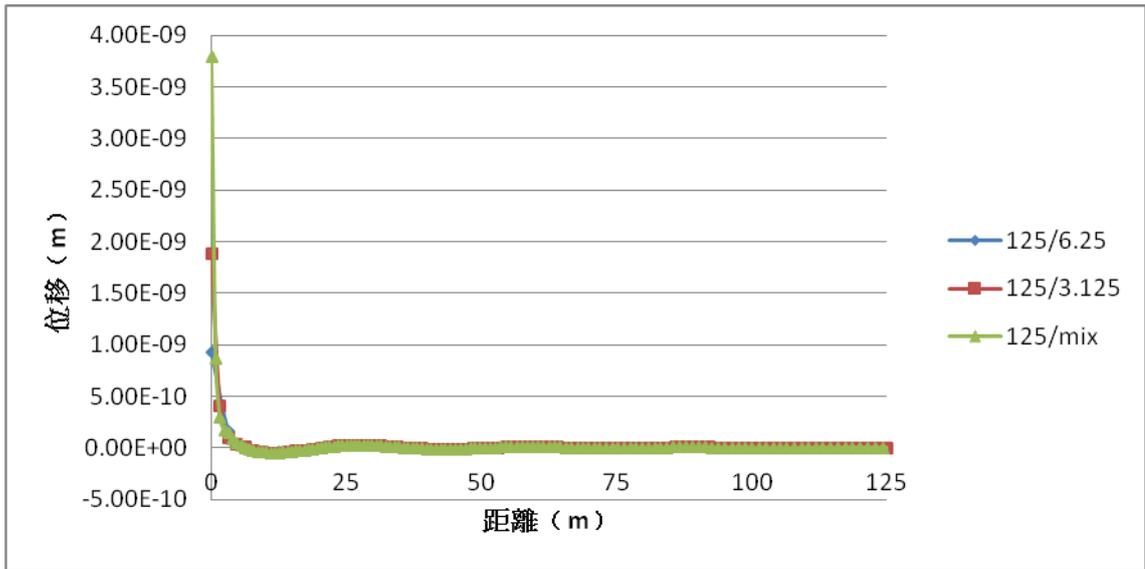
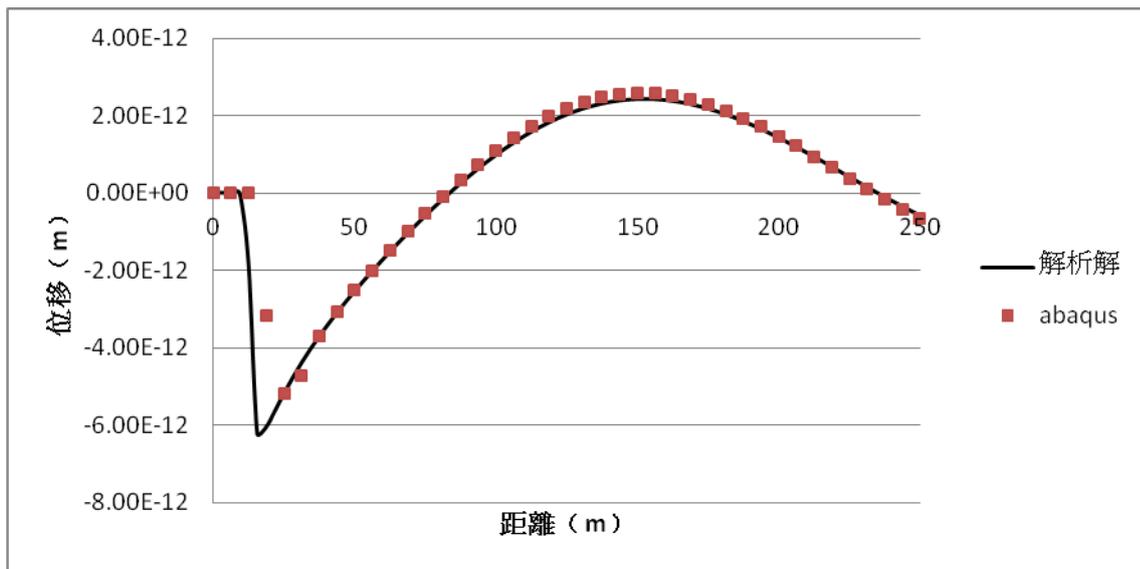
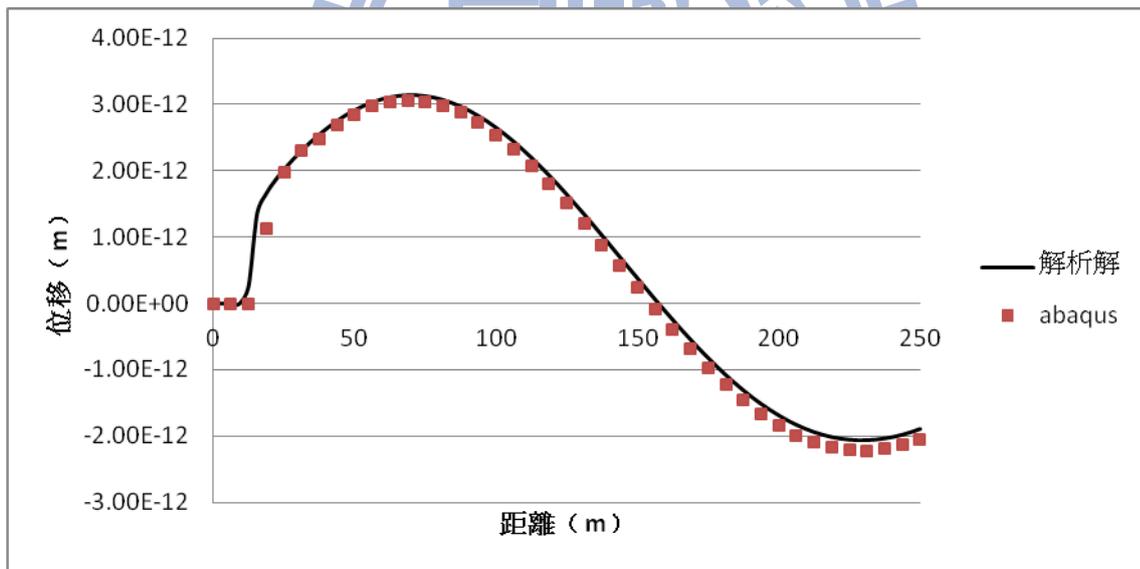


Fig. 3.101 模型三之元素大小收斂性分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ)

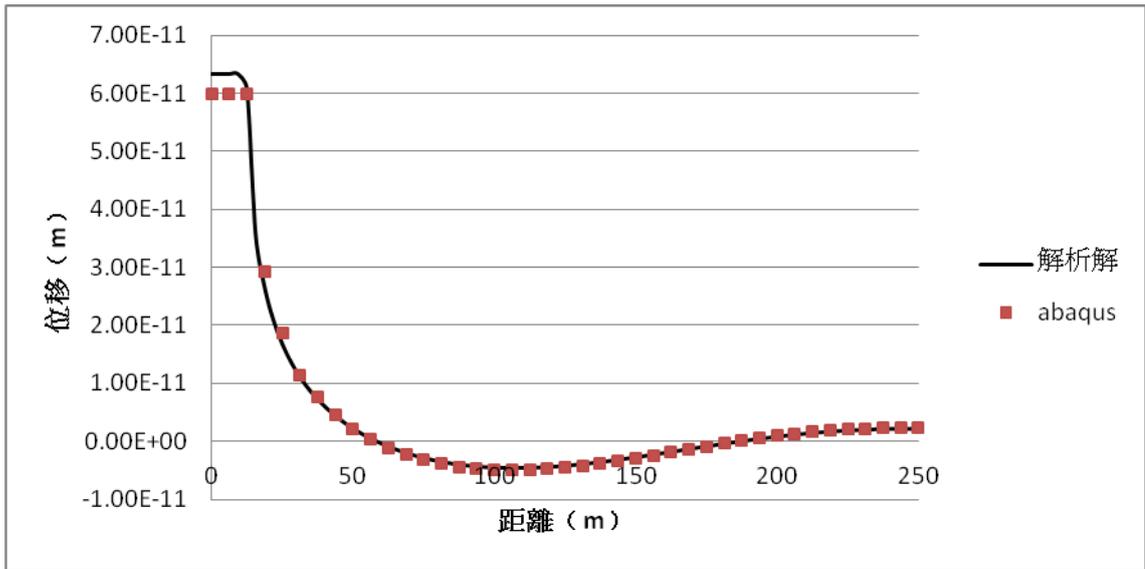


(a) 實部部分

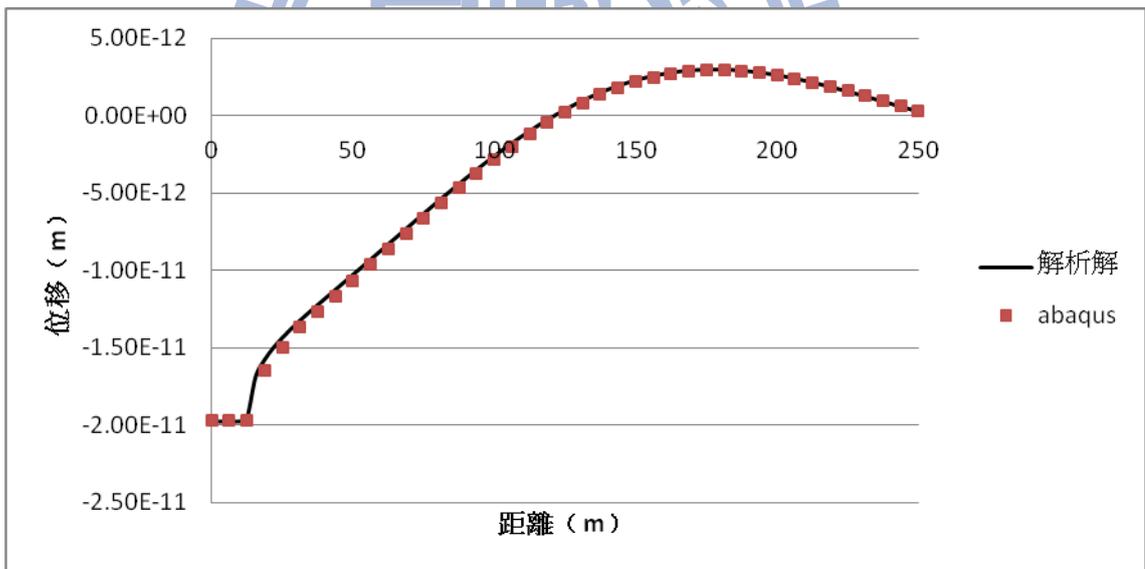


(b) 虛部部分

Fig. 3.102 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r ）

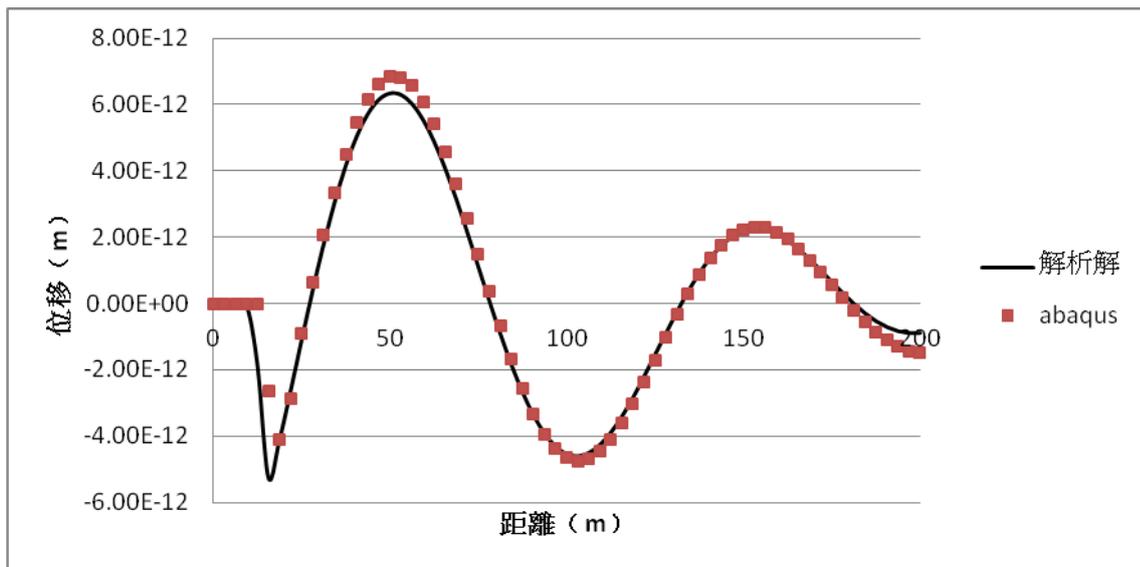


(a) 實部部分

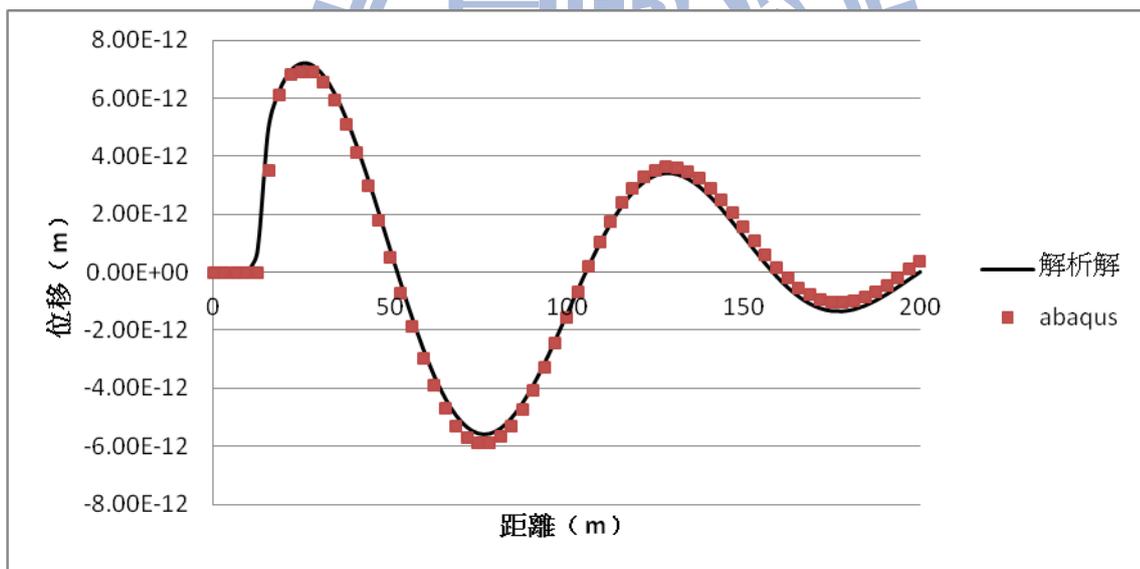


(b) 虛部部分

Fig. 3.103 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z ）

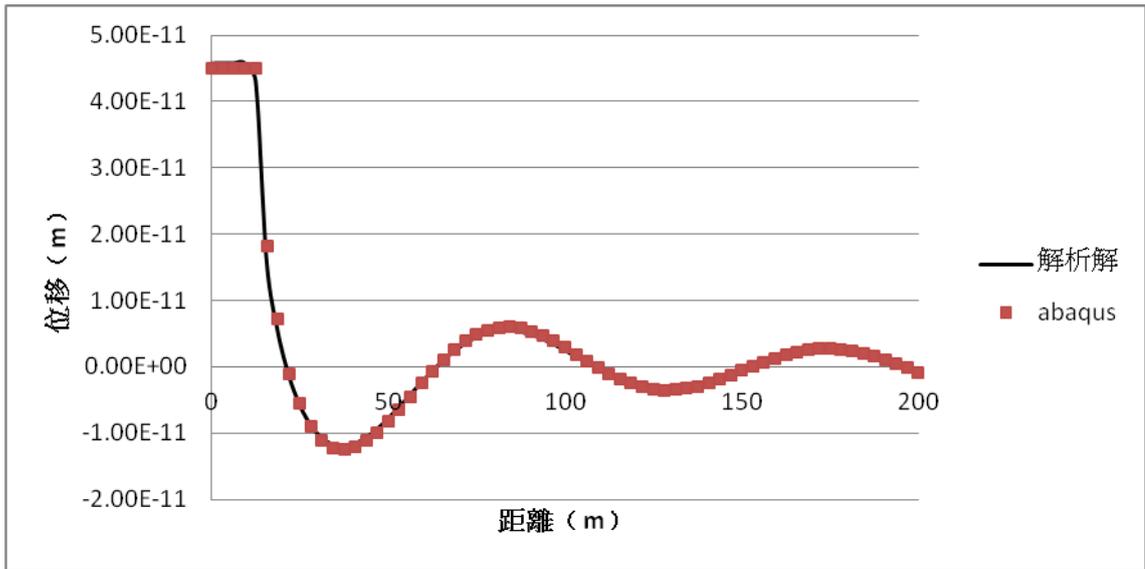


(a) 實部部分

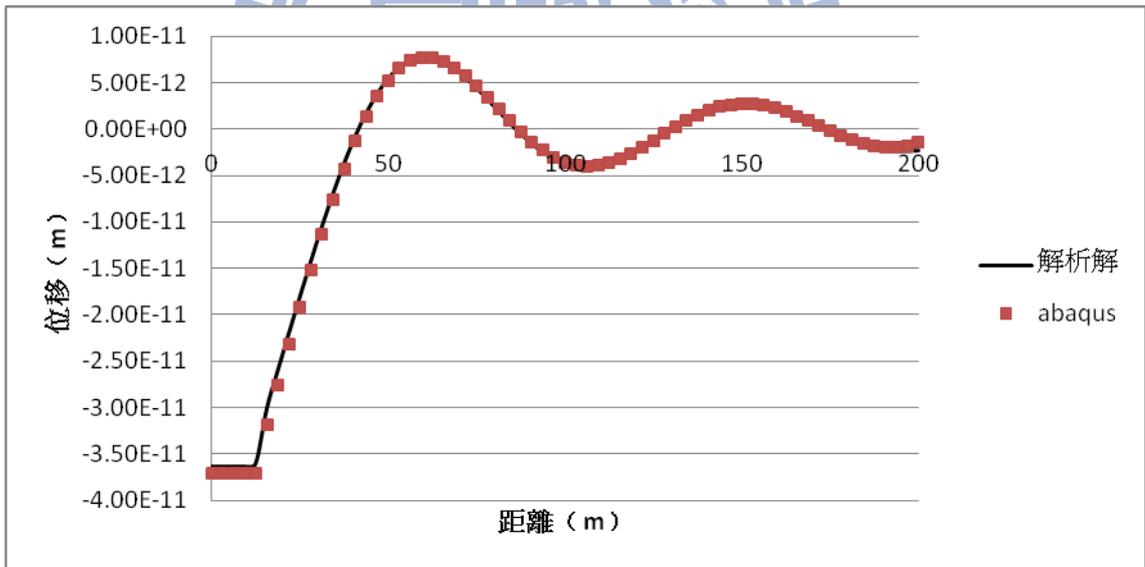


(b) 虛部部分

Fig. 3.104 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r ）

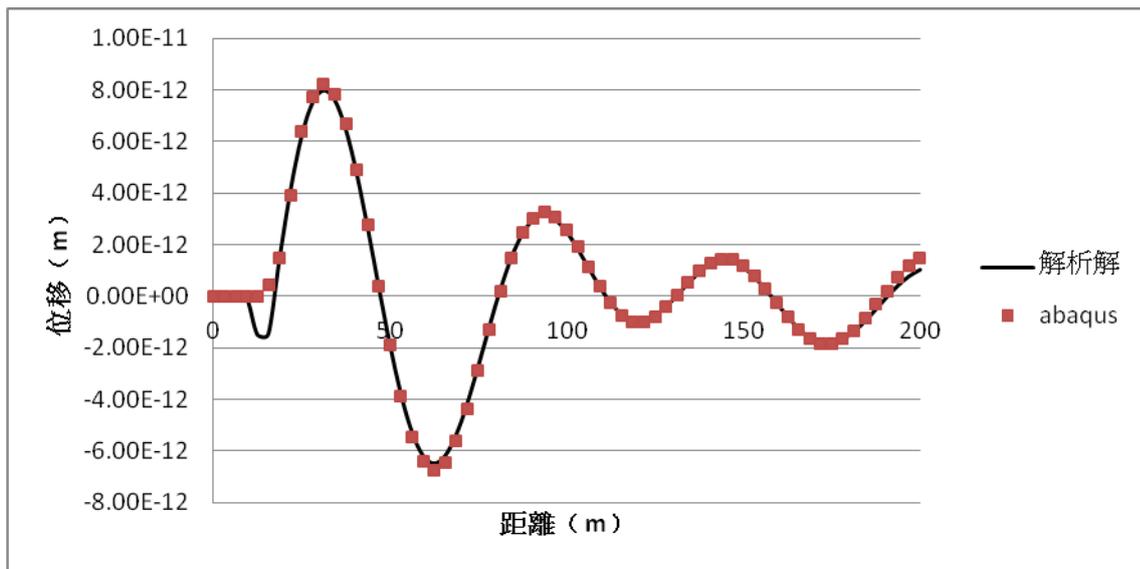


(a) 實部部分

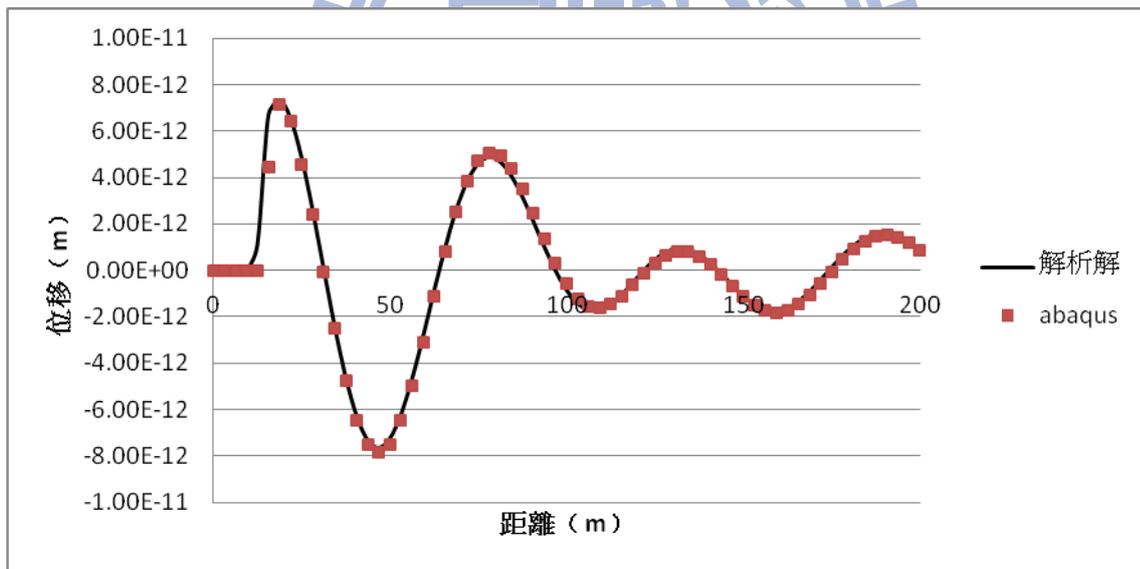


(b) 虛部部分

Fig. 3.105 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z ）



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.106 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r ）

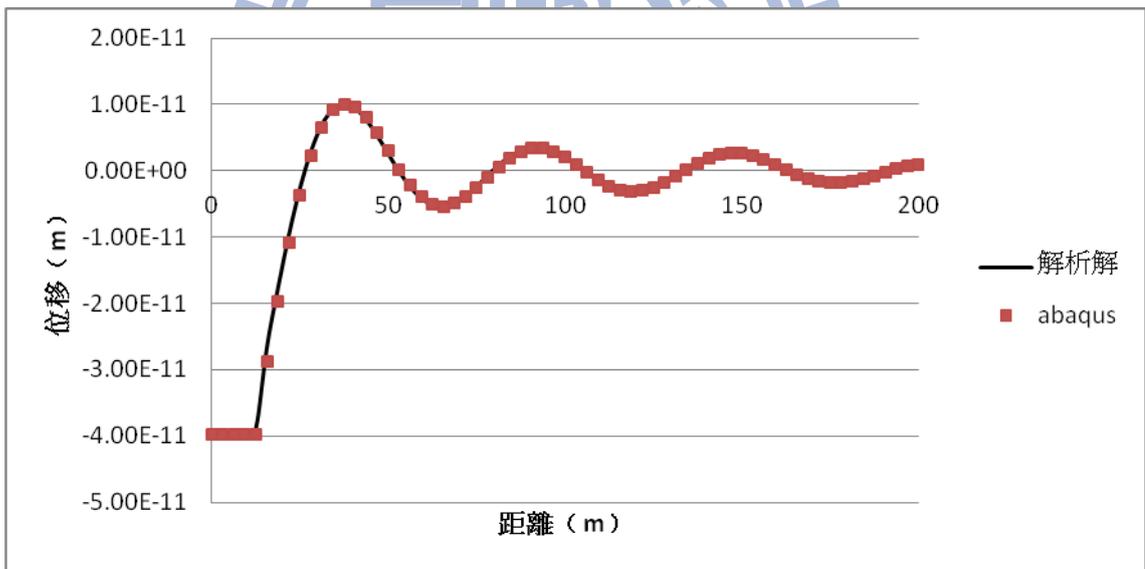
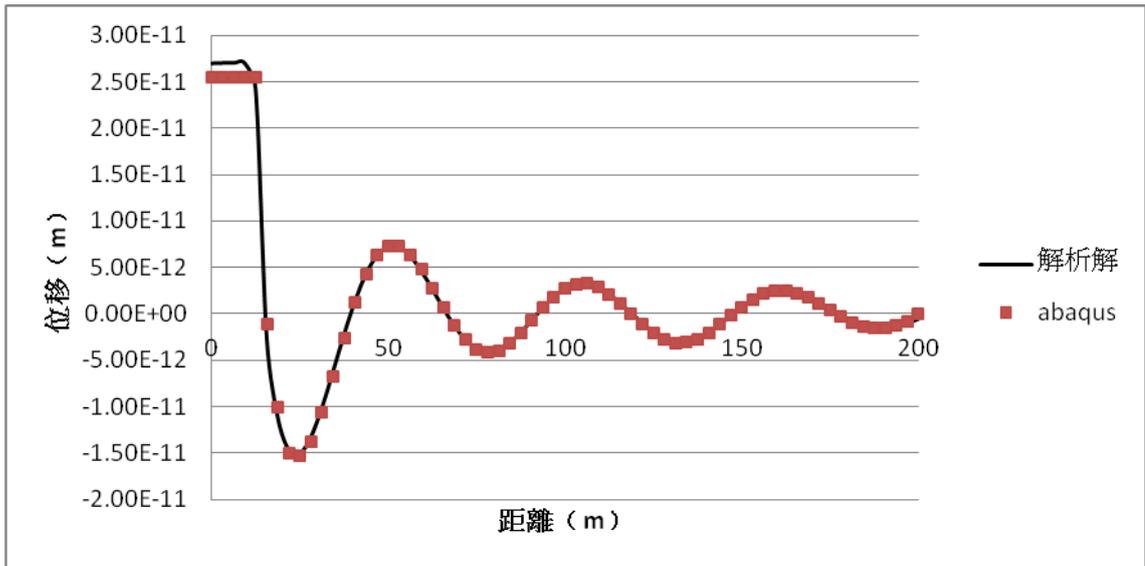
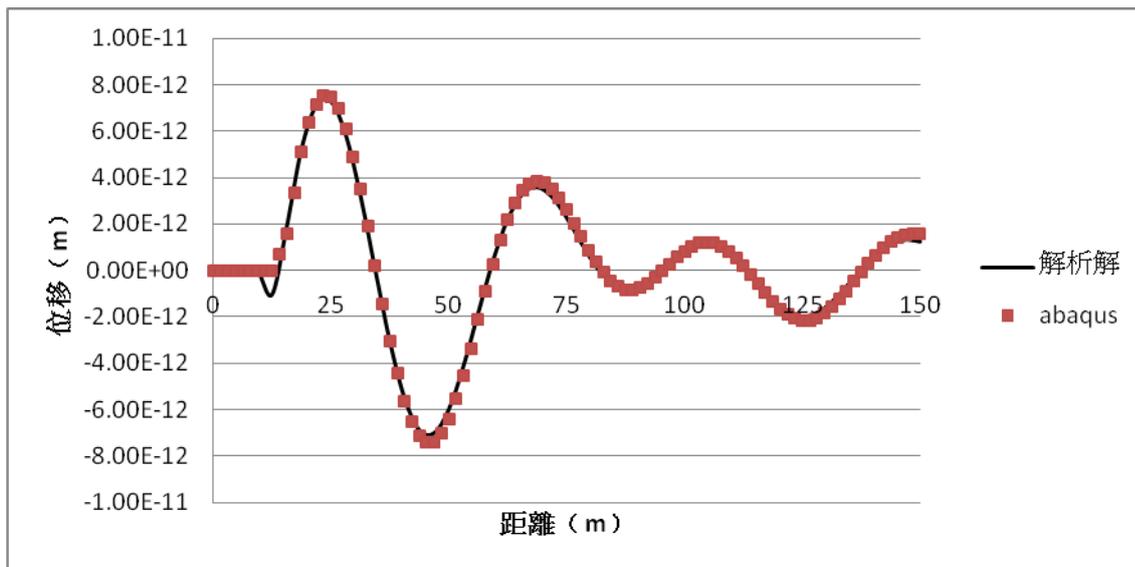
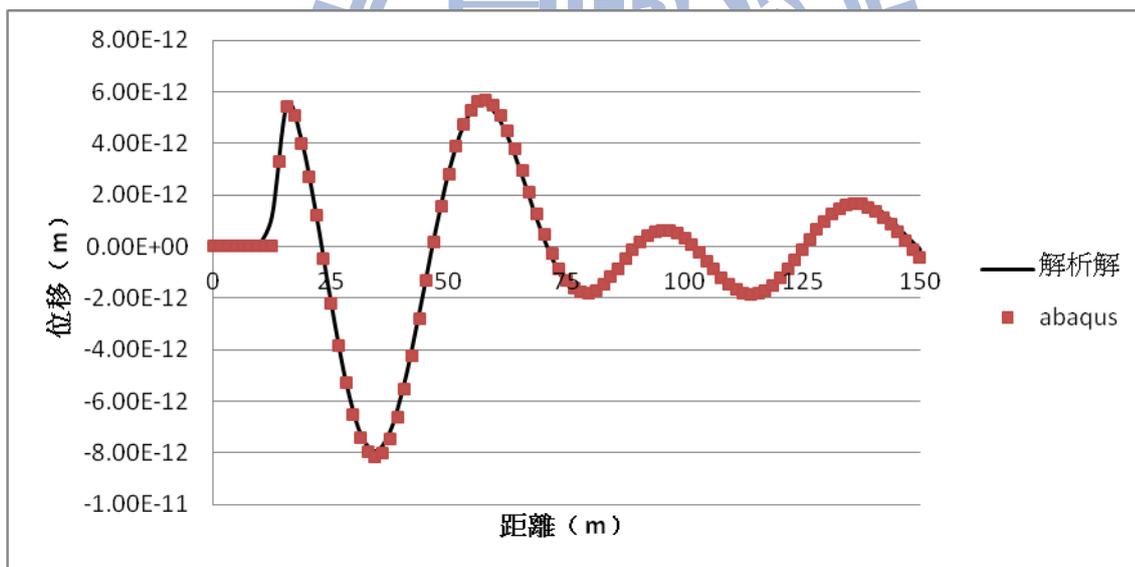


Fig. 3.107 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z ）



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.108 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r ）

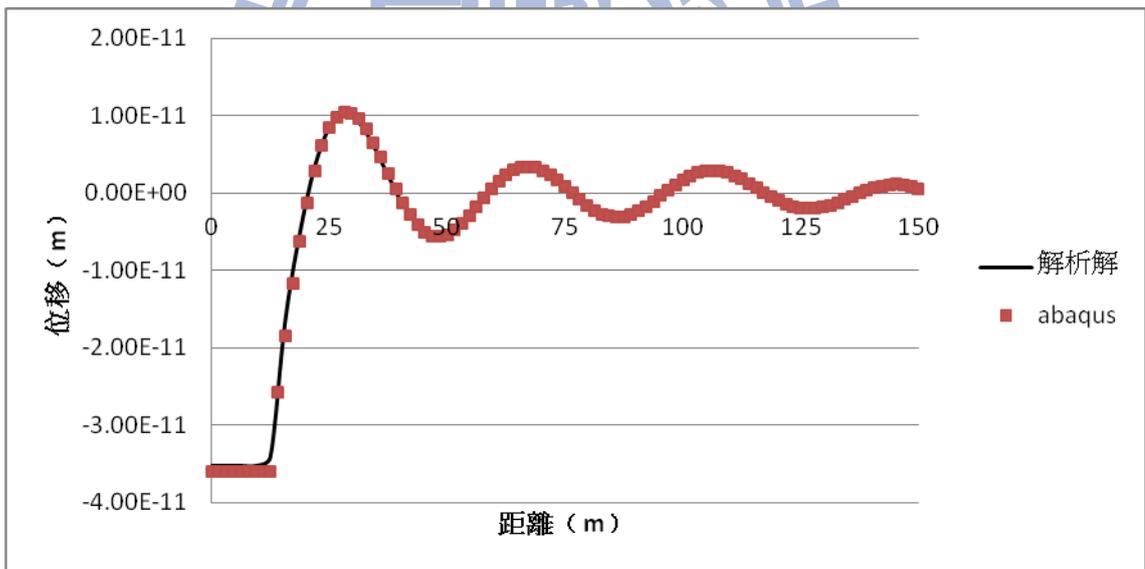
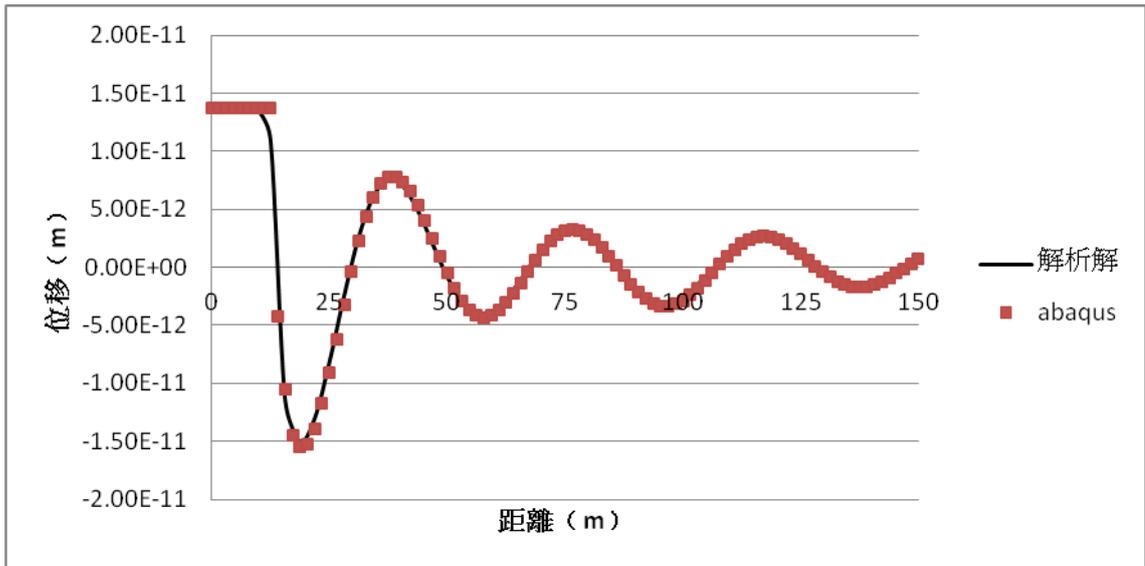
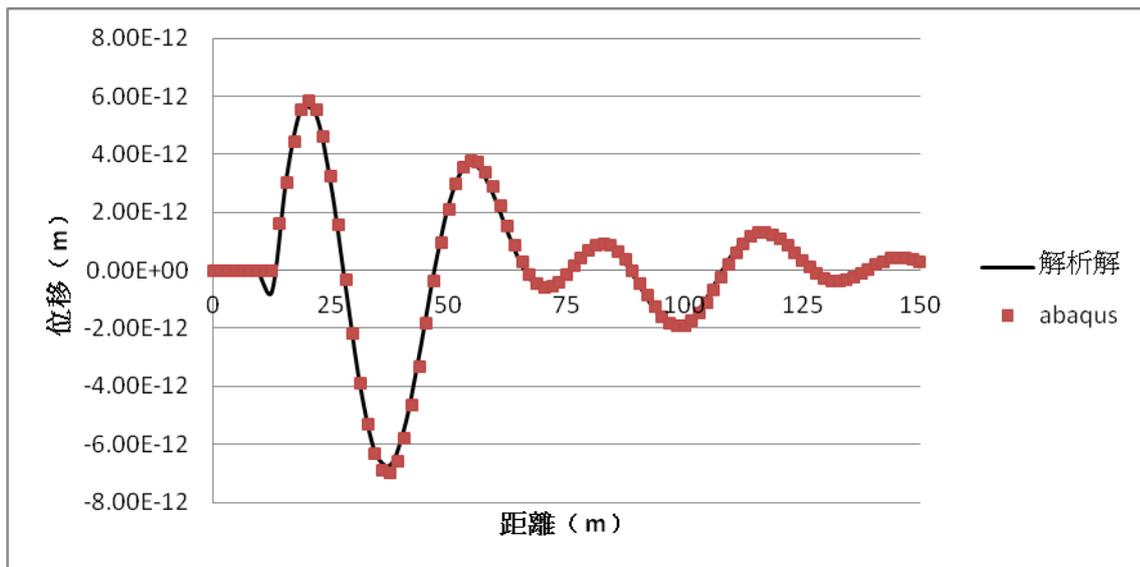
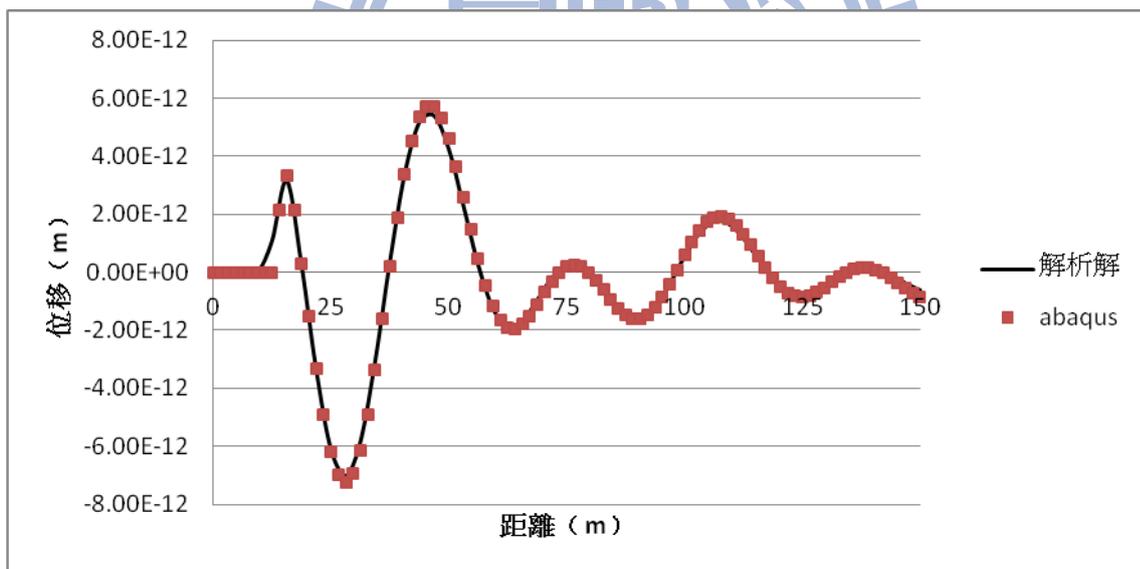


Fig. 3.109 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z ）

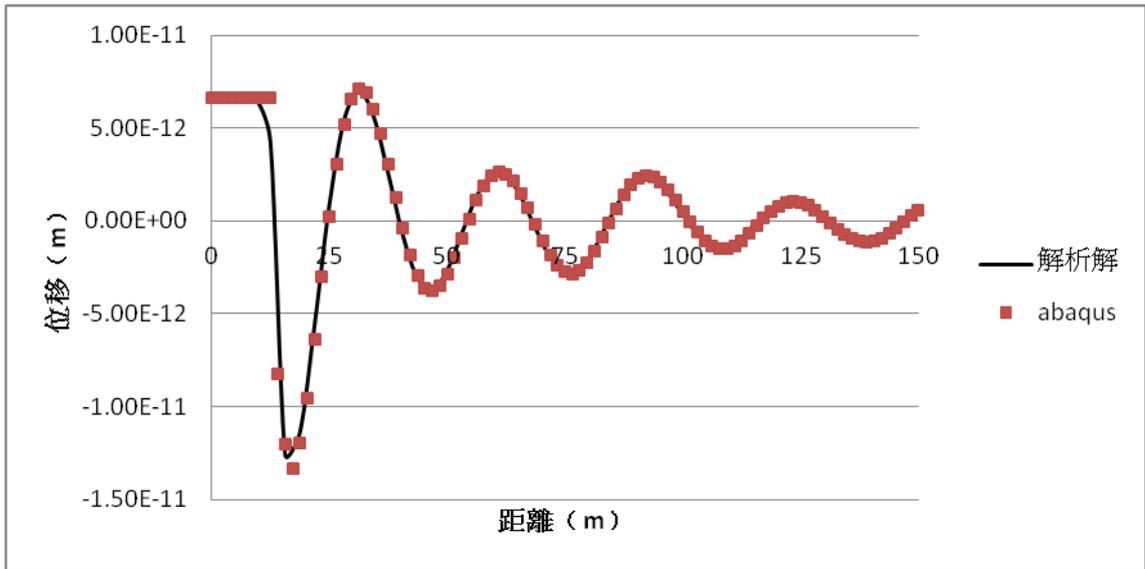


(a) 實部部分

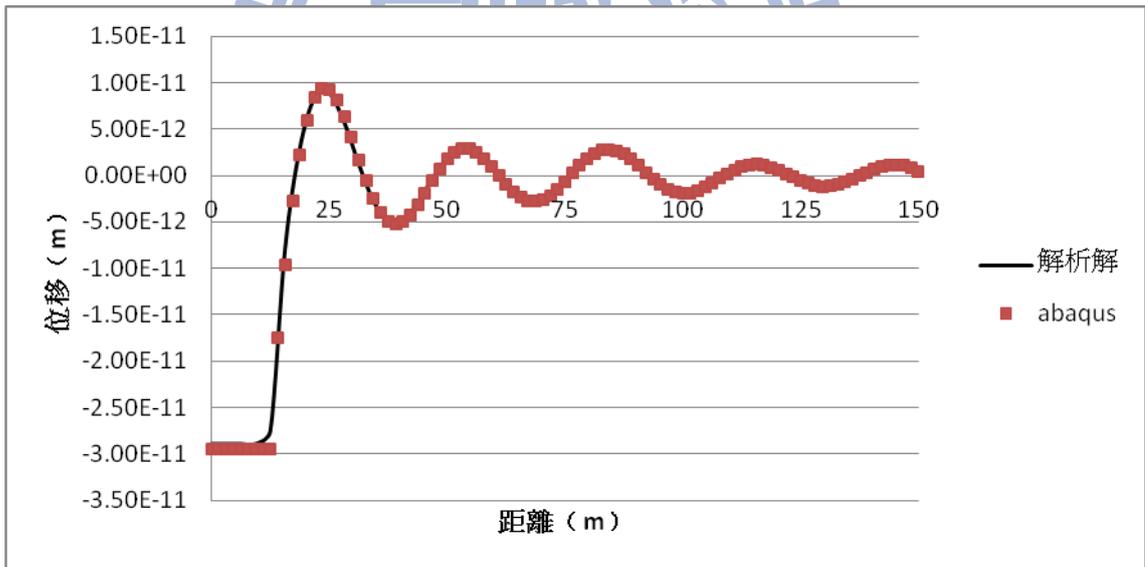


(b) 虛部部分

Fig. 3.110 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r ）

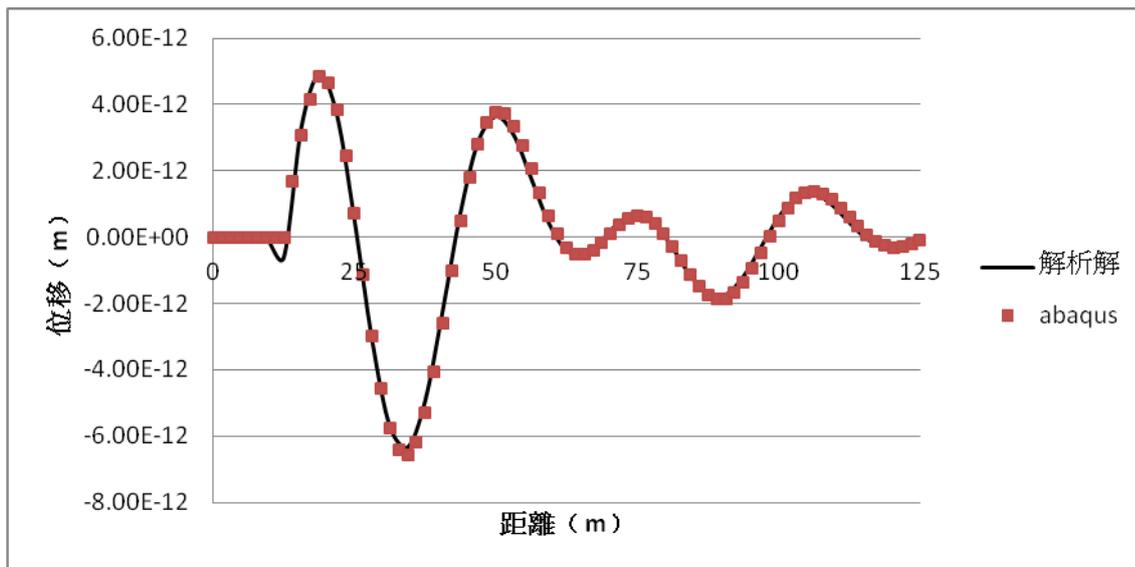


(a) 實部部分

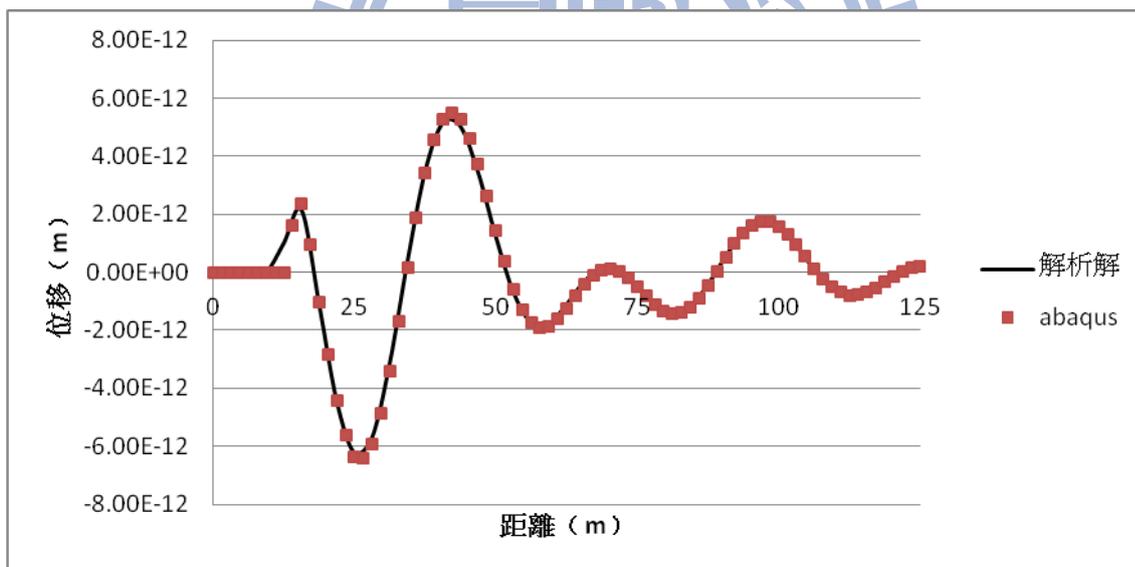


(b) 虛部部分

Fig. 3.111 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z ）

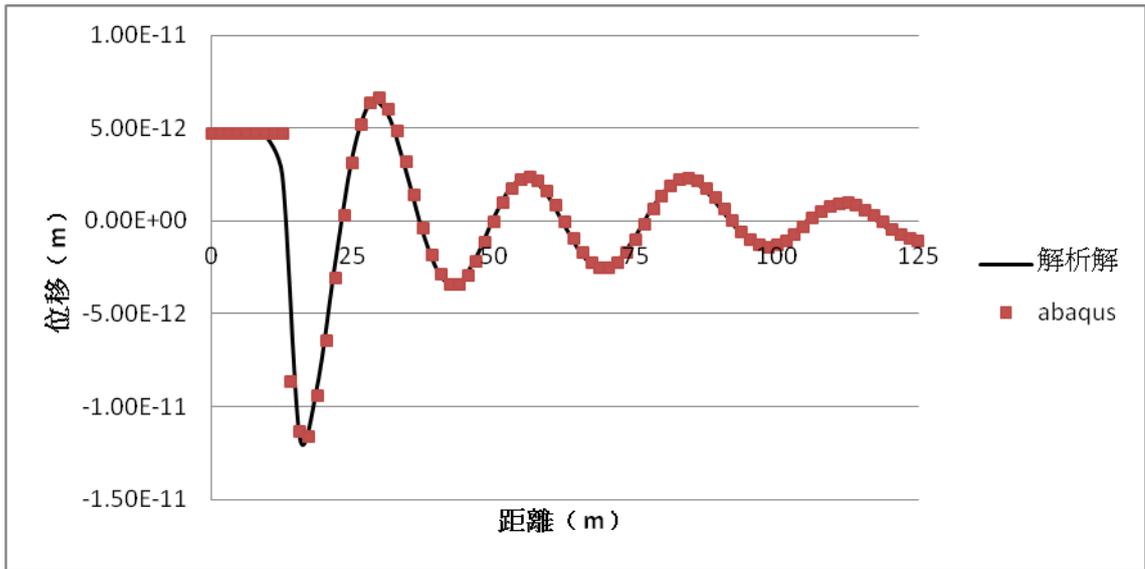


(a) 實部部分

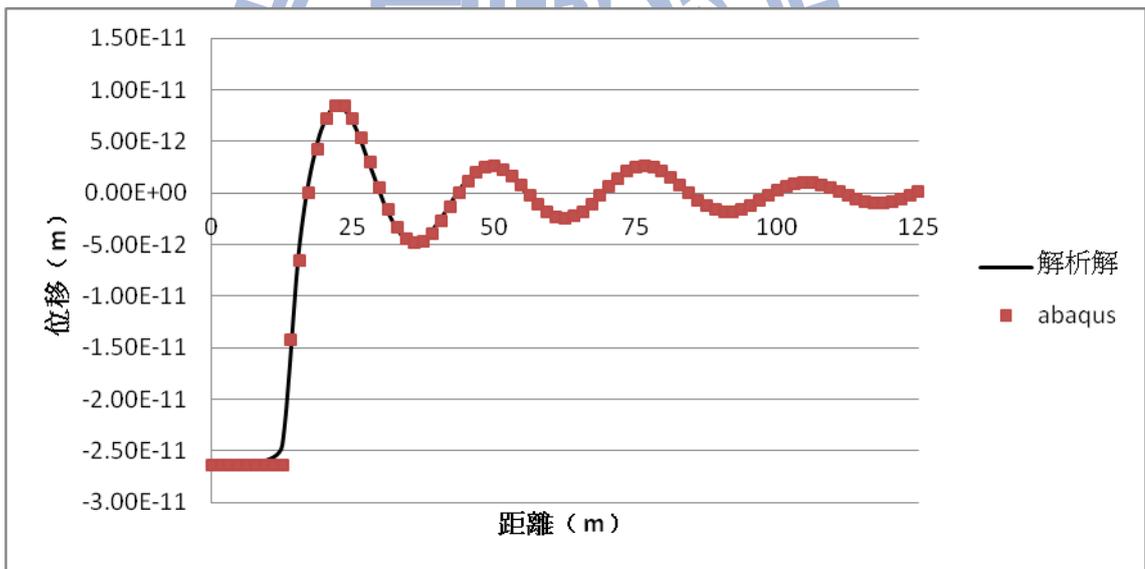


(b) 虛部部分

Fig. 3.112 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r ）

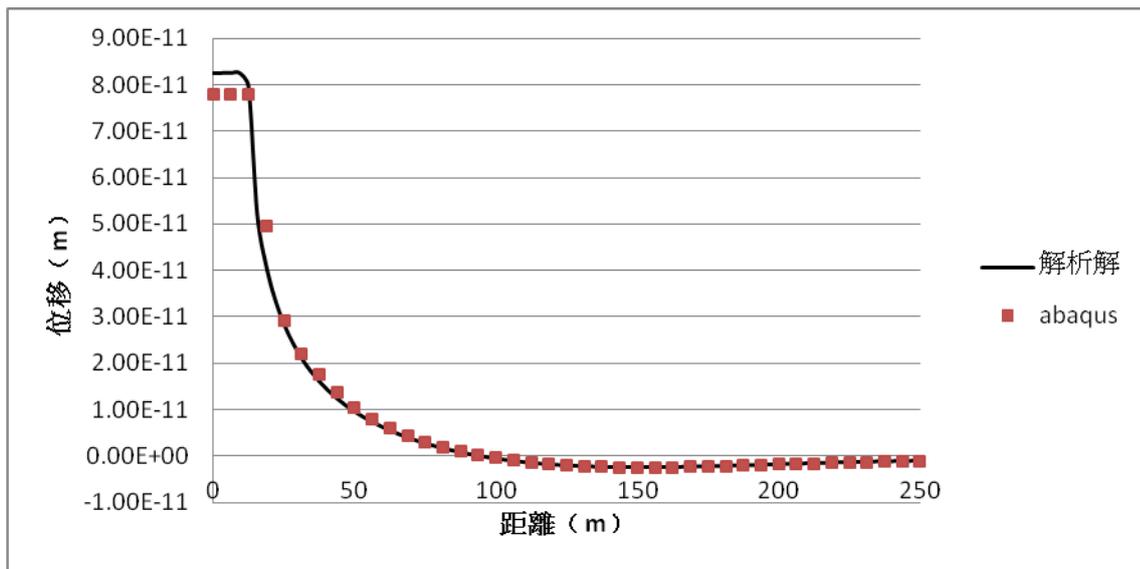


(a) 實部部分

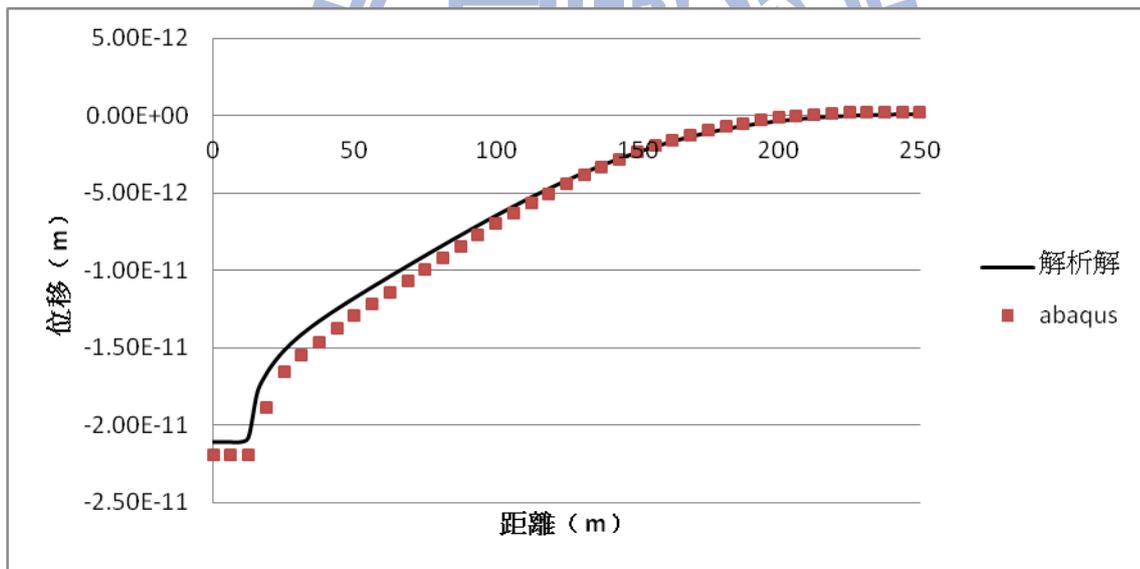


(b) 虛部部分

Fig. 3.113 模型驗證：模型一（鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z ）

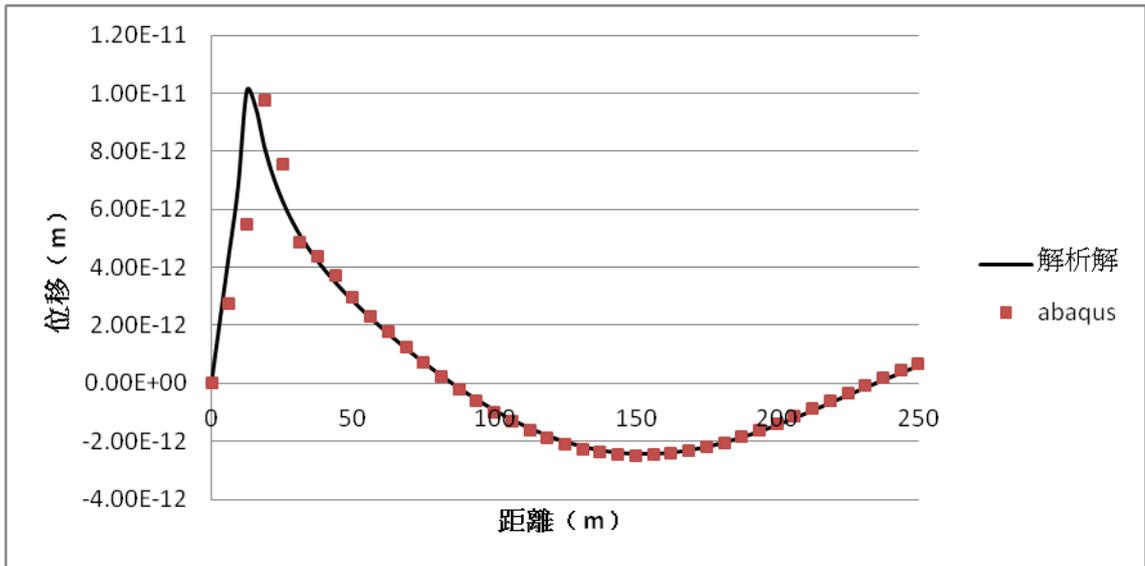


(a) 實部部分

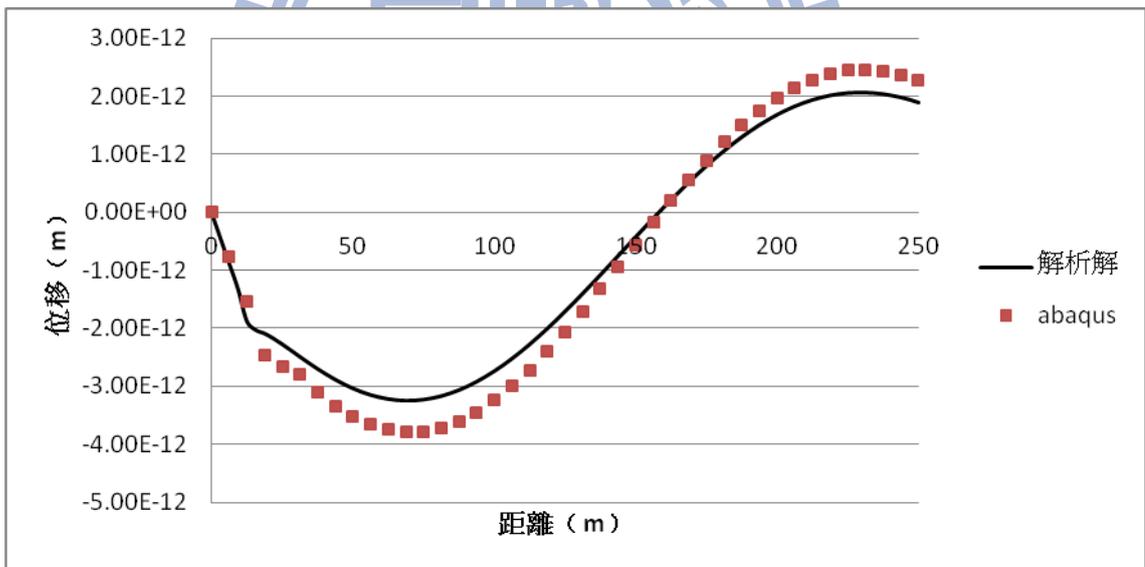


(b) 虛部部分

Fig. 3.114 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r ）

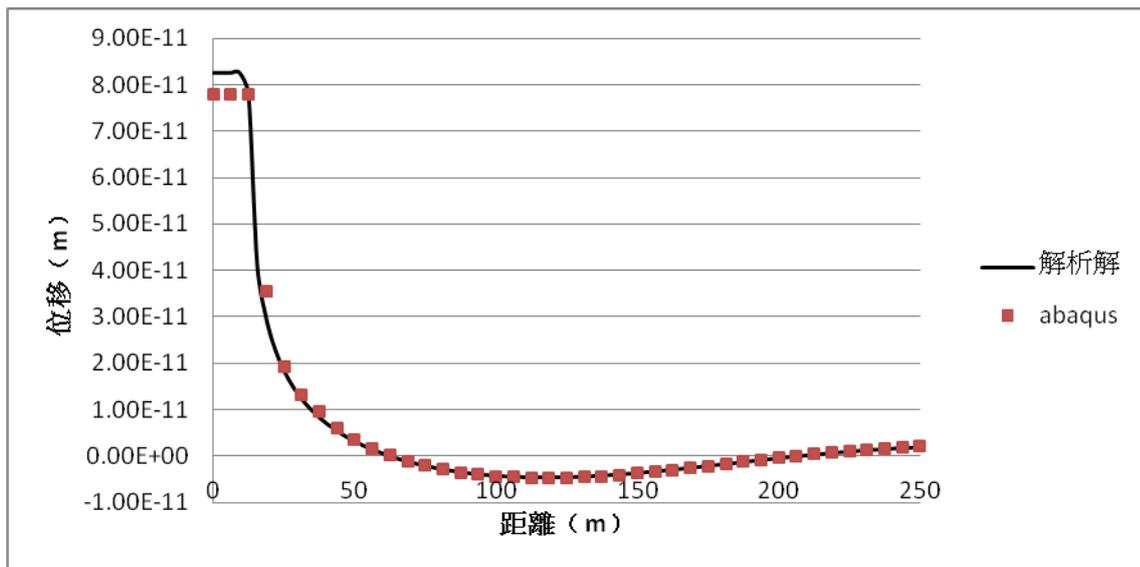


(a) 實部部分

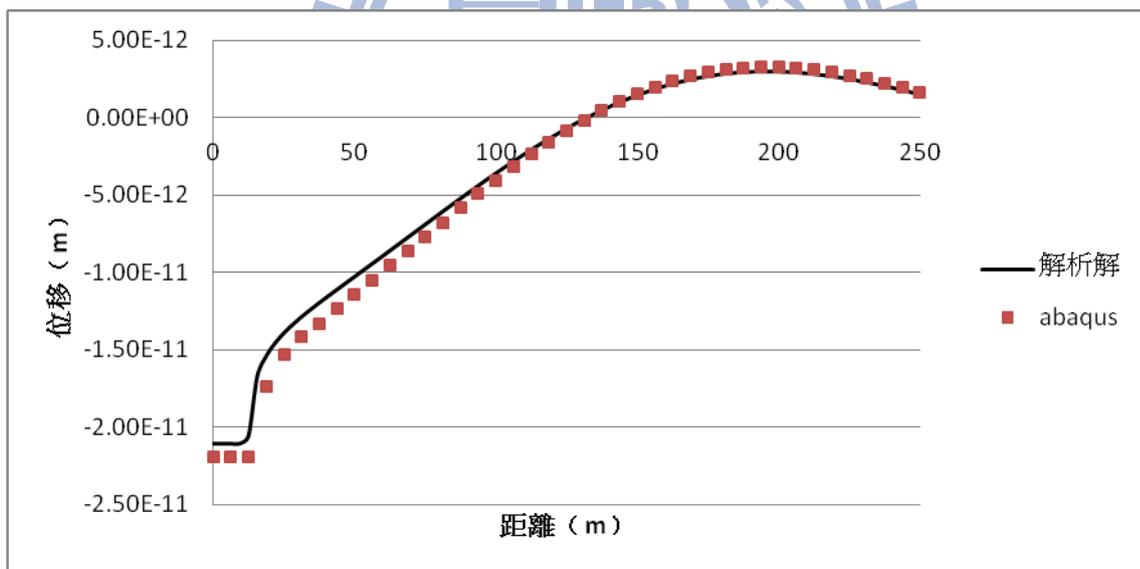


(b) 虛部部分

Fig. 3.115 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z ）



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.116 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 1Hz 之 U_θ ）

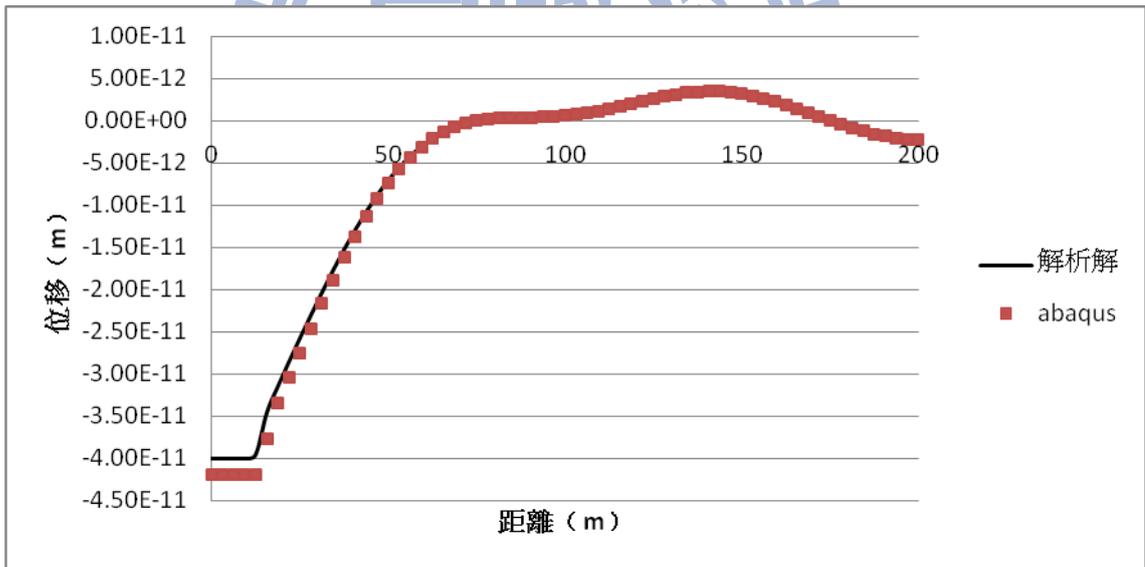
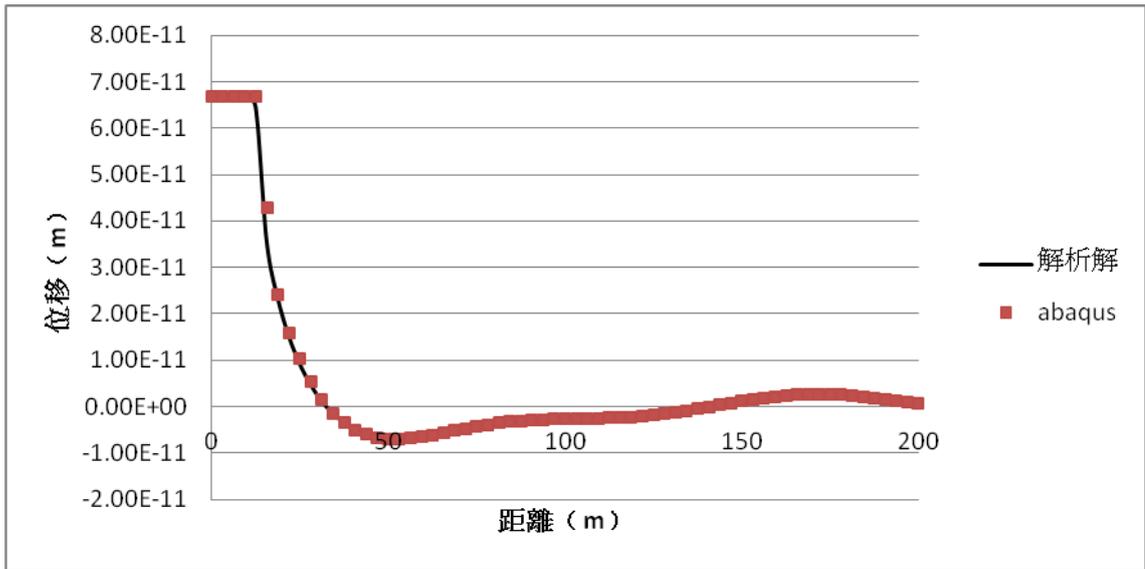
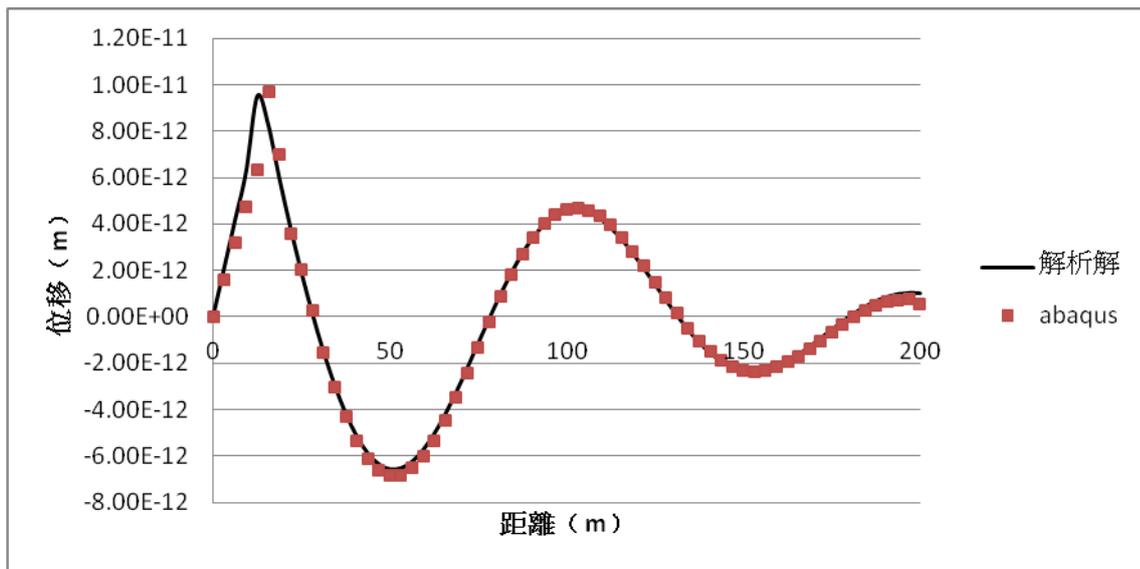
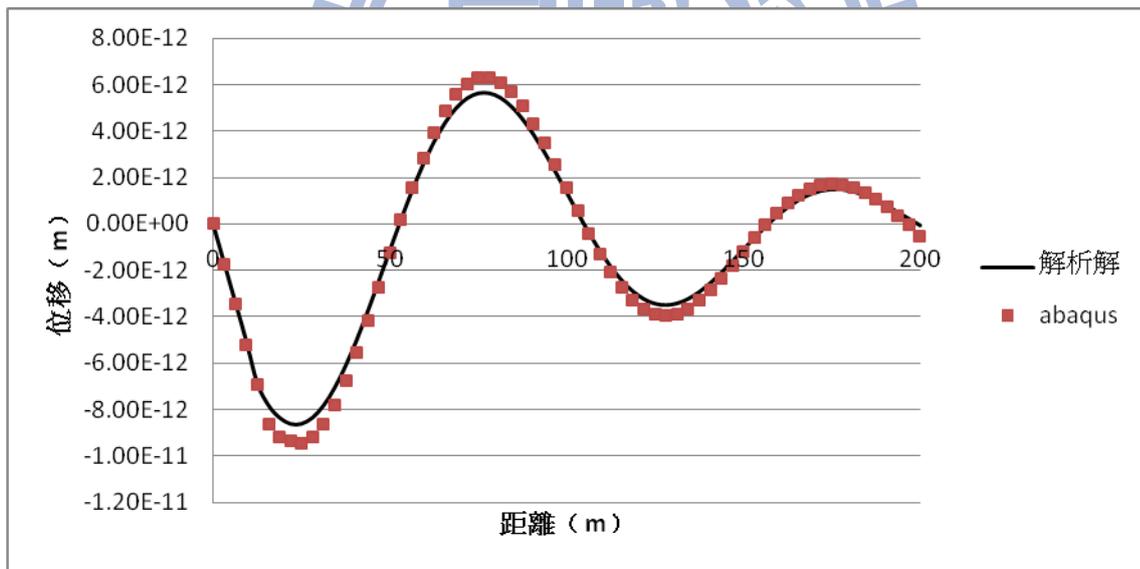


Fig. 3.117 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r ）



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.118 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z ）

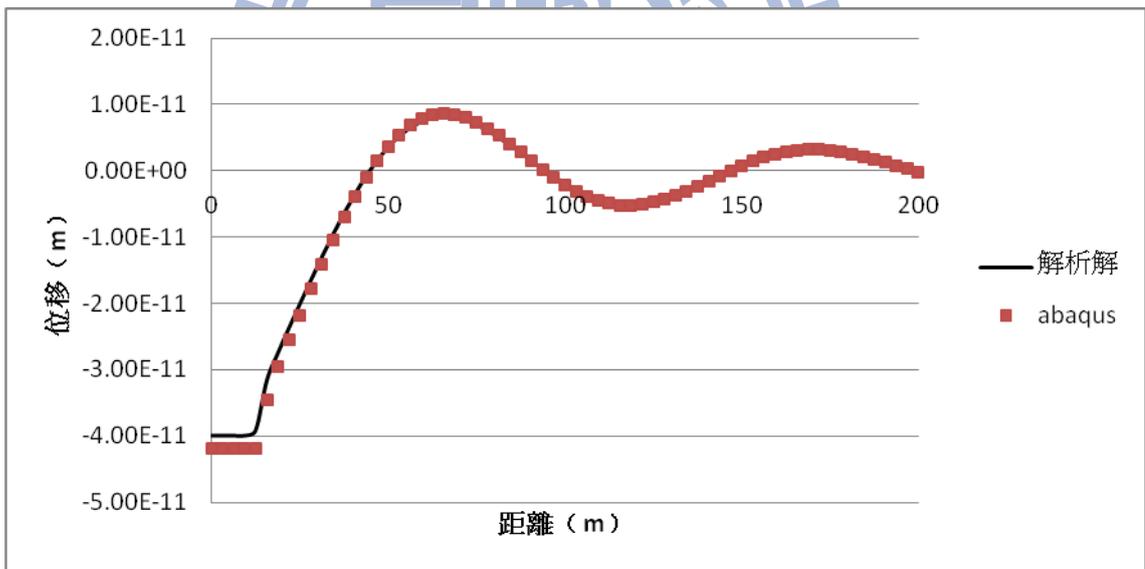
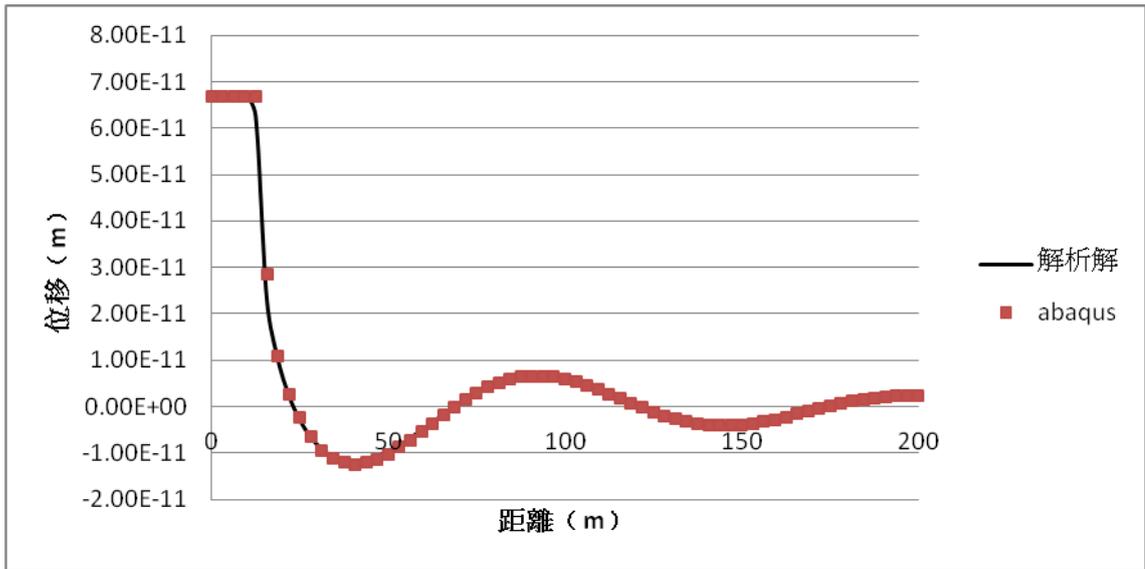
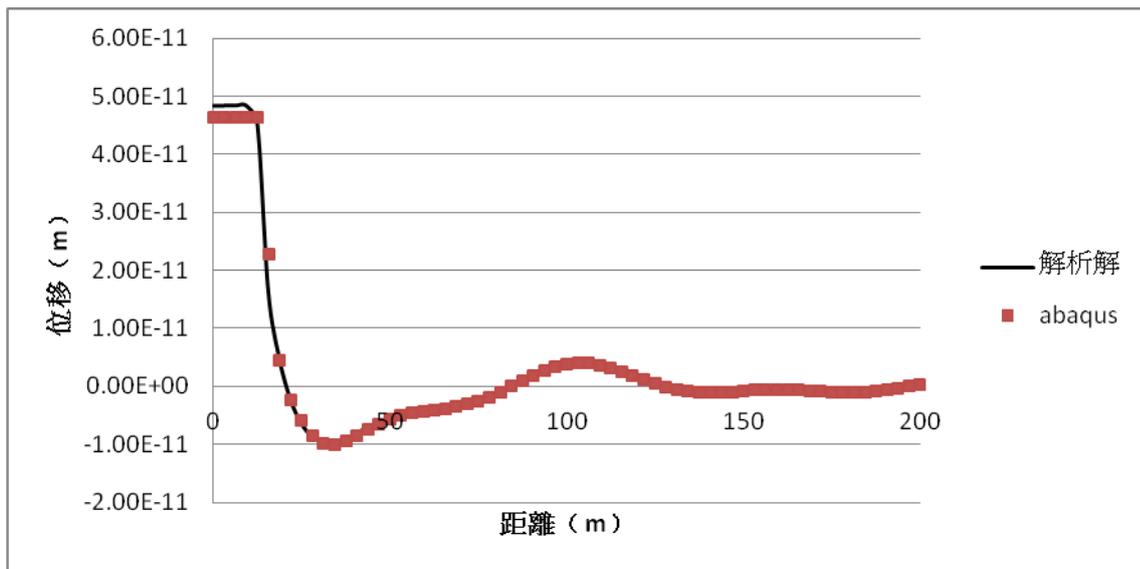
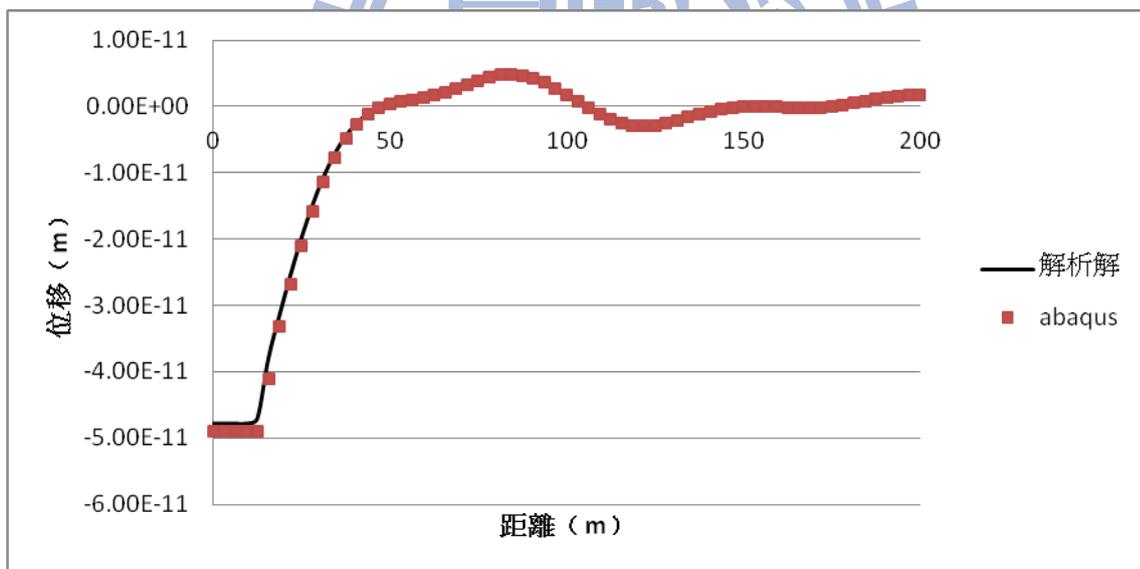


Fig. 3.119 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 3Hz 之 U_{θ} ）

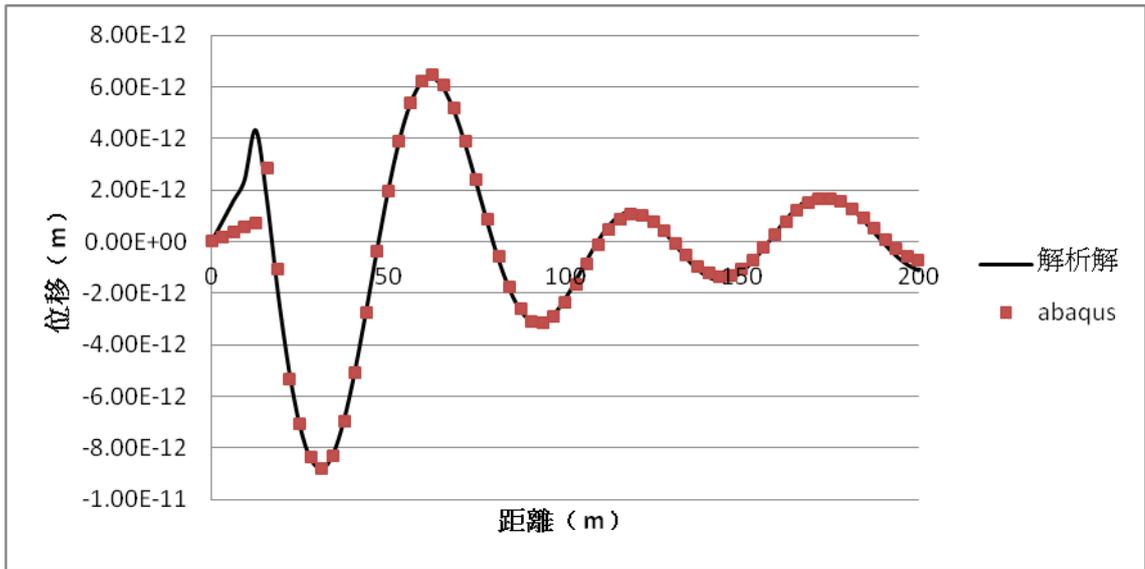


(a) 實部部分

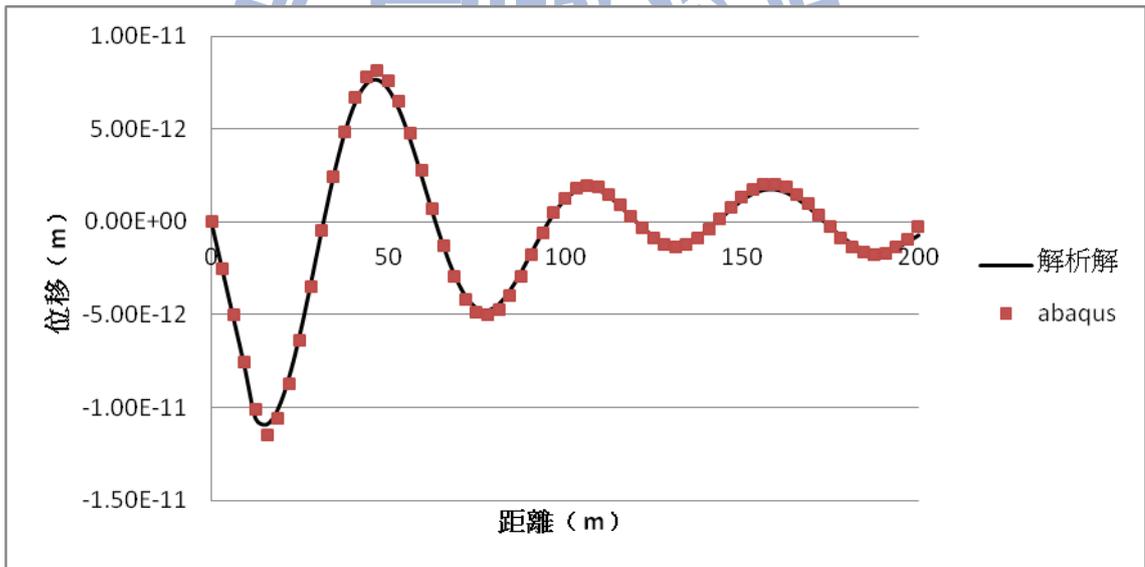


(b) 虛部部分

Fig. 3.120 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r ）

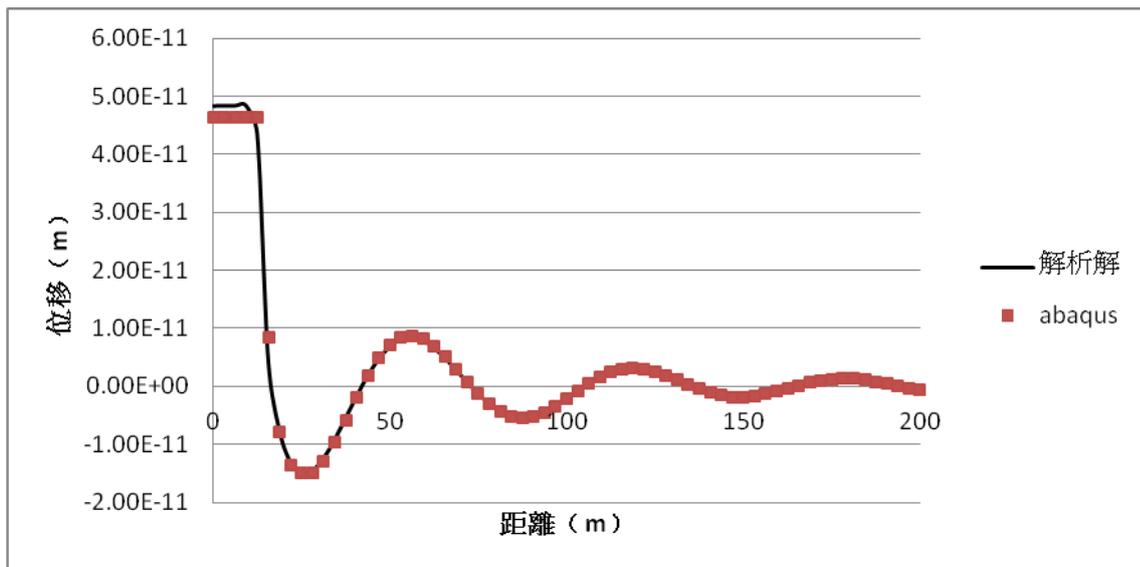


(a) 實部部分

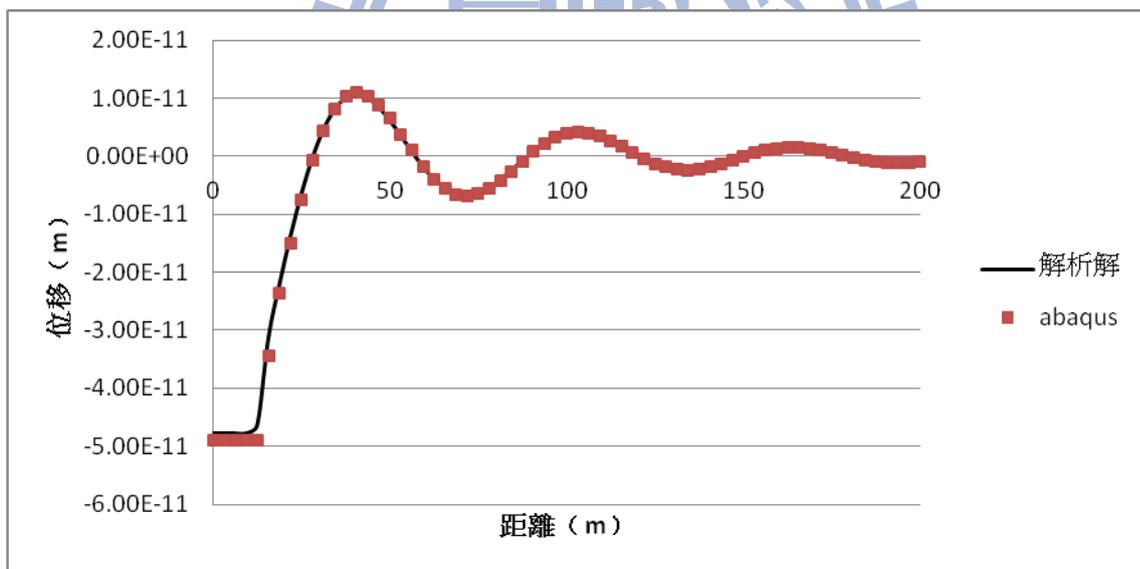


(b) 虛部部分

Fig. 3.121 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z ）

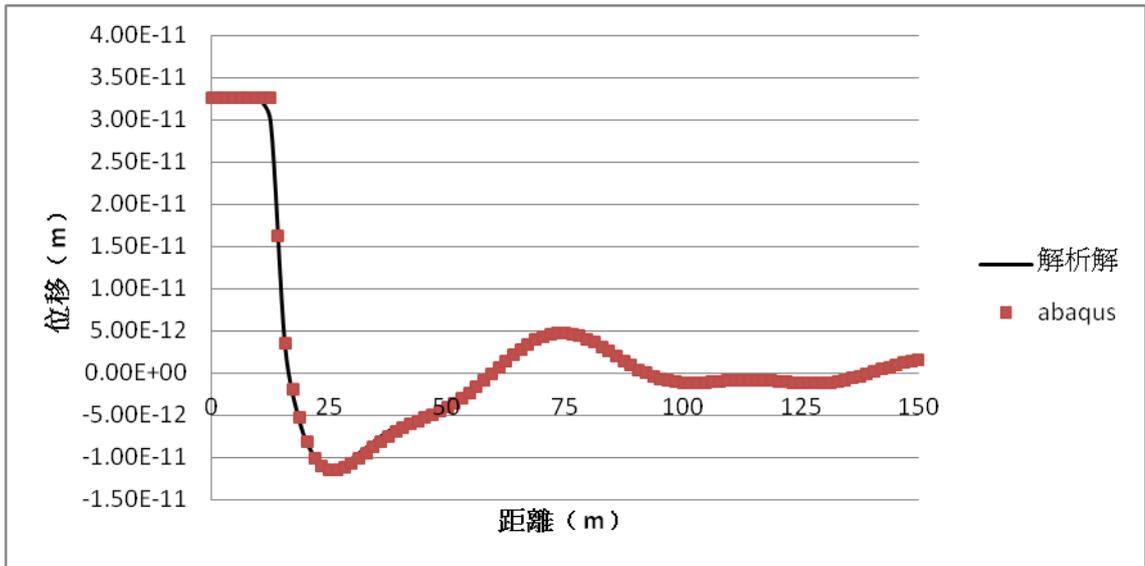


(a) 實部部分

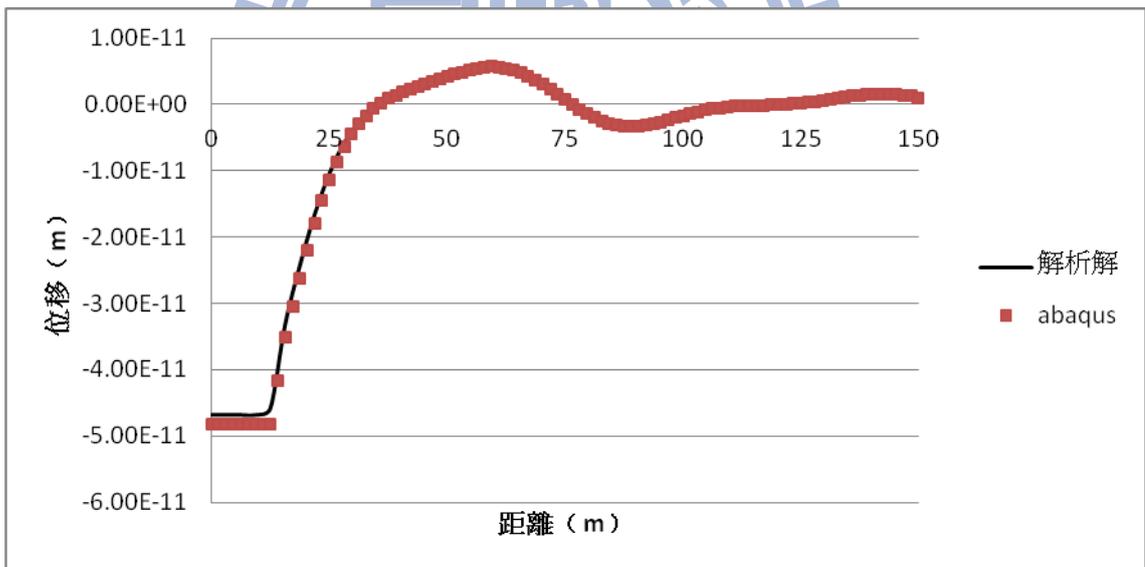


(b) 虛部部分

Fig. 3.122 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 5Hz 之 U_θ ）

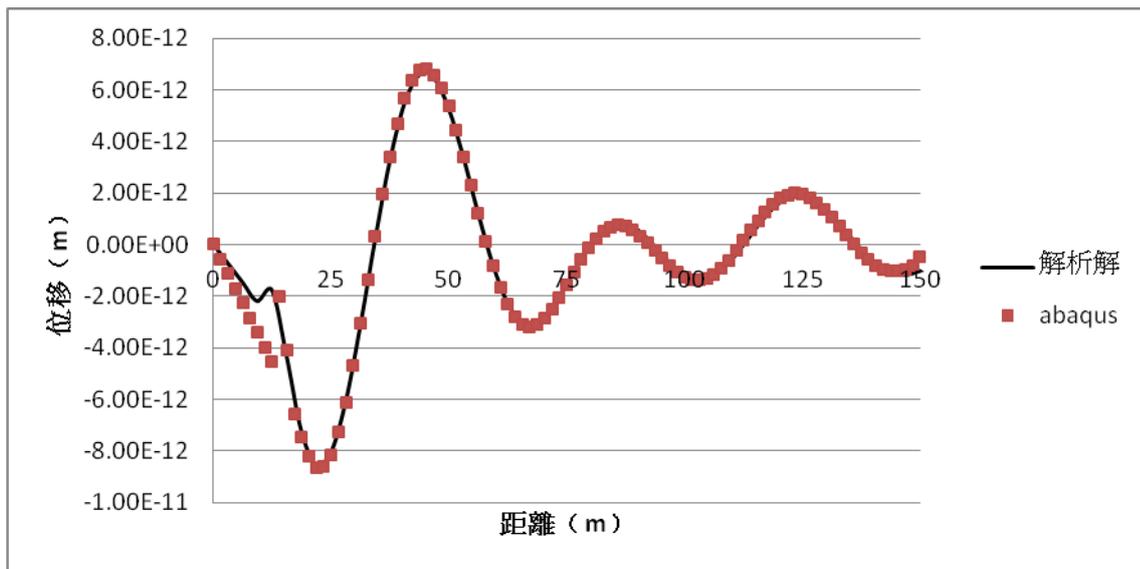


(a) 實部部分

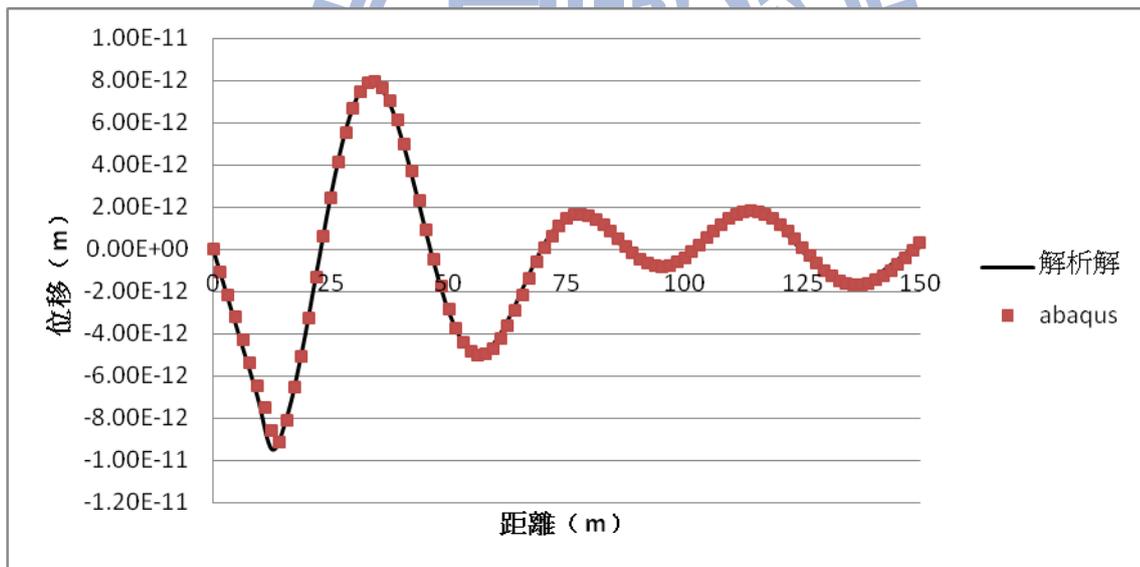


(b) 虛部部分

Fig. 3.123 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r ）

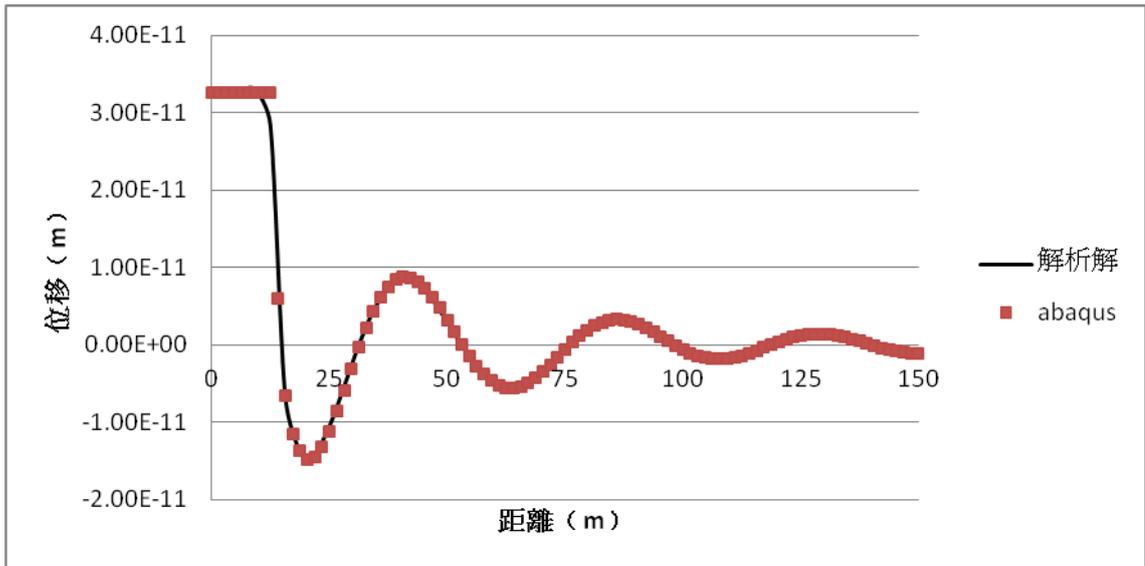


(a) 實部部分

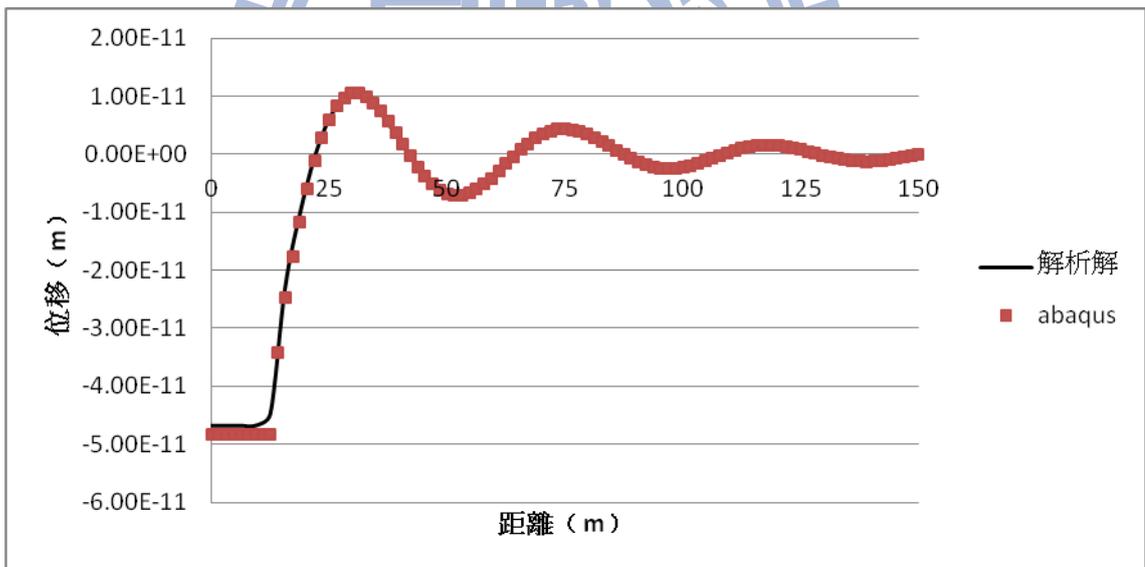


(b) 虛部部分

Fig. 3.124 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z ）

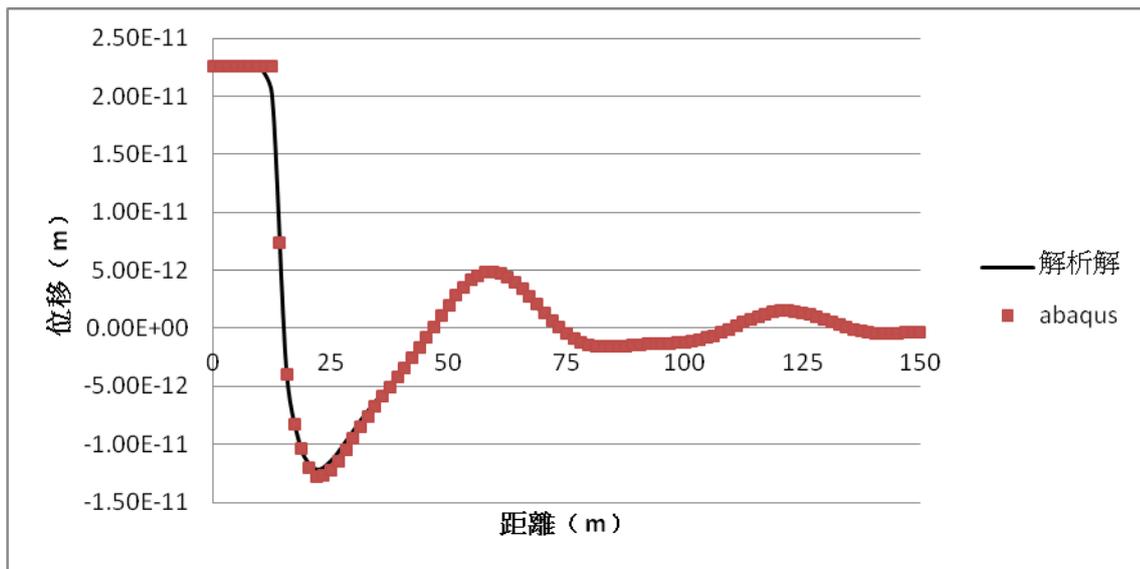


(a) 實部部分

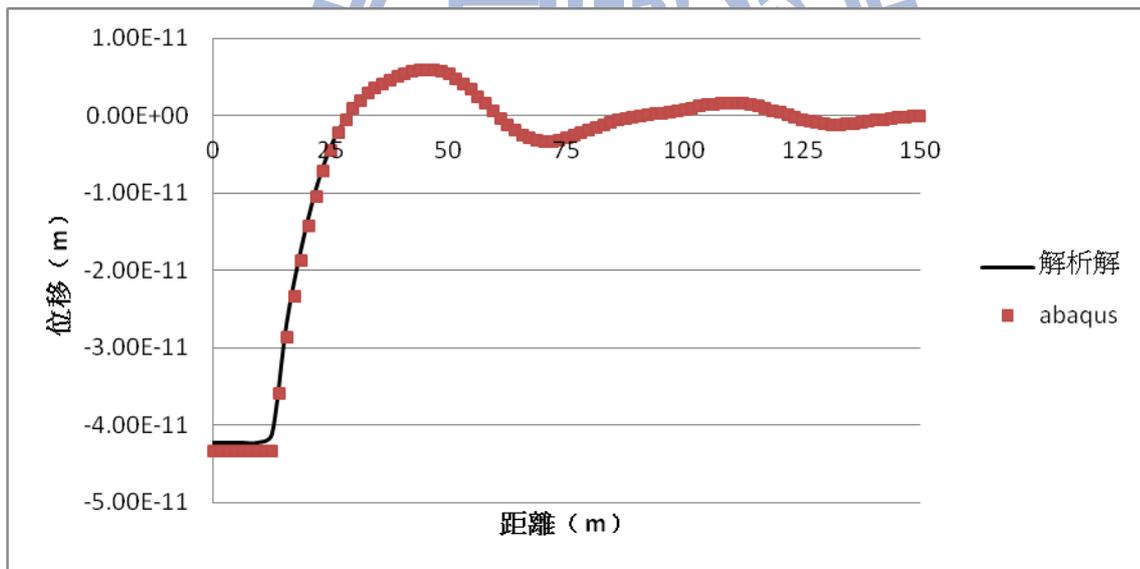


(b) 虛部部分

Fig. 3.125 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 7Hz 之 U_θ ）

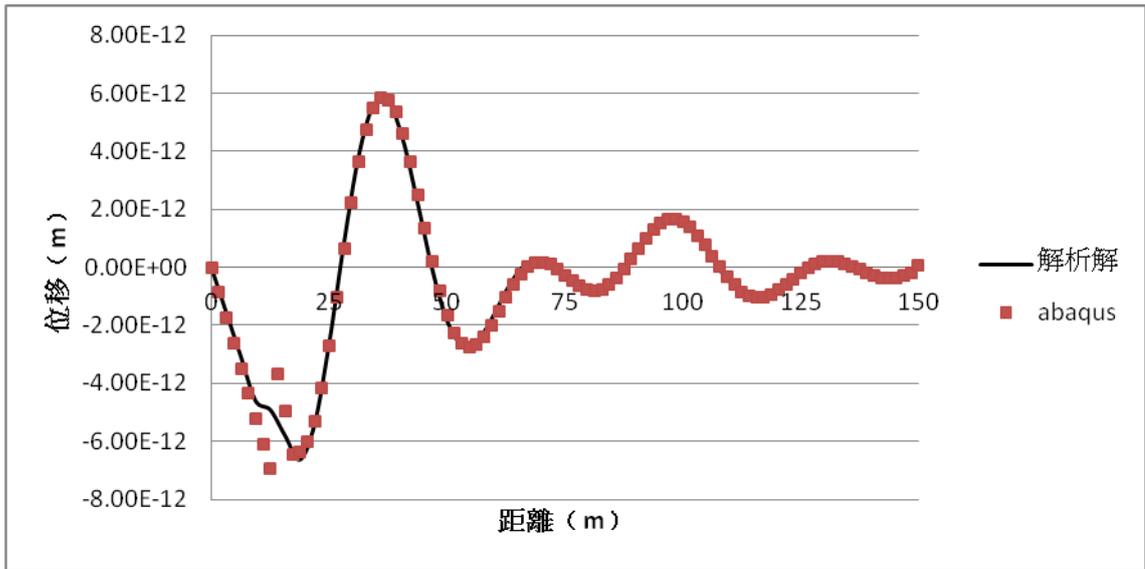


(a) 實部部分

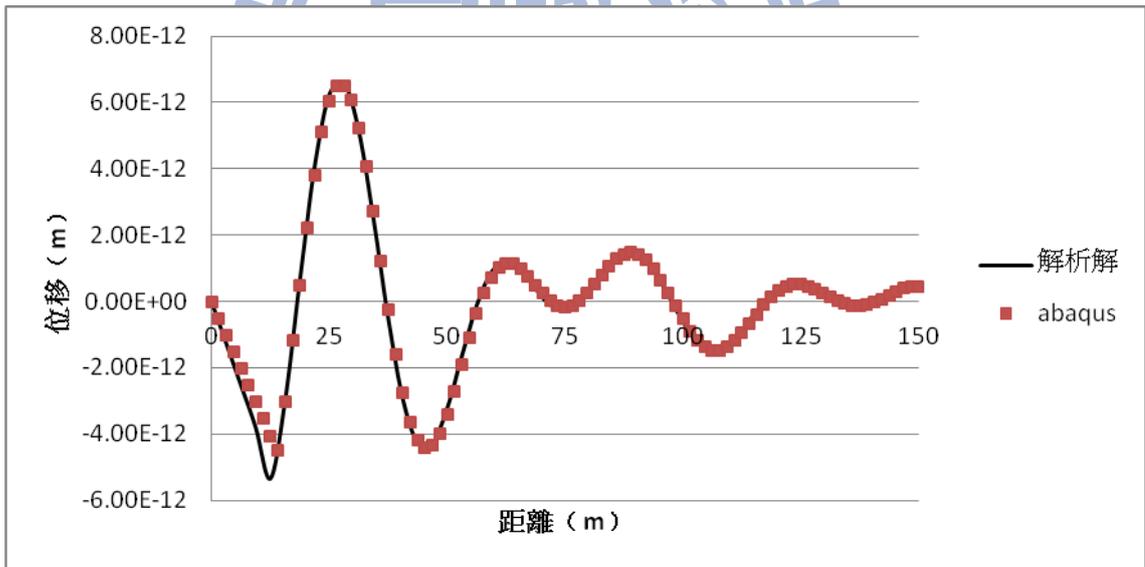


(b) 虛部部分

Fig. 3.126 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r ）

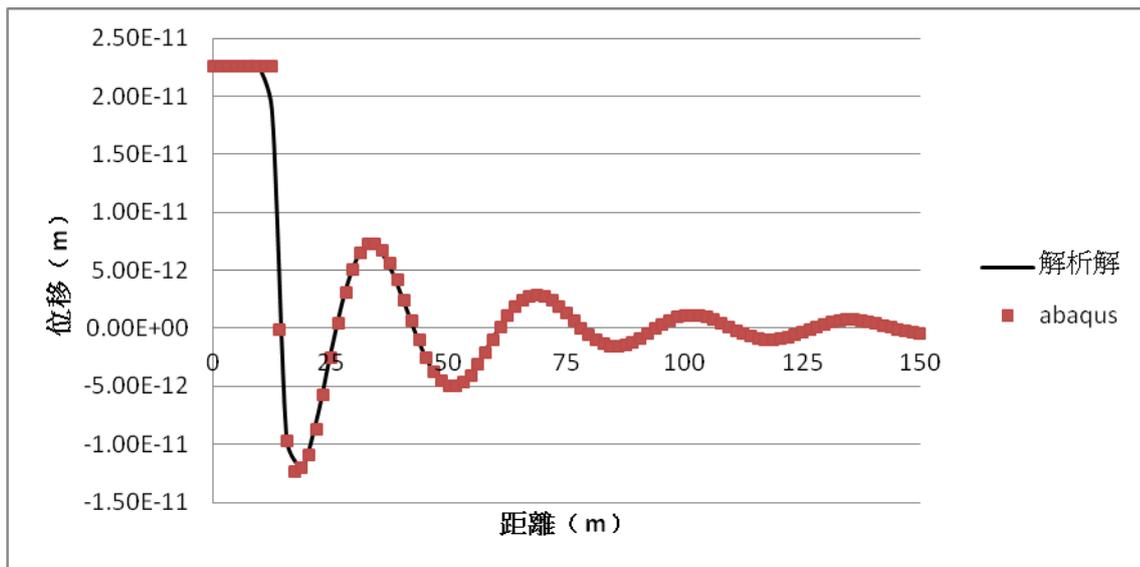


(a) 實部部分

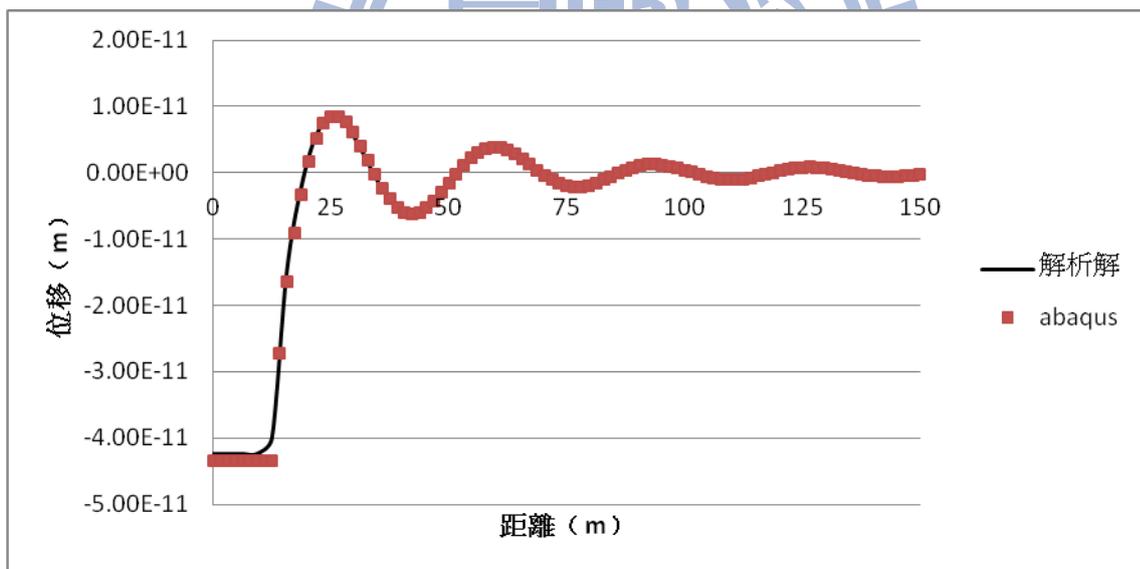


(b) 虛部部分

Fig. 3.127 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z ）

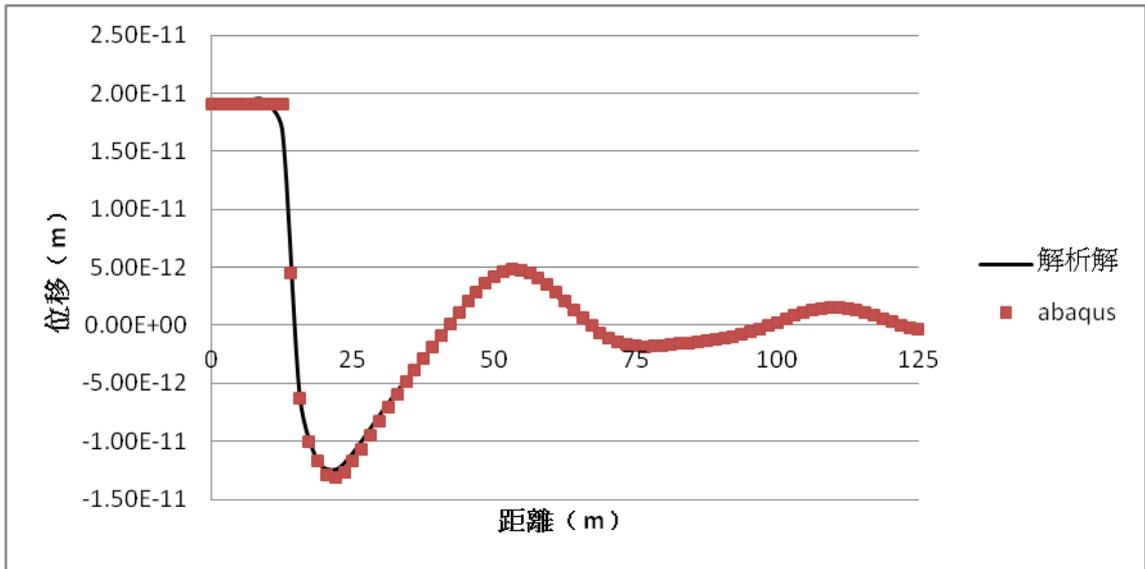


(a) 實部部分

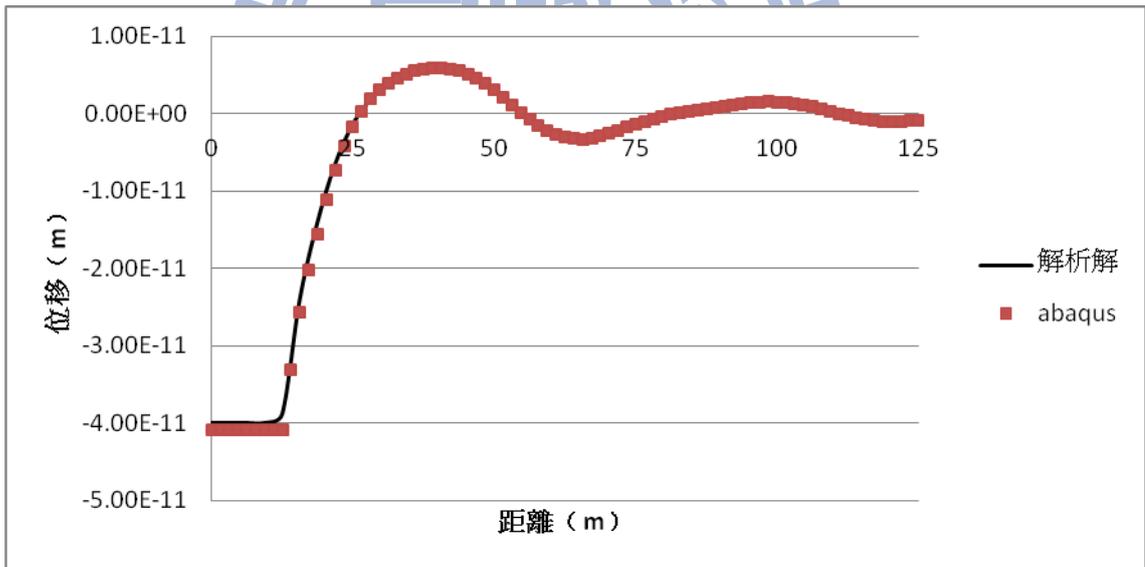


(b) 虛部部分

Fig. 3.128 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 9Hz 之 U_θ ）



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.129 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r ）

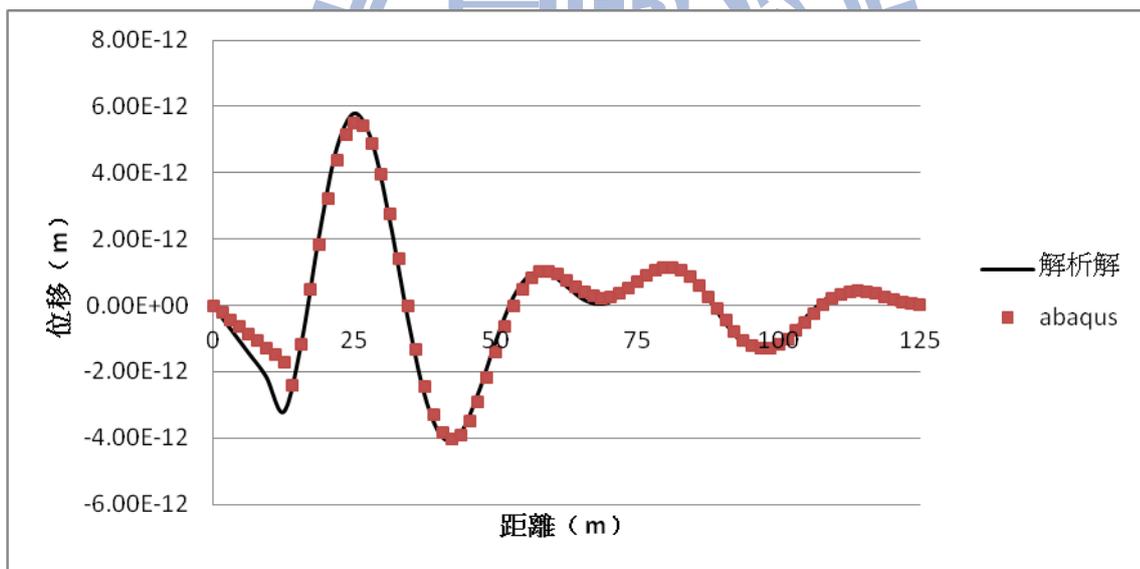
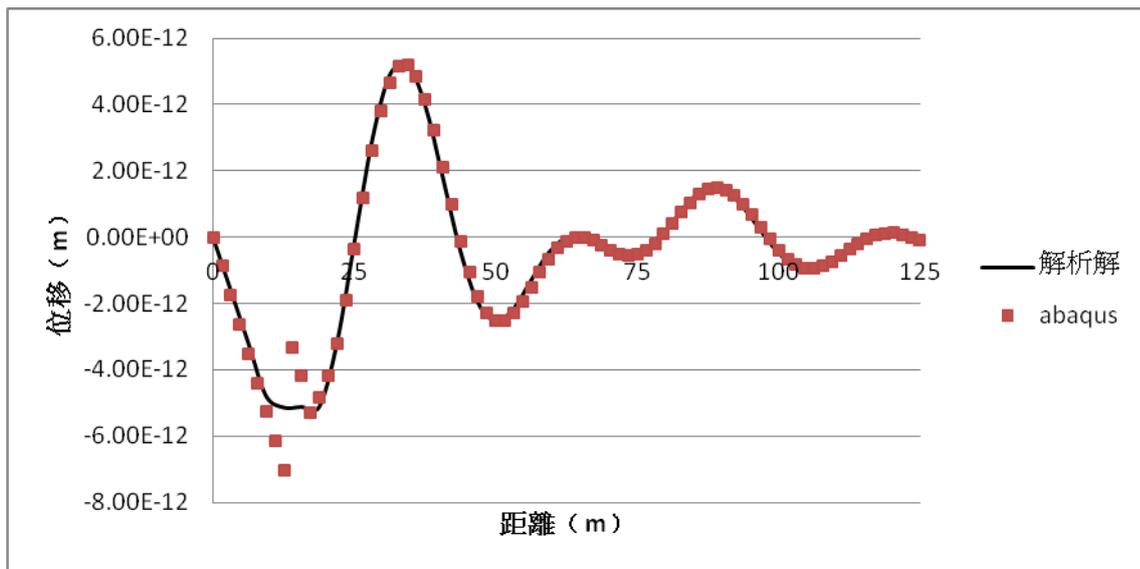
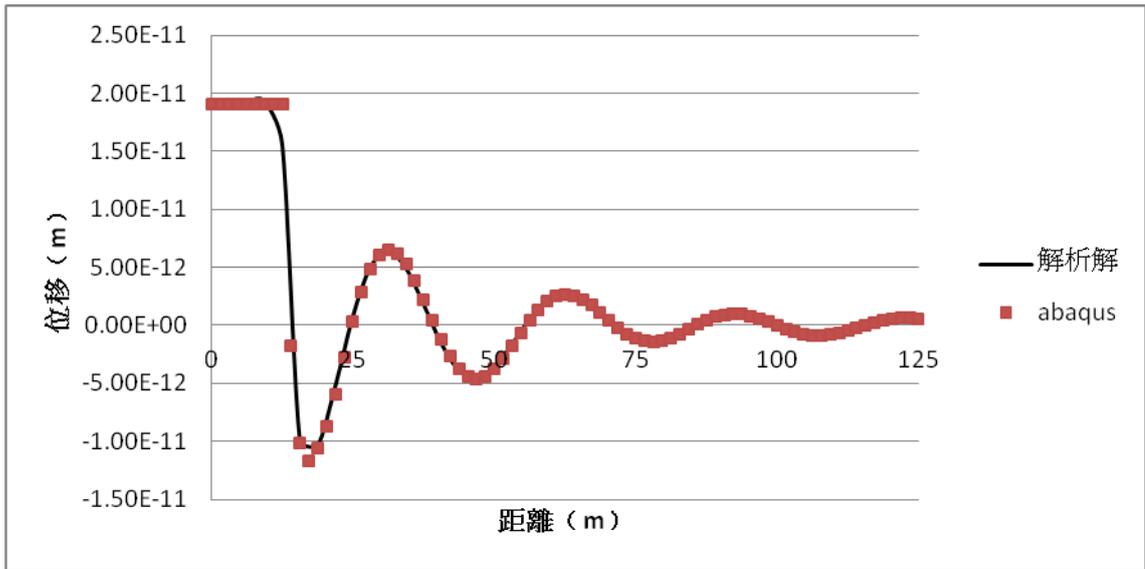
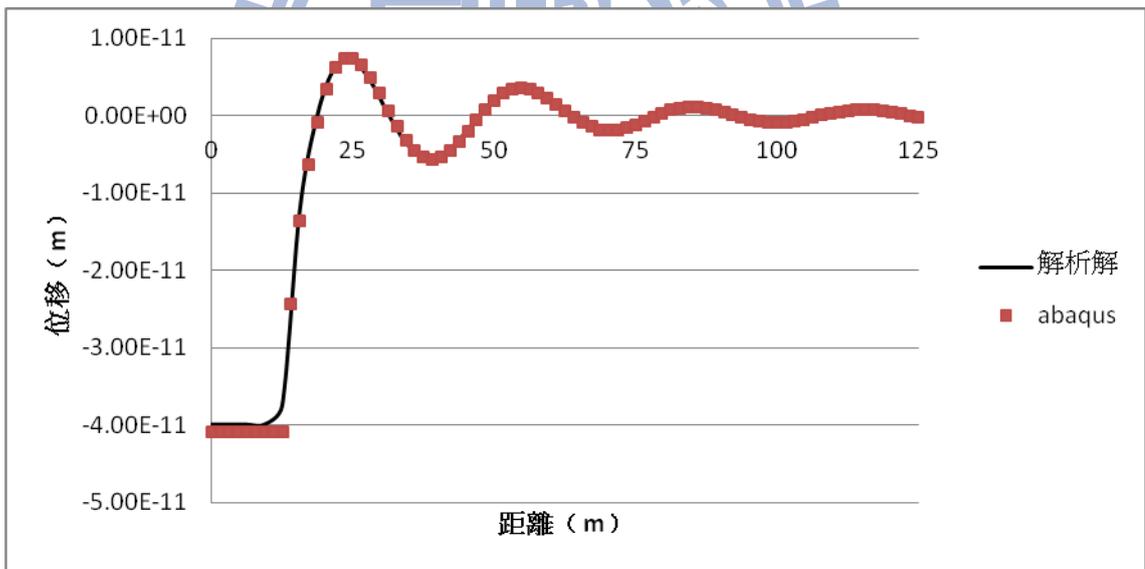


Fig. 3.130 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z ）



(a) 實部部分



(b) 虛部部分

Fig. 3.131 模型驗證：模型一（水平方向振動頻率 10Hz 之 U_θ ）

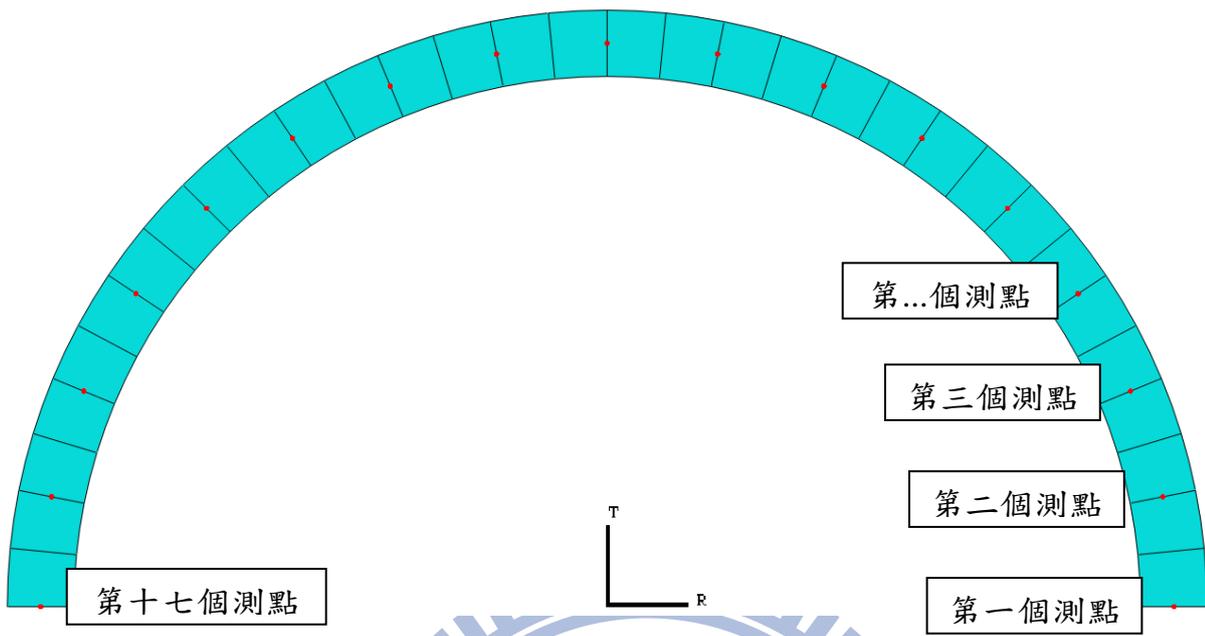


Fig. 4.1 屏蔽隧道區之測點設置

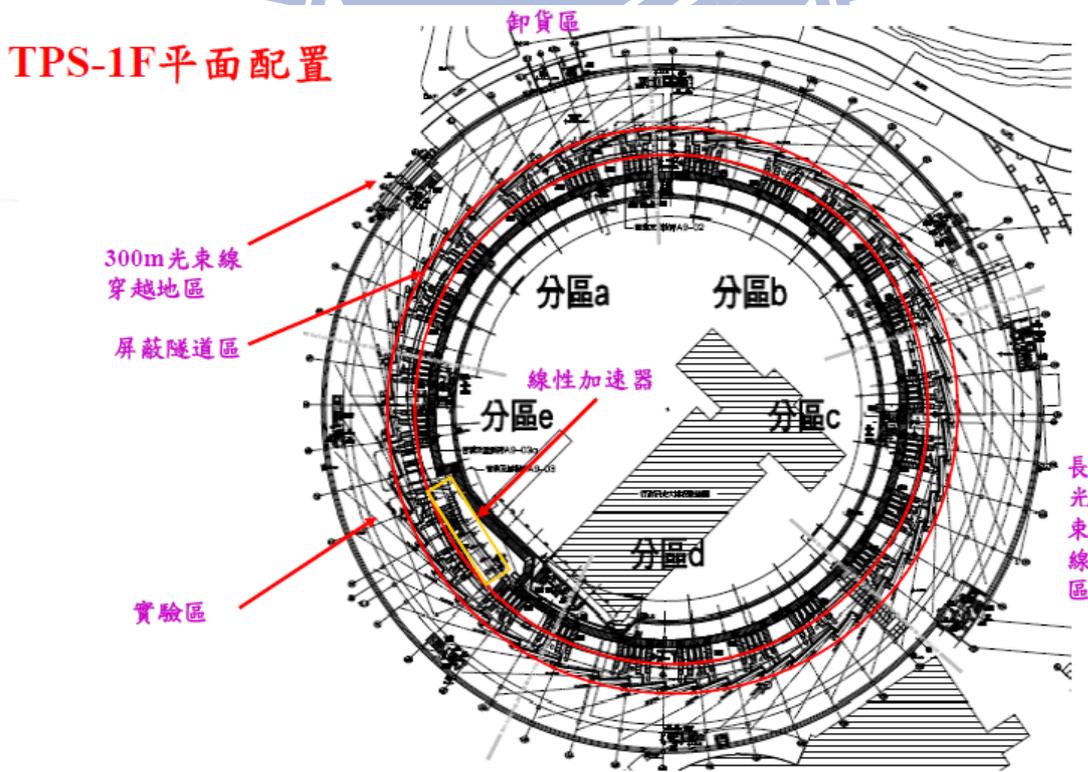


Fig. 4.2 TPS-1F 平面配置圖

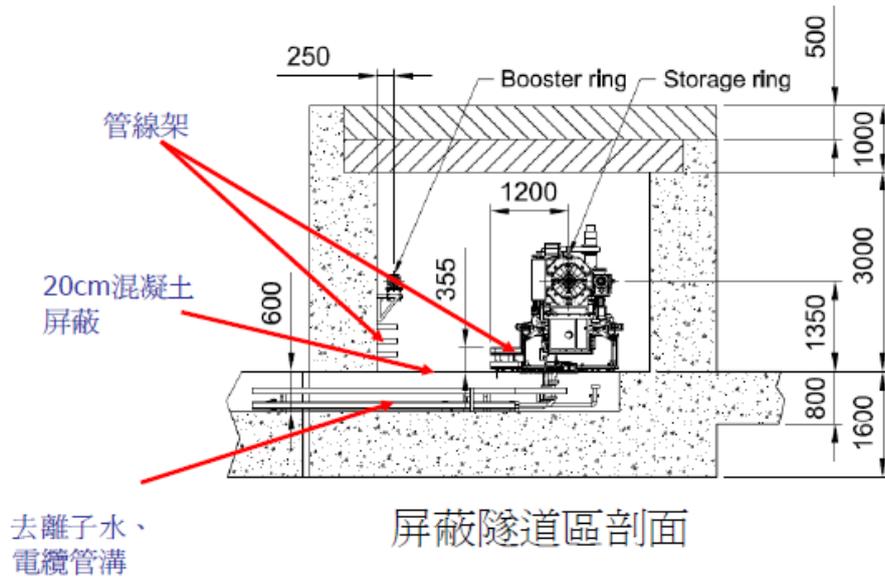


Fig. 4.3 屏蔽隧道區剖面圖

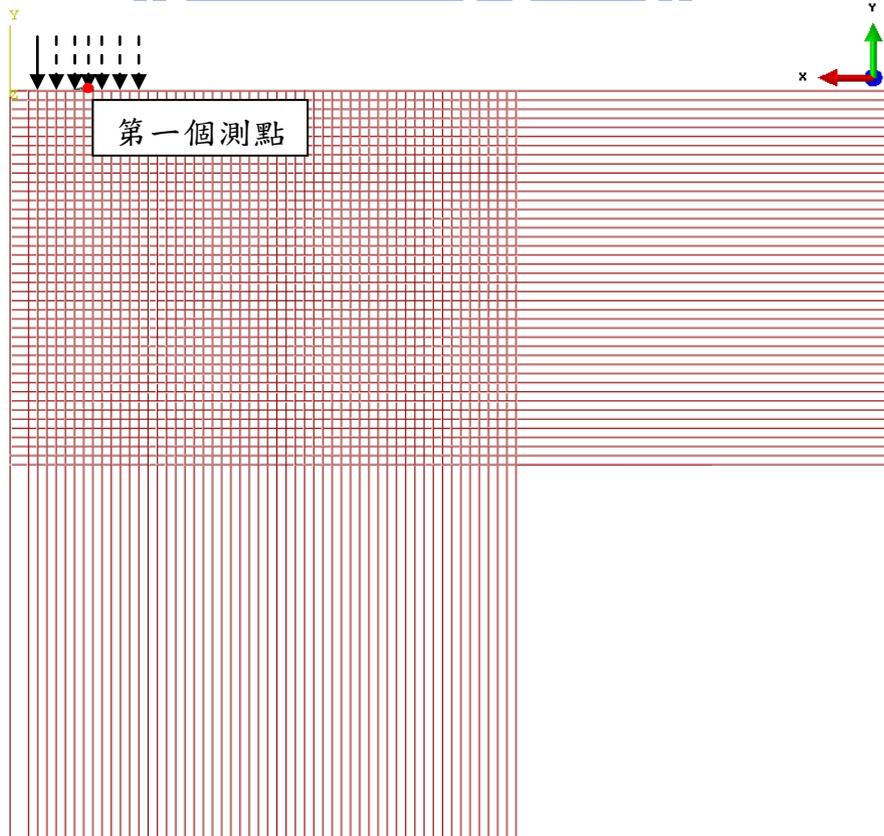
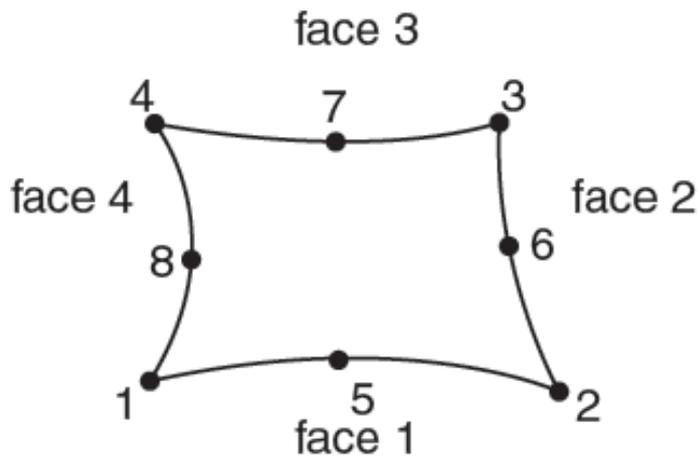


Fig. 4.4 七個施力點位置依序變動示意圖



8-node element

Fig. 4.5 三維殼元素 8-node[14]

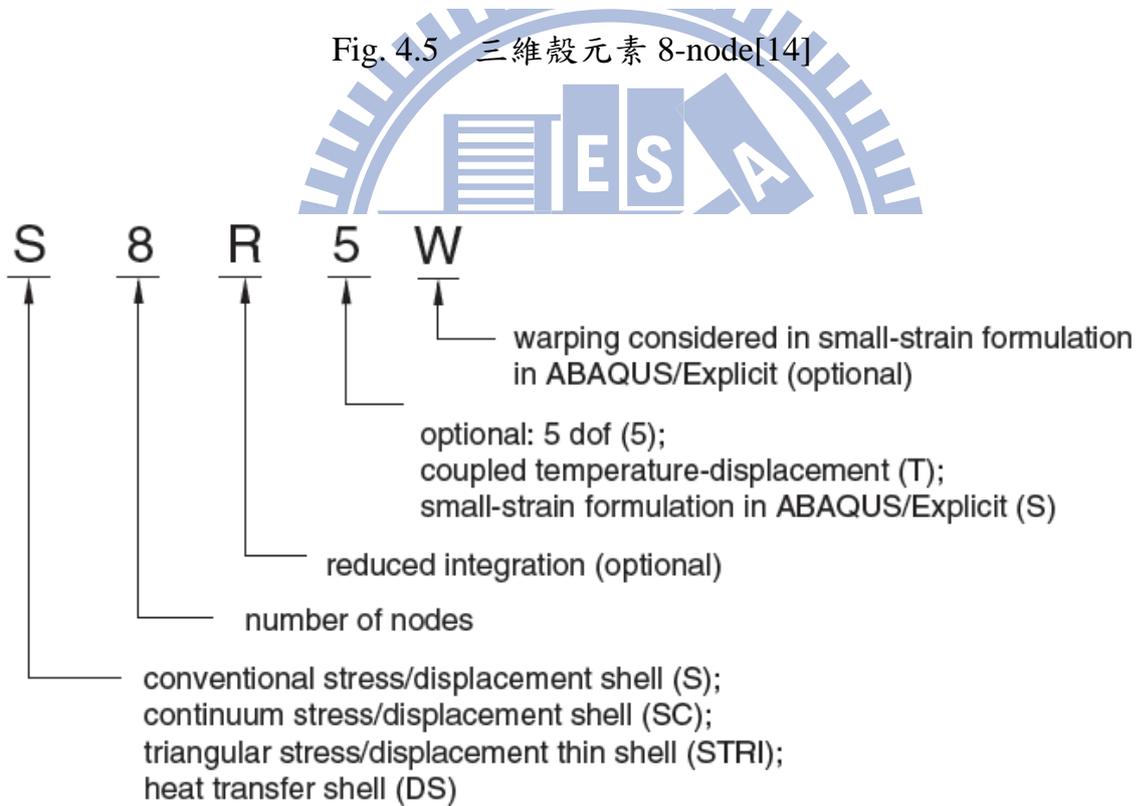
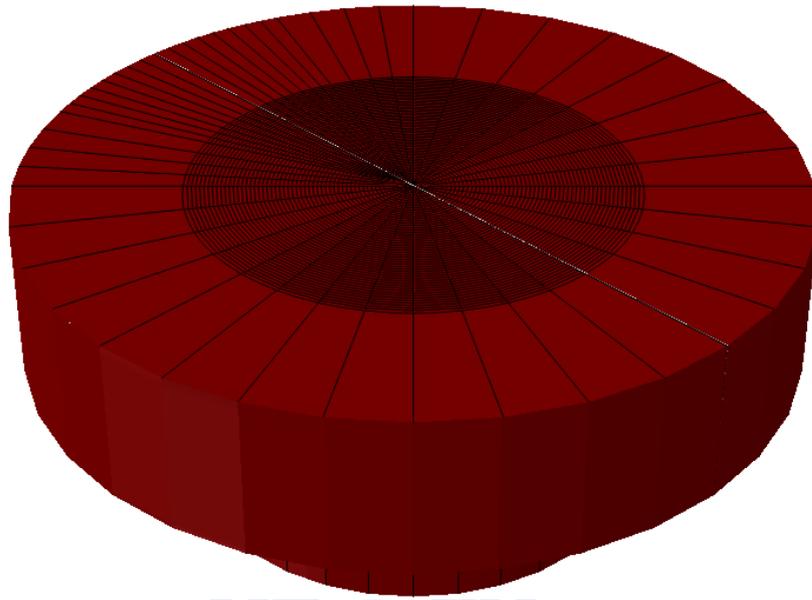
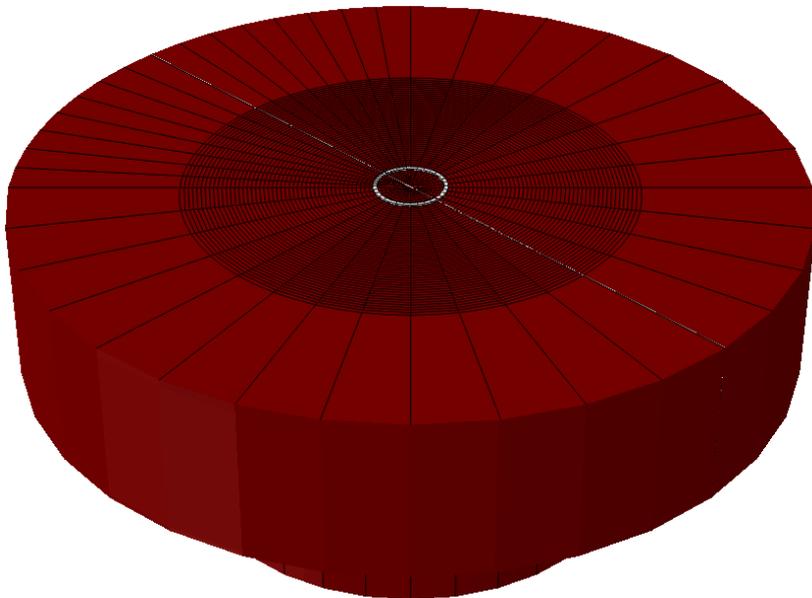


Fig. 4.6 殼元素的命名及其代表的意義[14]

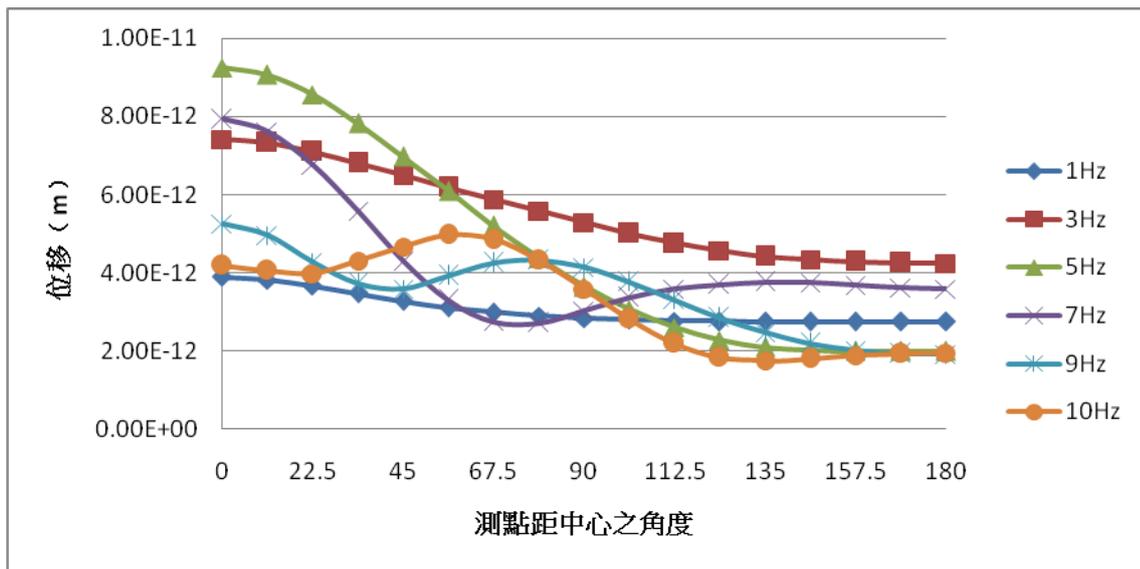


(a) 無放置屏蔽隧道區

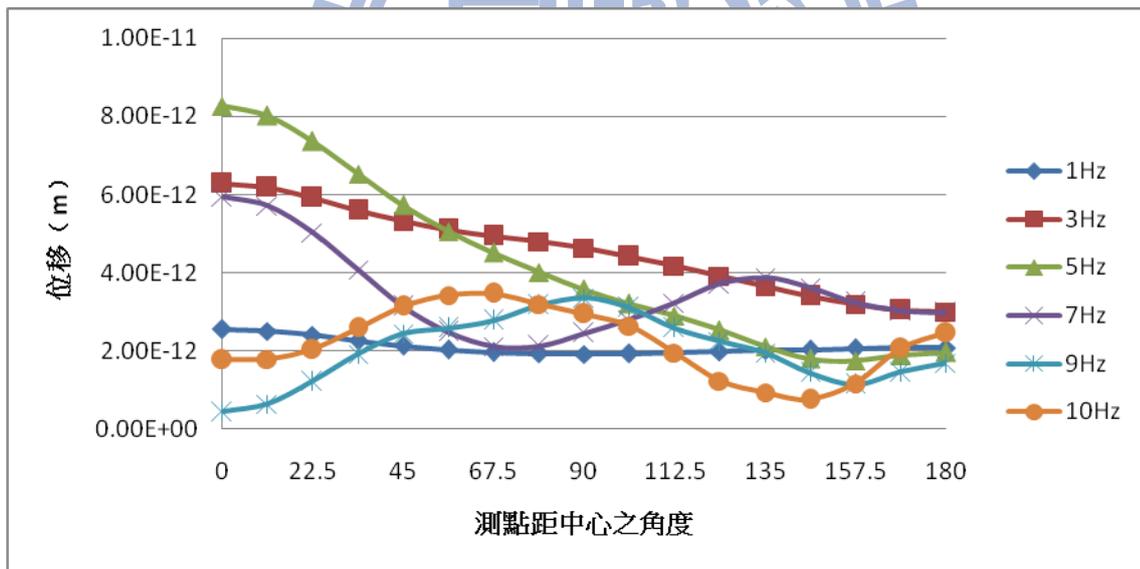


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.7 土壤無開挖之分析示意圖

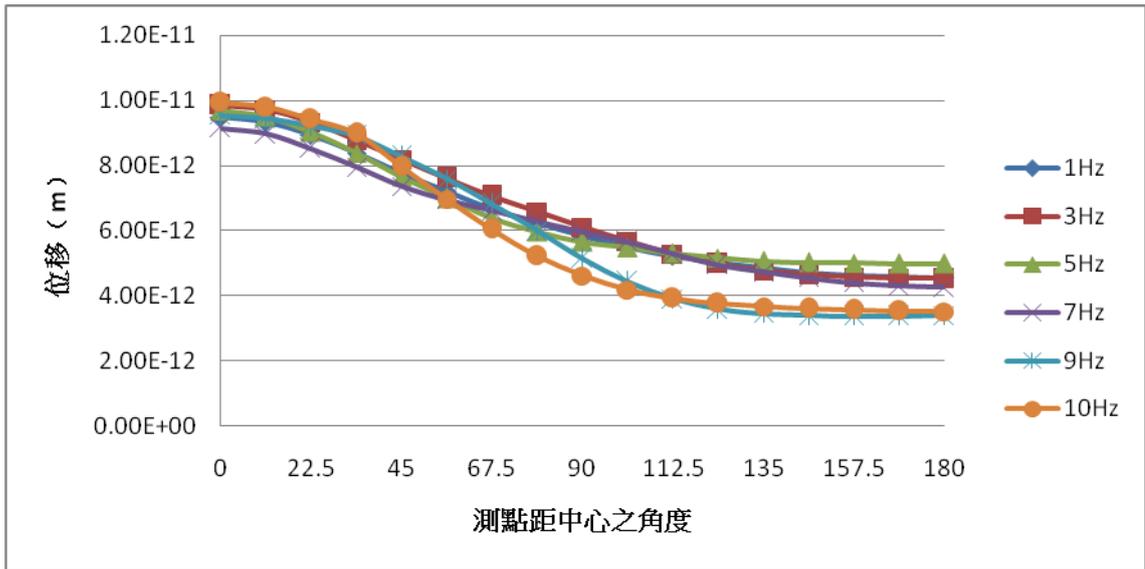


(a) 無放置屏蔽隧道區

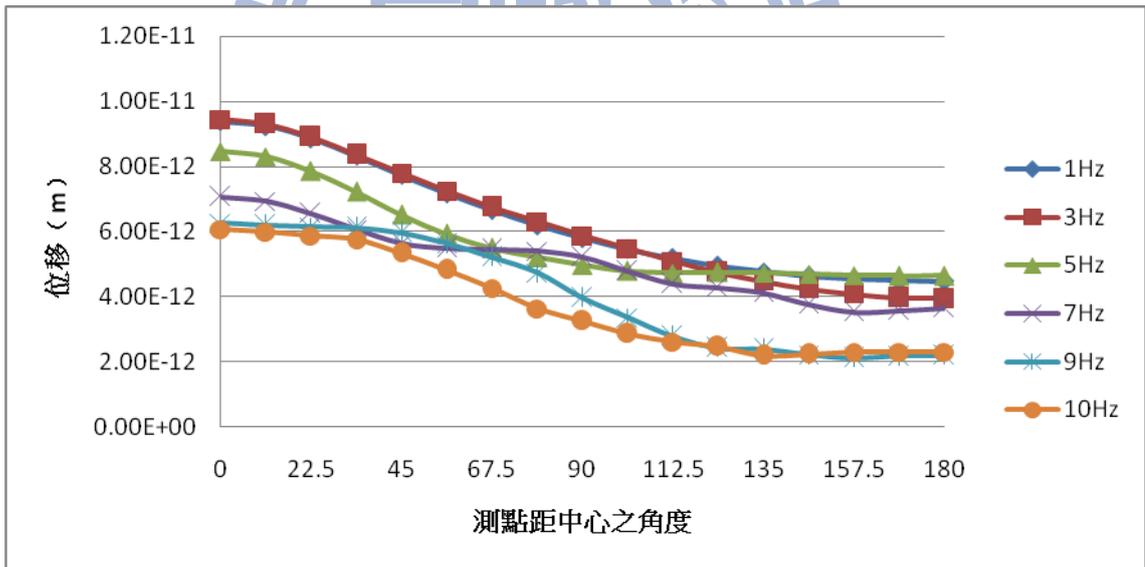


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.8 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_r)

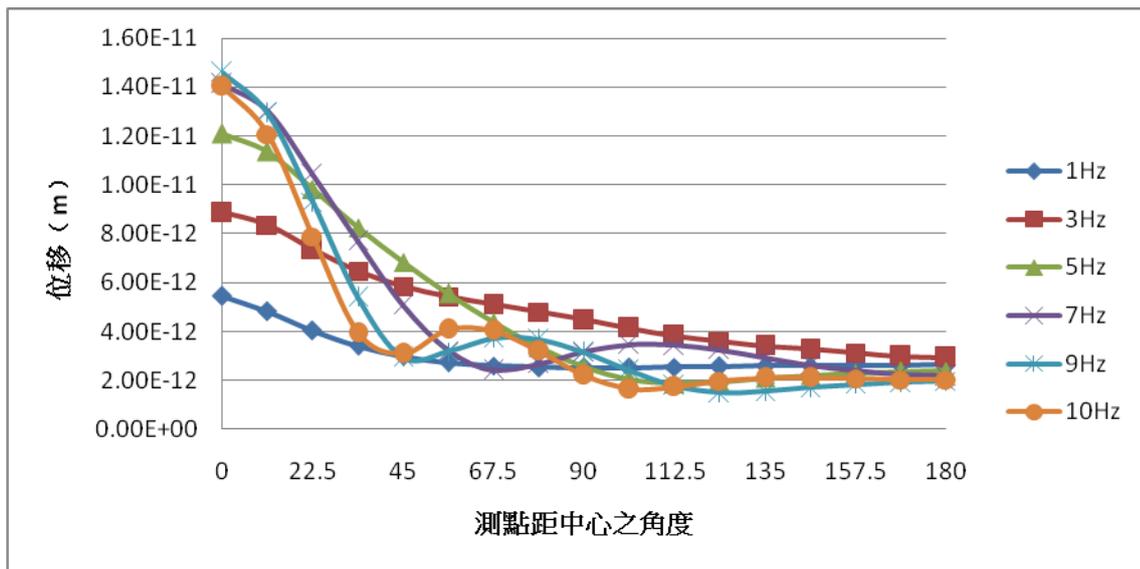


(a) 無放置屏蔽隧道區

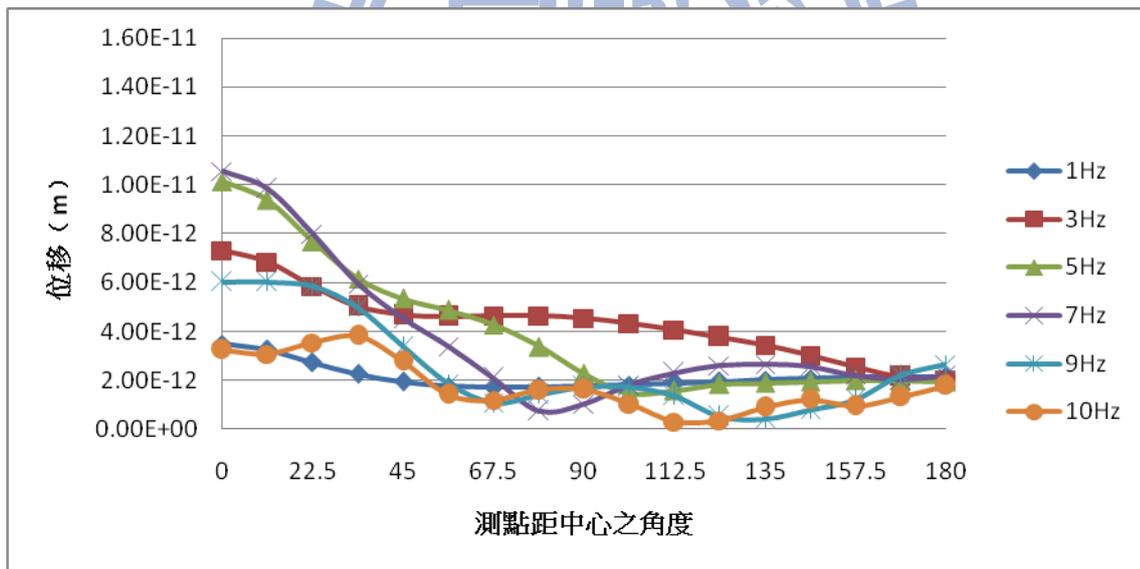


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.9 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_z)

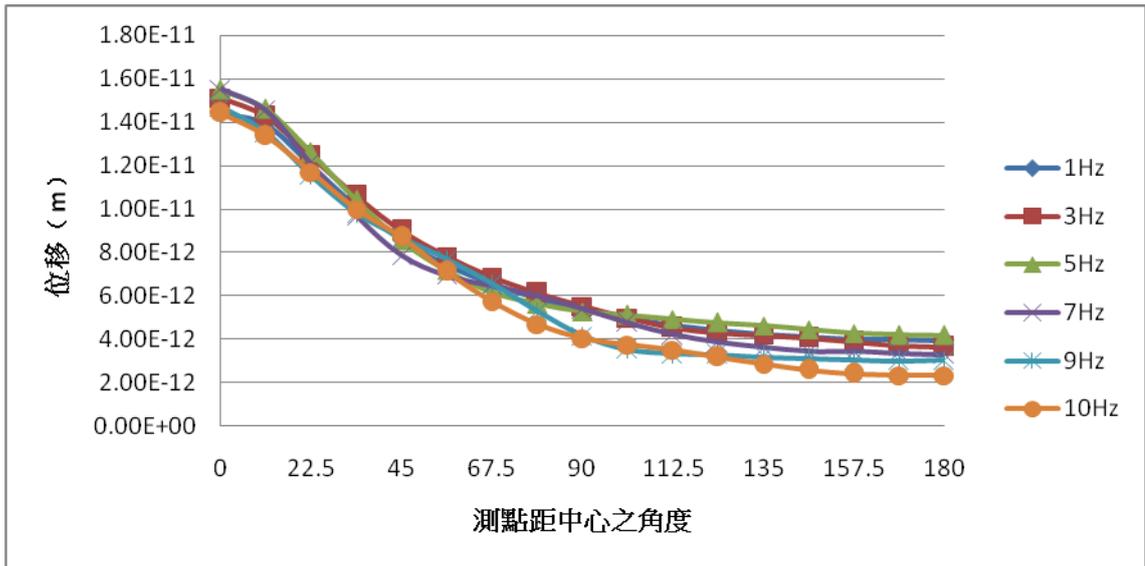


(a) 無放置屏蔽隧道區

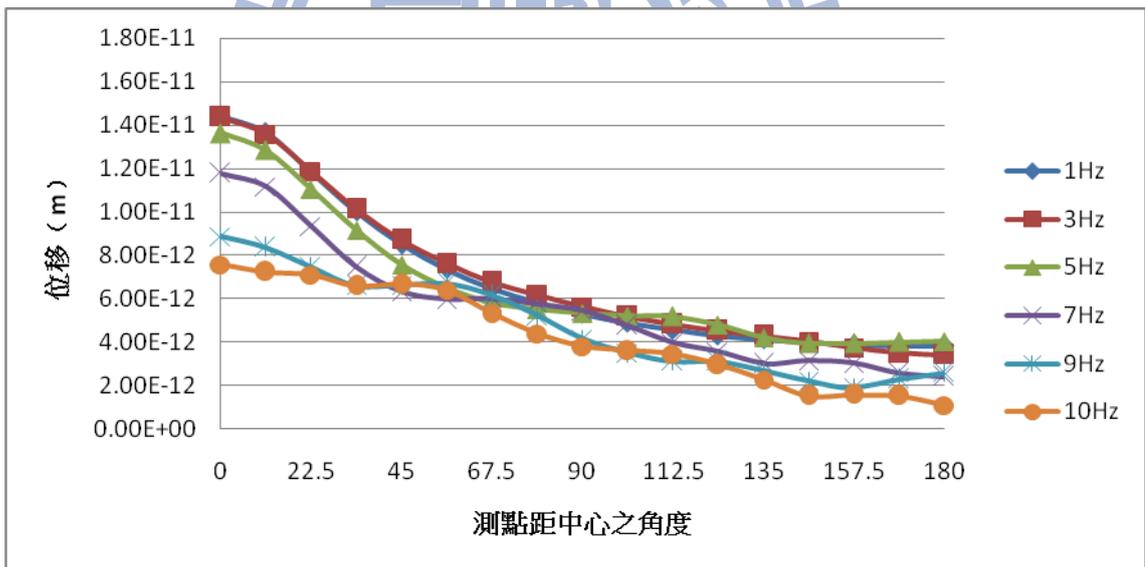


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.10 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_r)

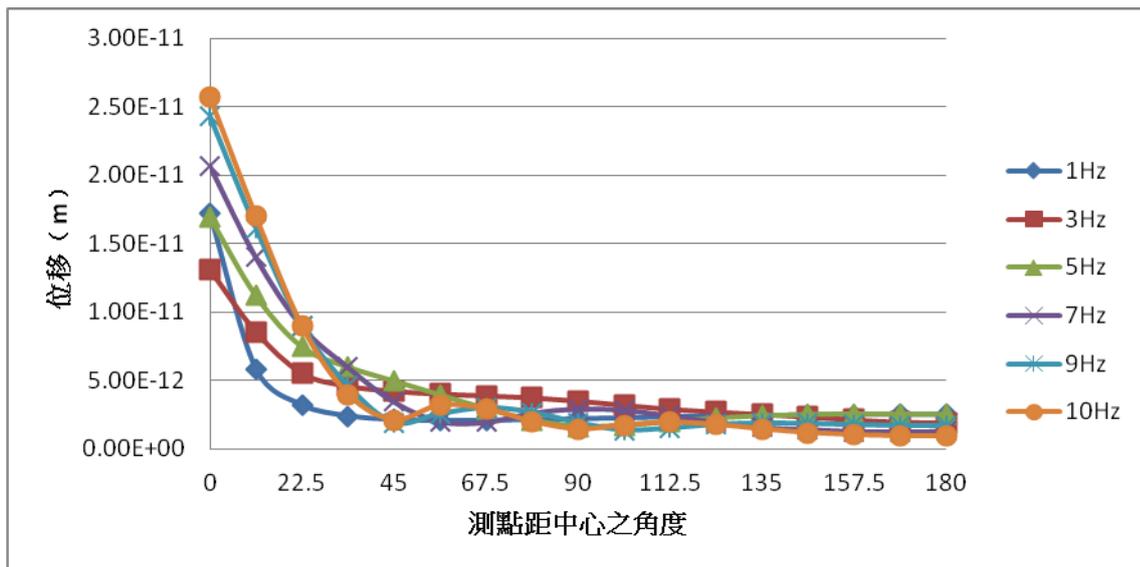


(a) 無放置屏蔽隧道區

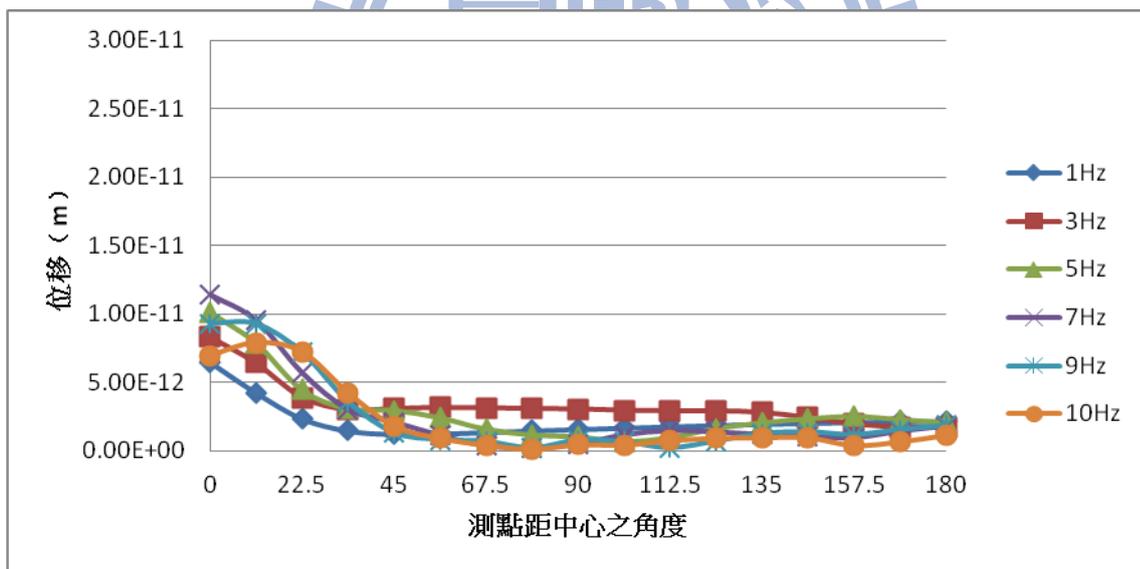


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.11 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_z)

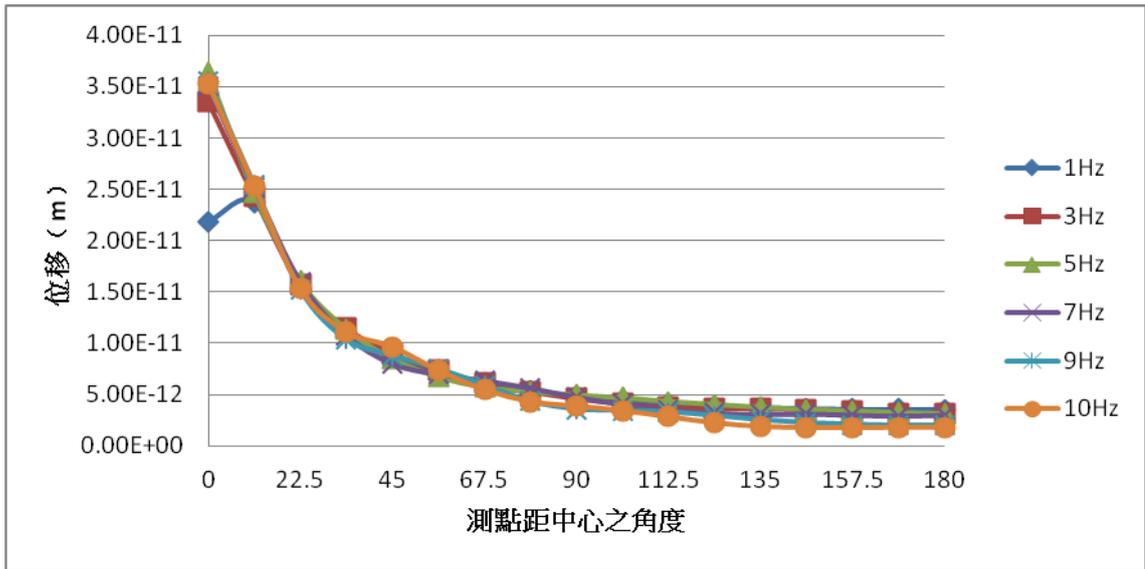


(a) 無放置屏蔽隧道區

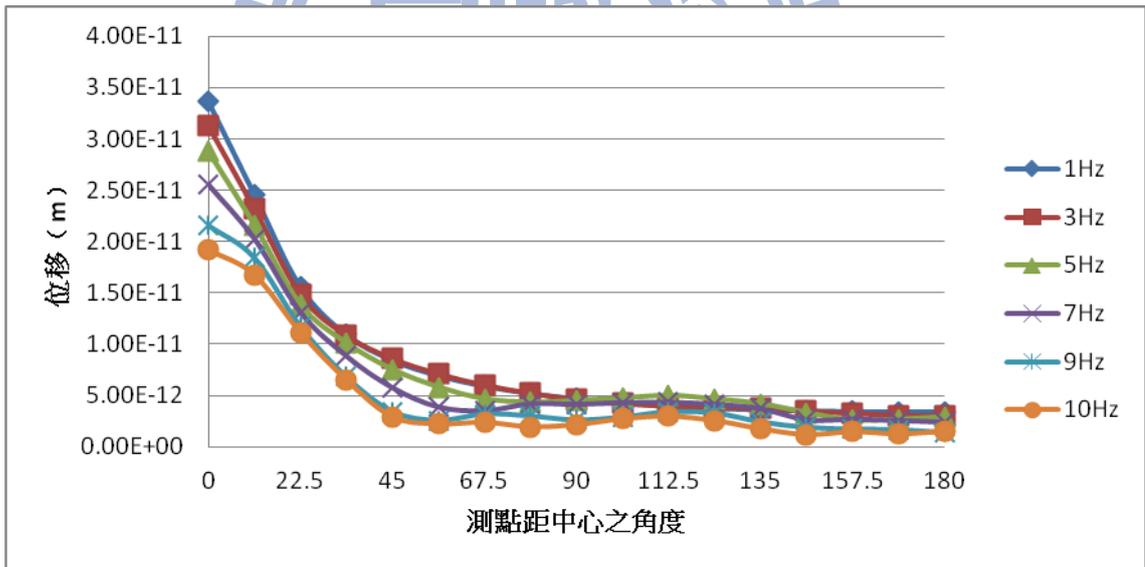


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.12 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_r)

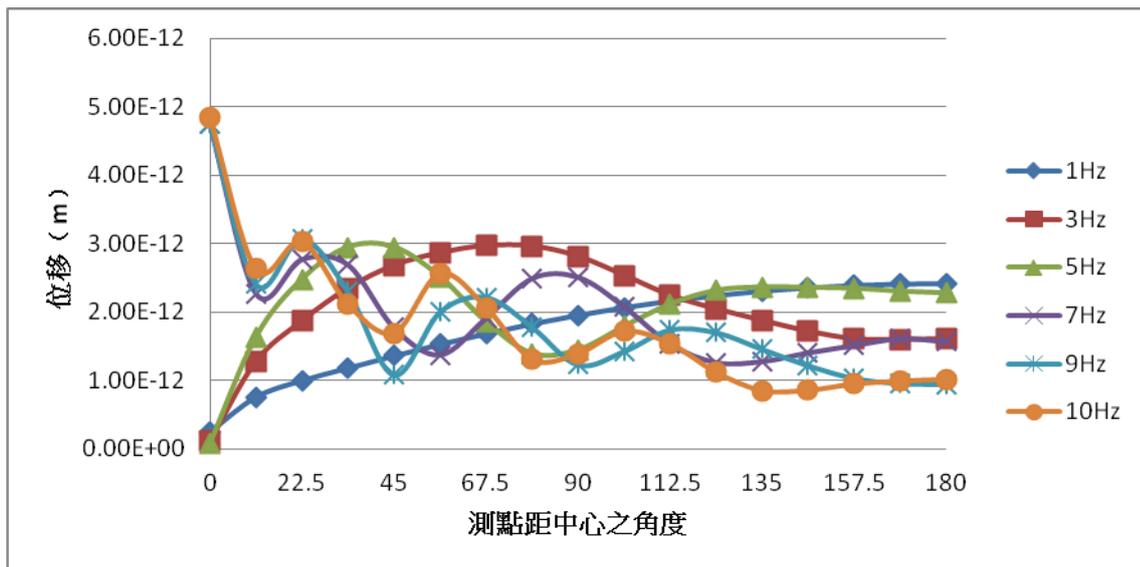


(a) 無放置屏蔽隧道區

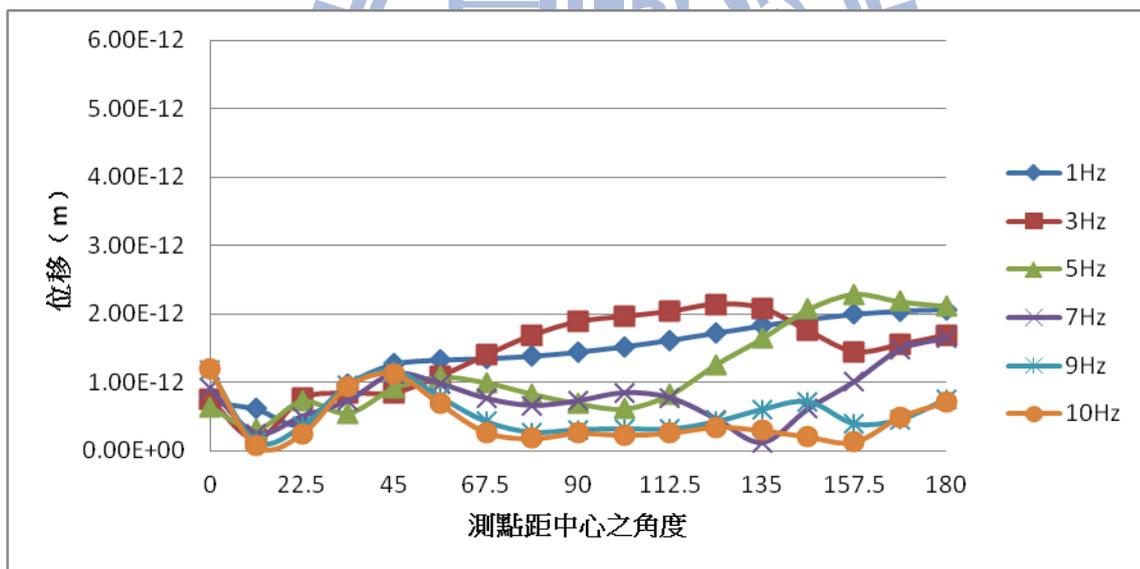


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.13 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_z)

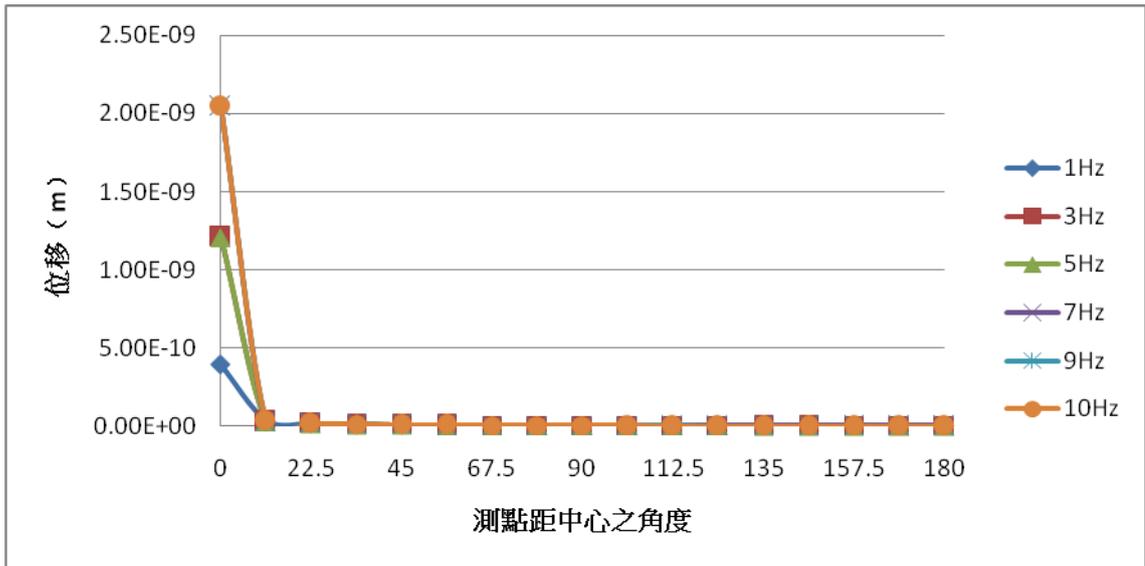


(a) 無放置屏蔽隧道區

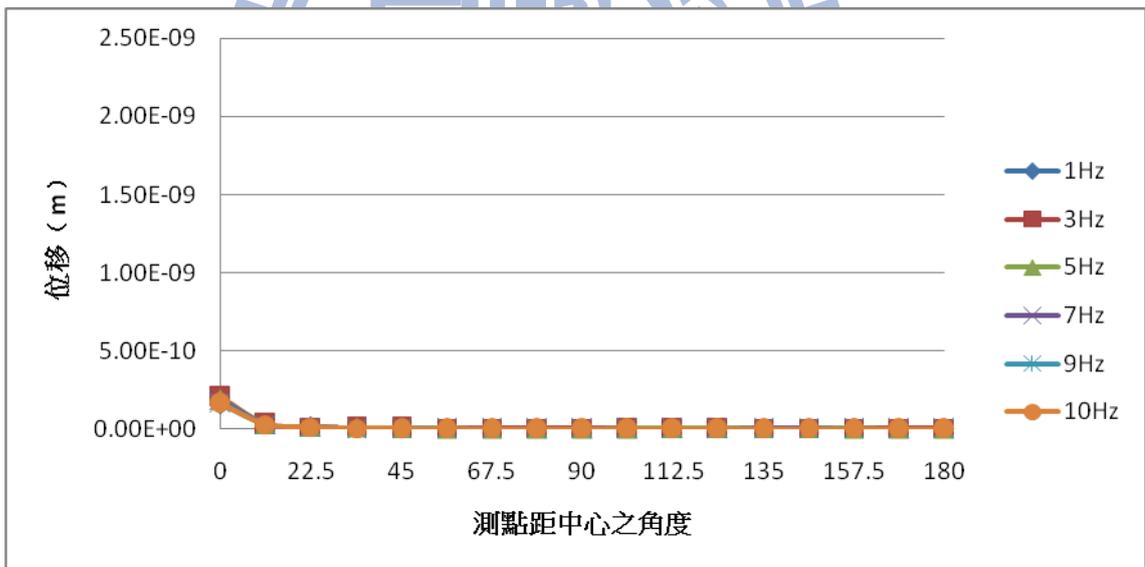


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.14 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_r)

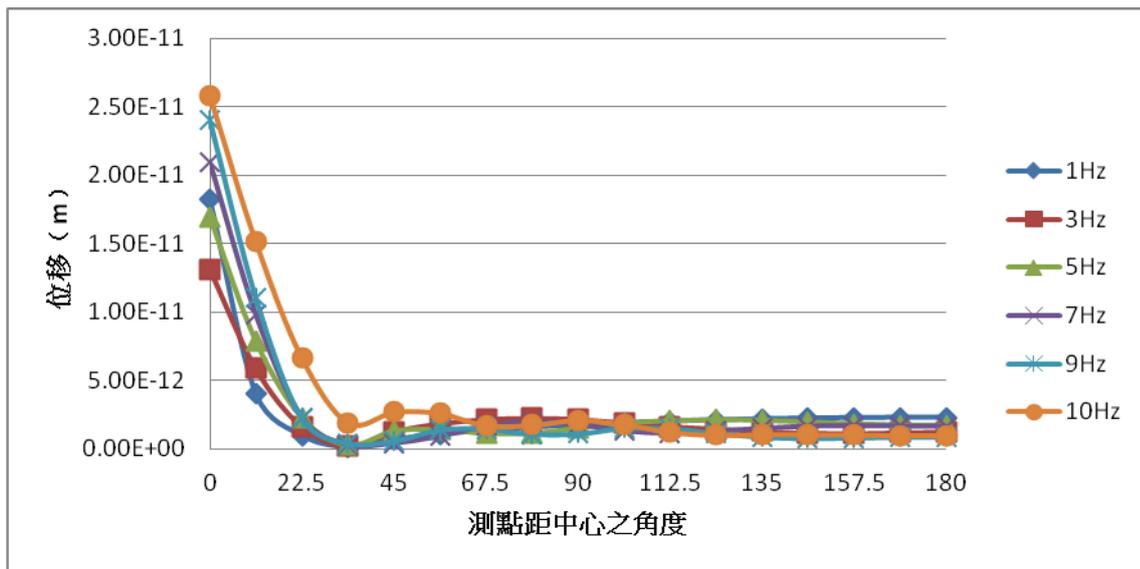


(a) 無放置屏蔽隧道區

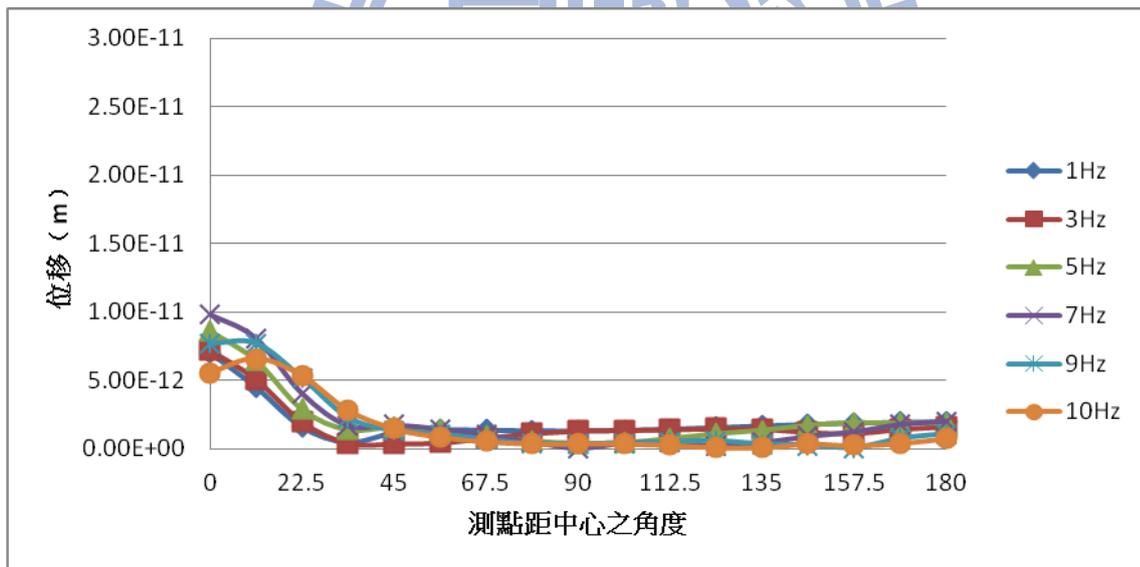


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.15 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_z)

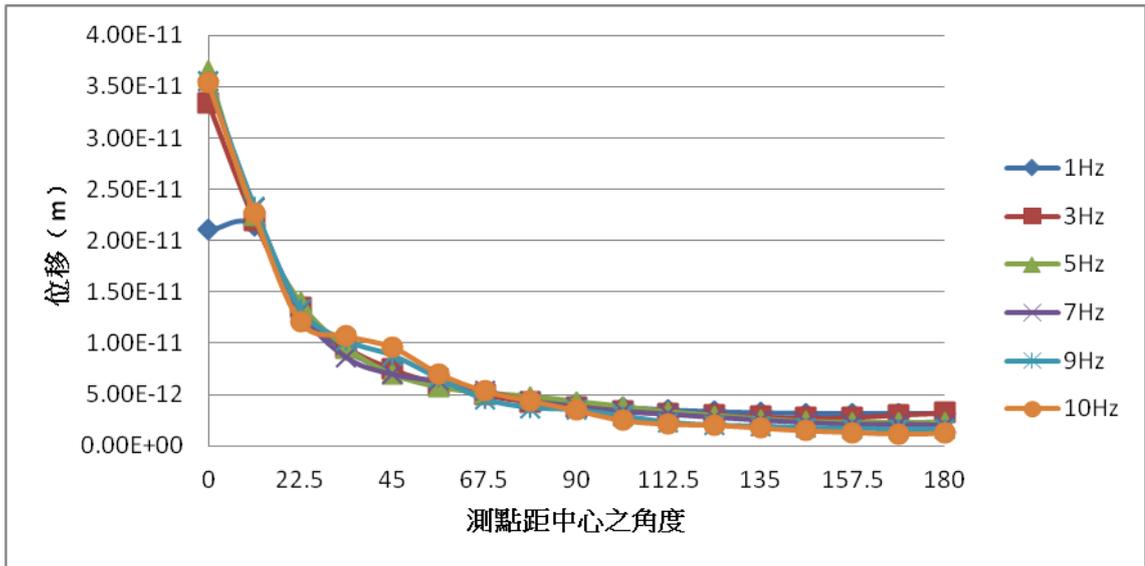


(a) 無放置屏蔽隧道區

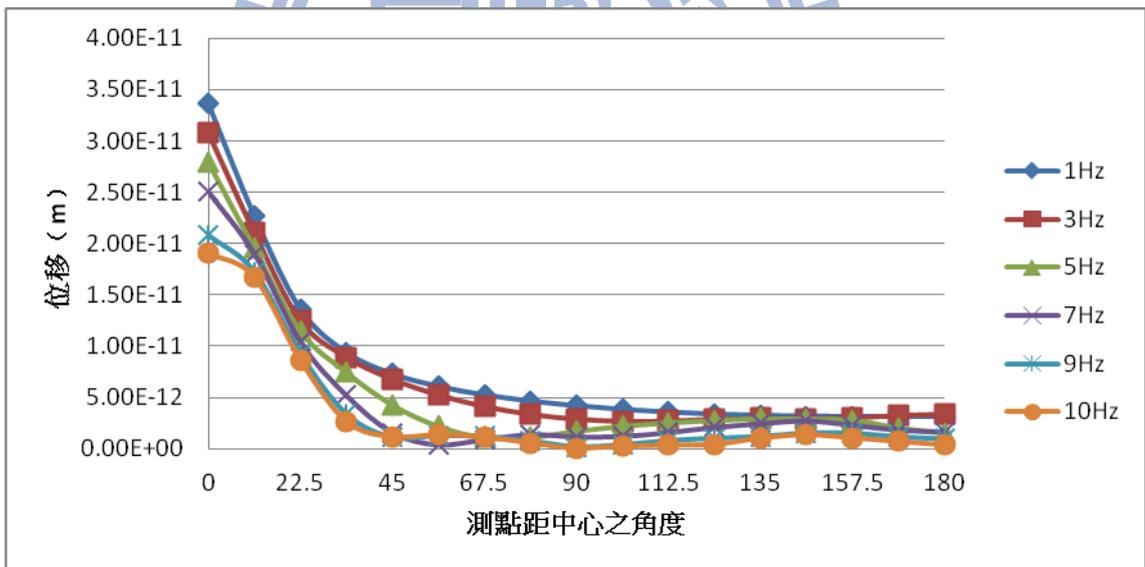


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.16 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_r)

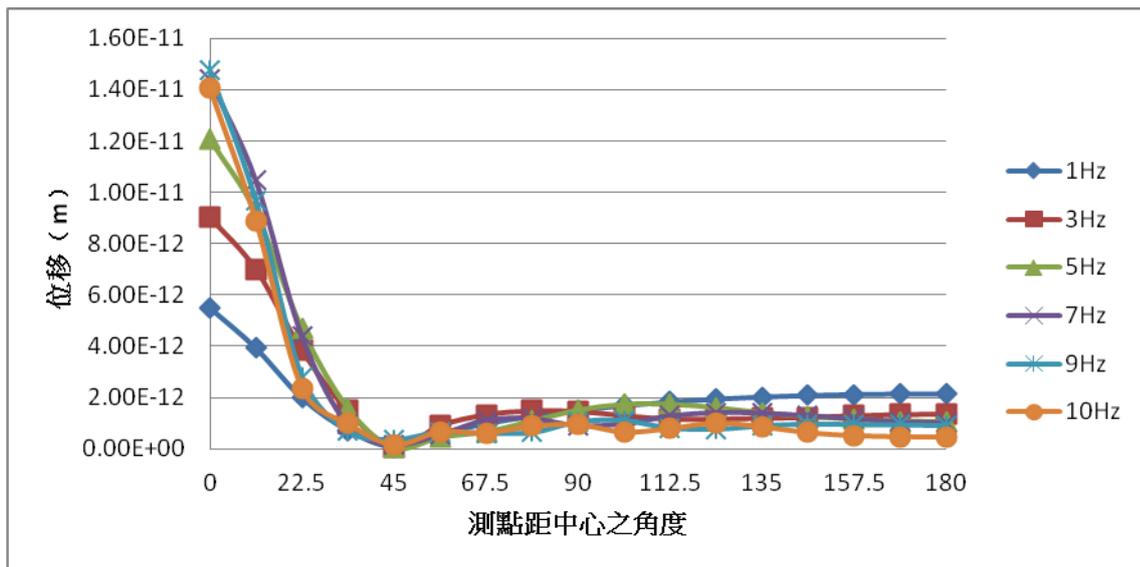


(a) 無放置屏蔽隧道區

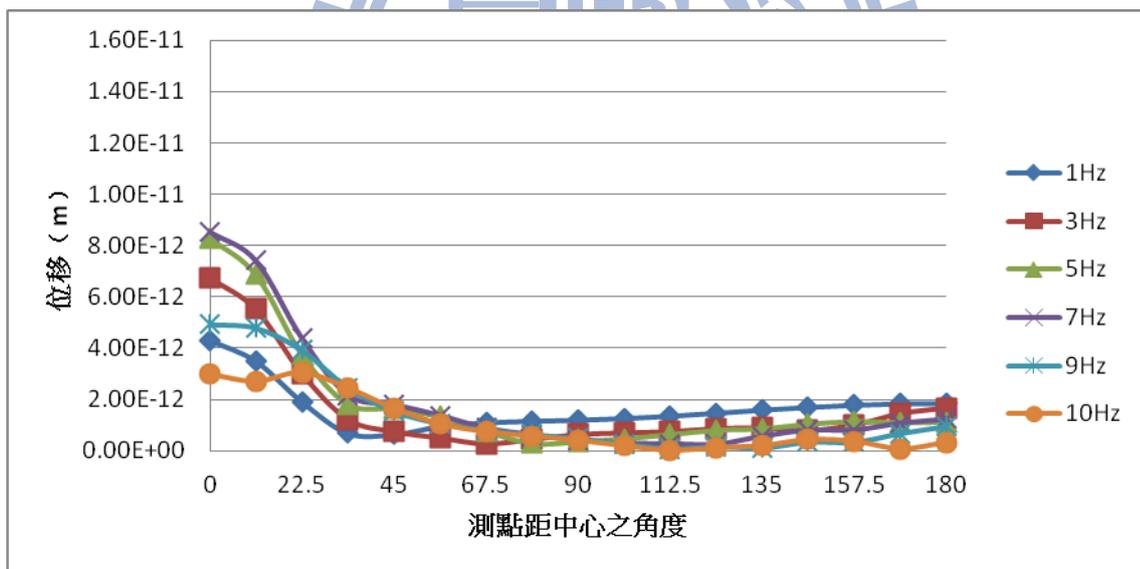


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.17 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_z)

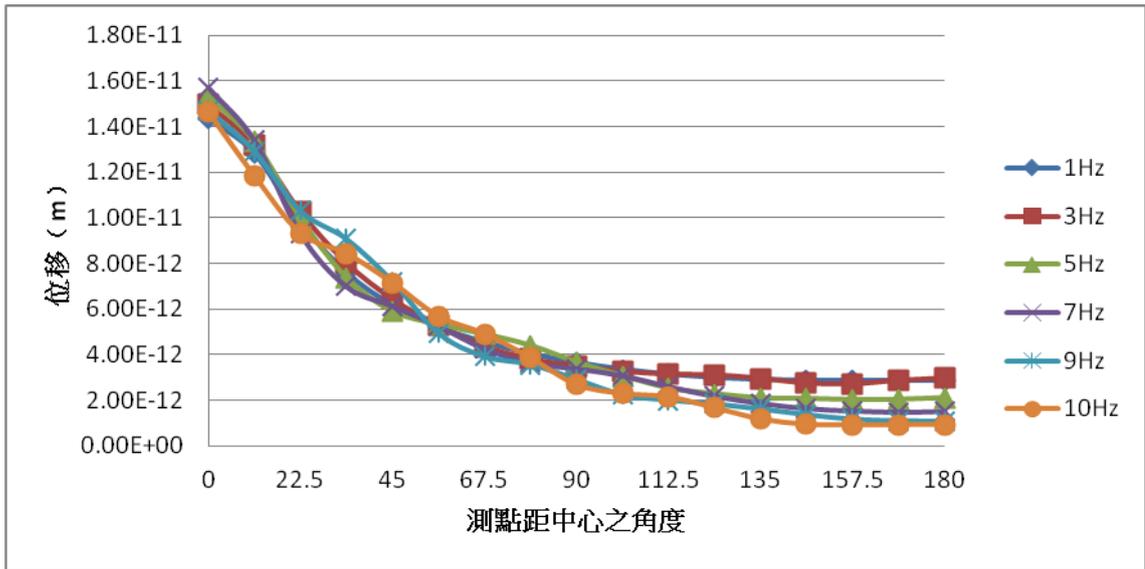


(a) 無放置屏蔽隧道區

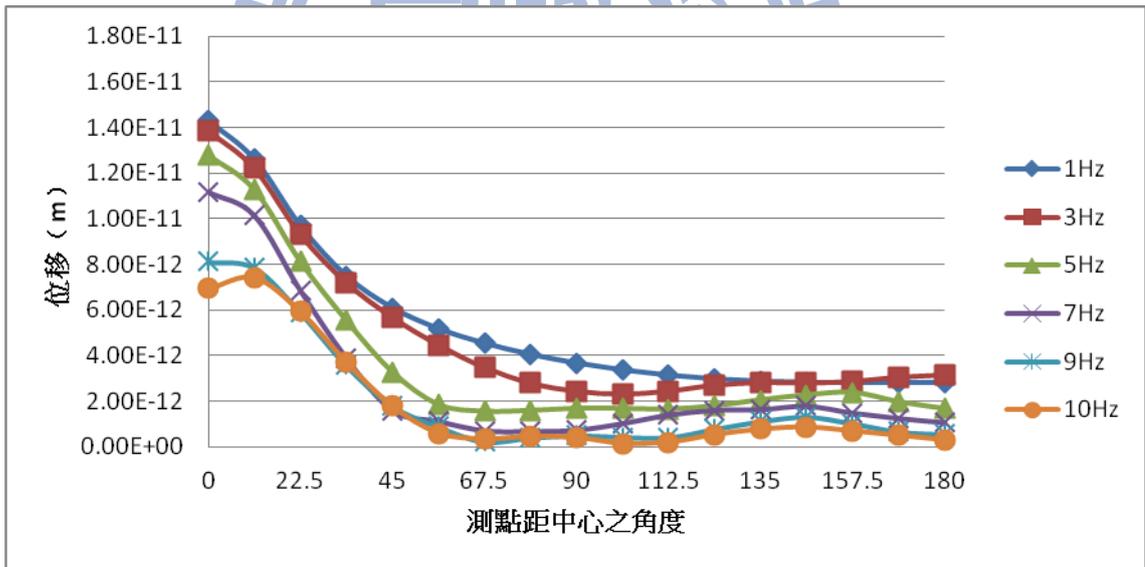


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.18 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_r)

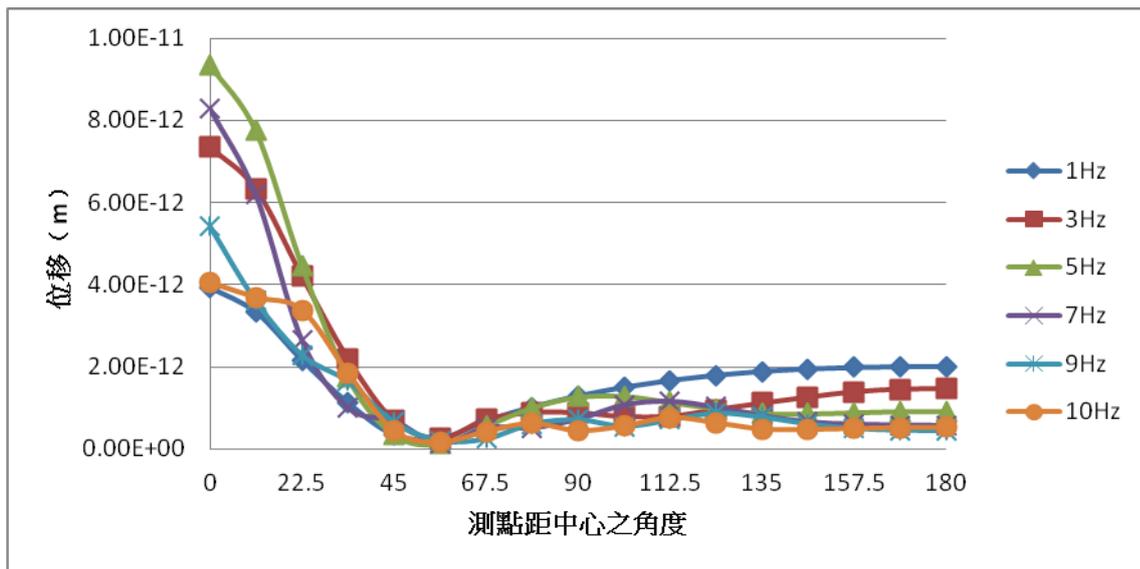


(a) 無放置屏蔽隧道區

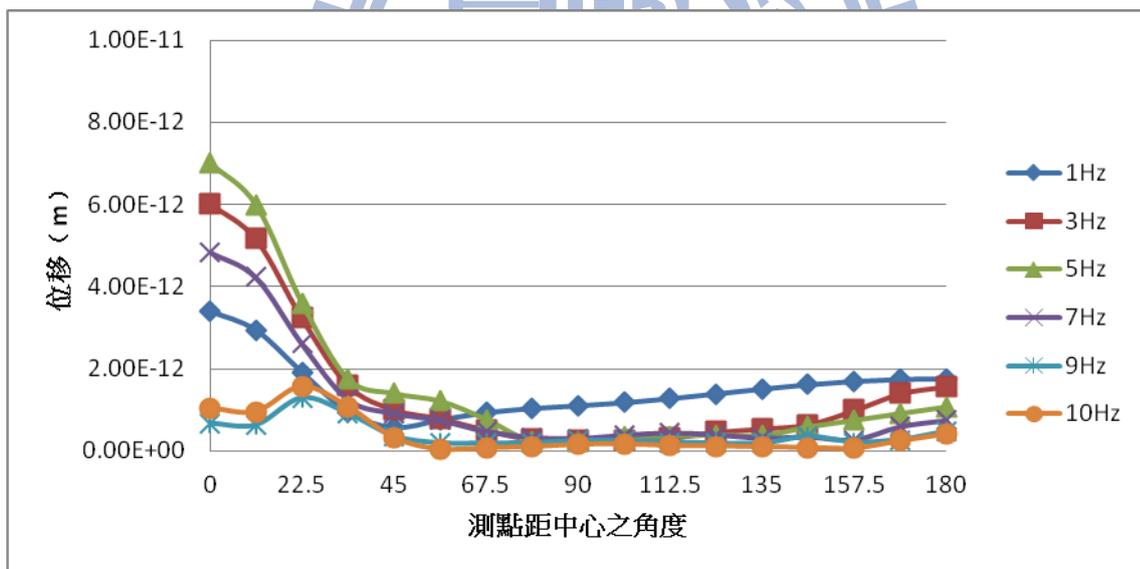


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.19 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_z)

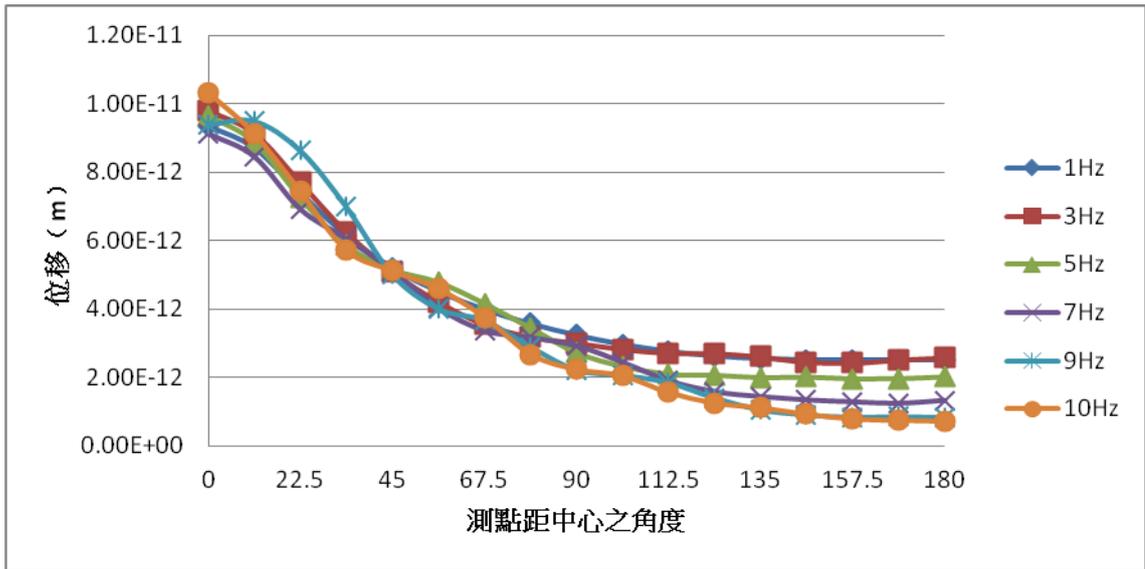


(a) 無放置屏蔽隧道區

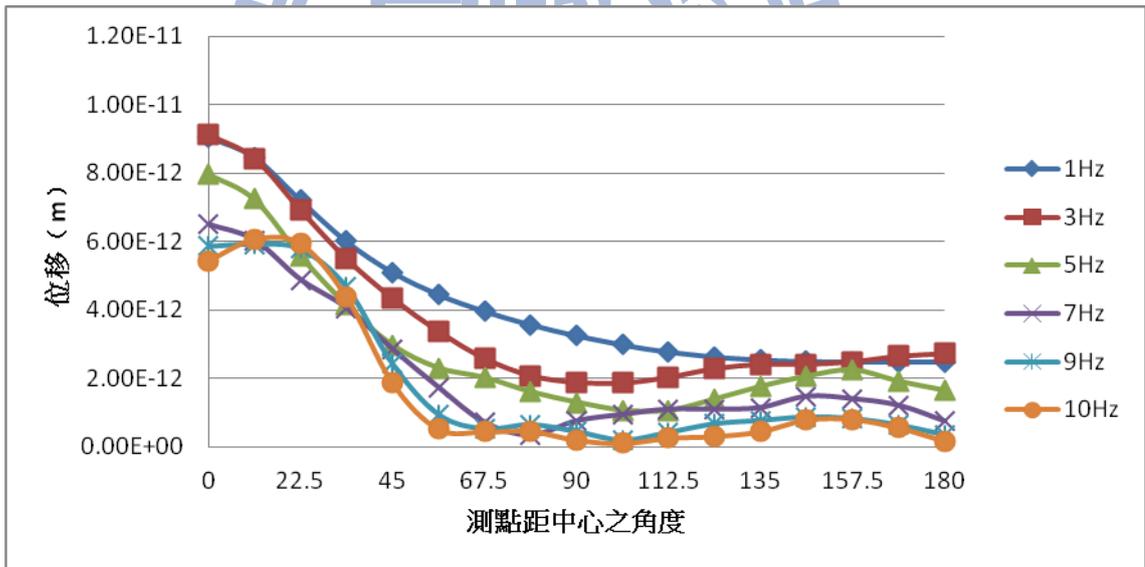


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.20 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_r)

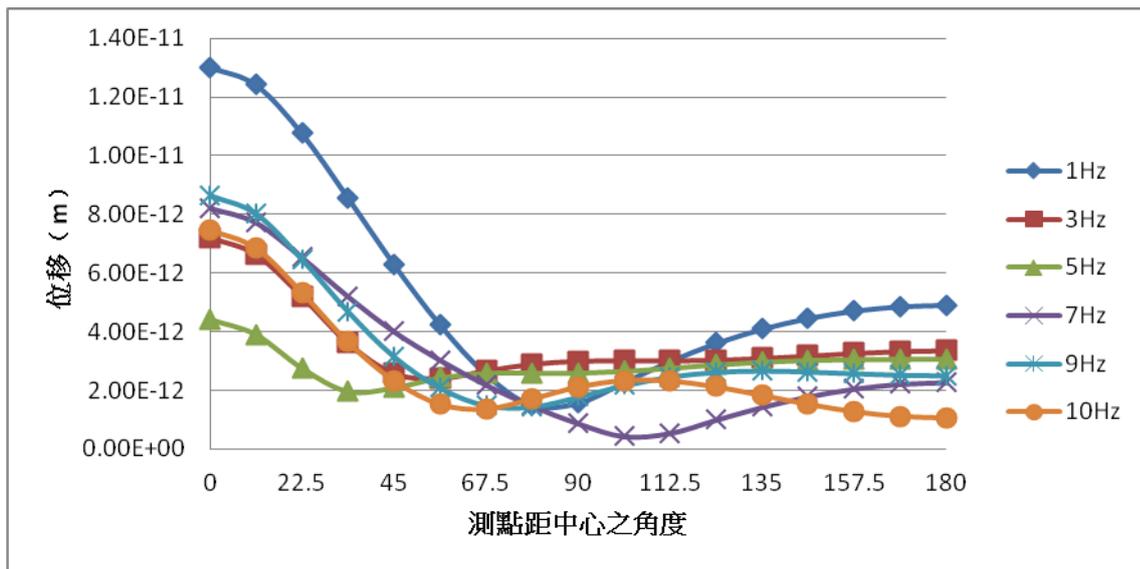


(a) 無放置屏蔽隧道區

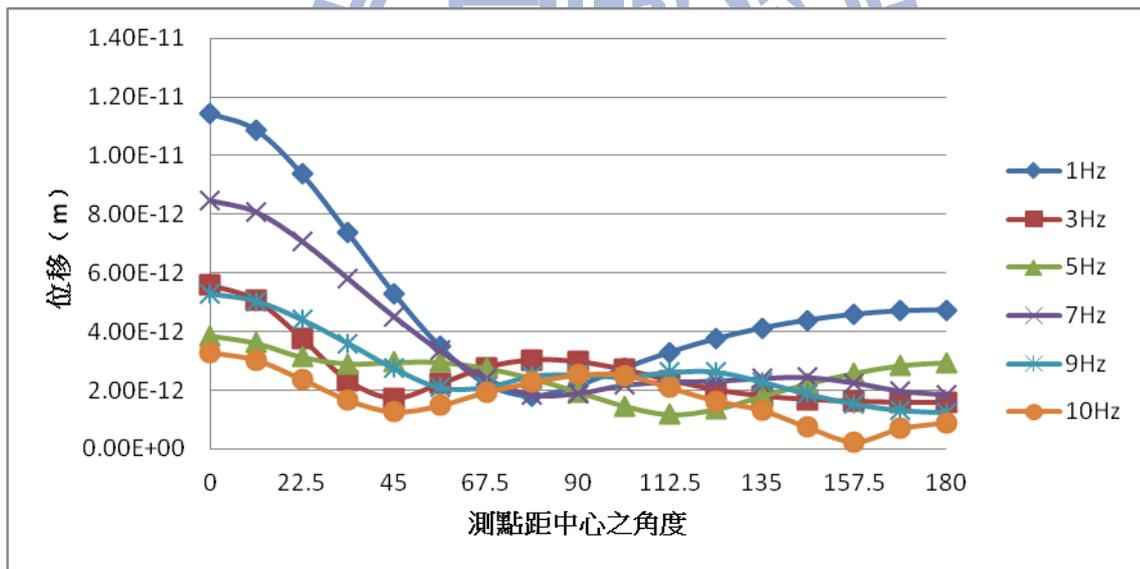


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.21 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_z)

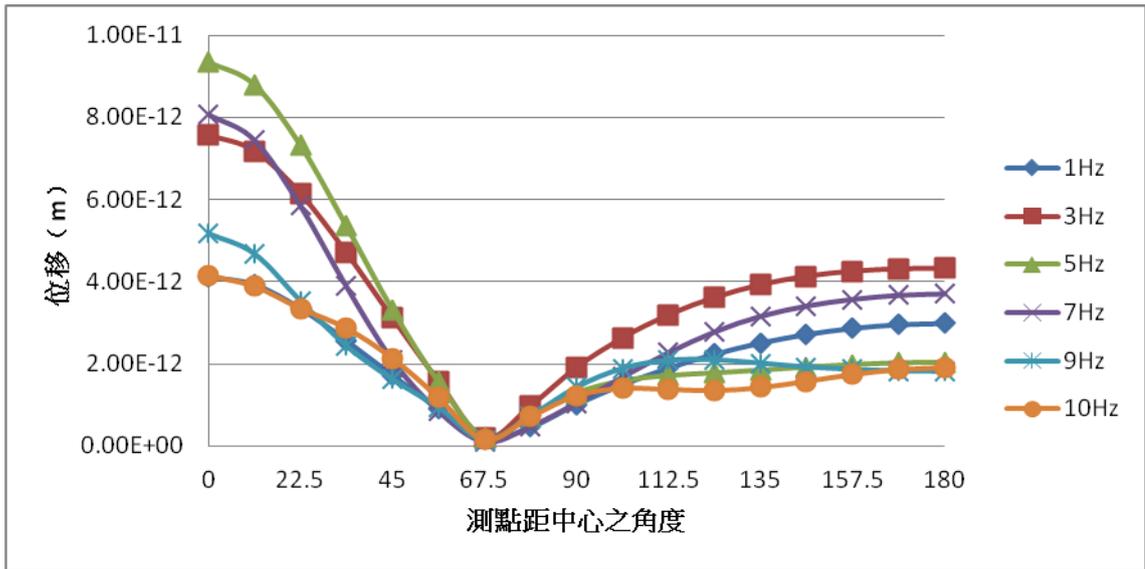


(a) 無放置屏蔽隧道區

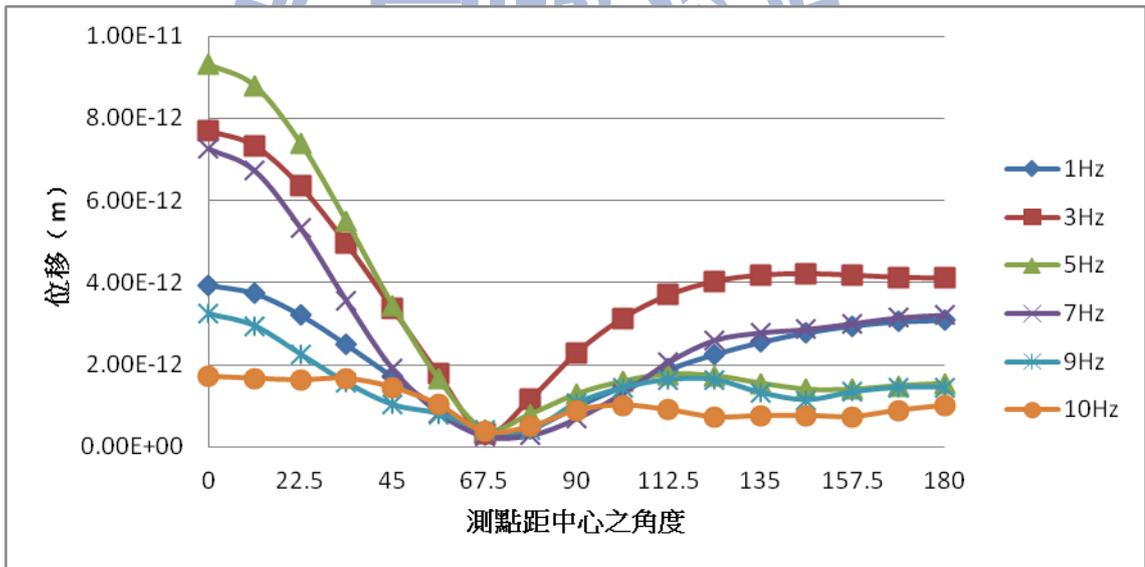


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.22 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 33m 之 U_r)

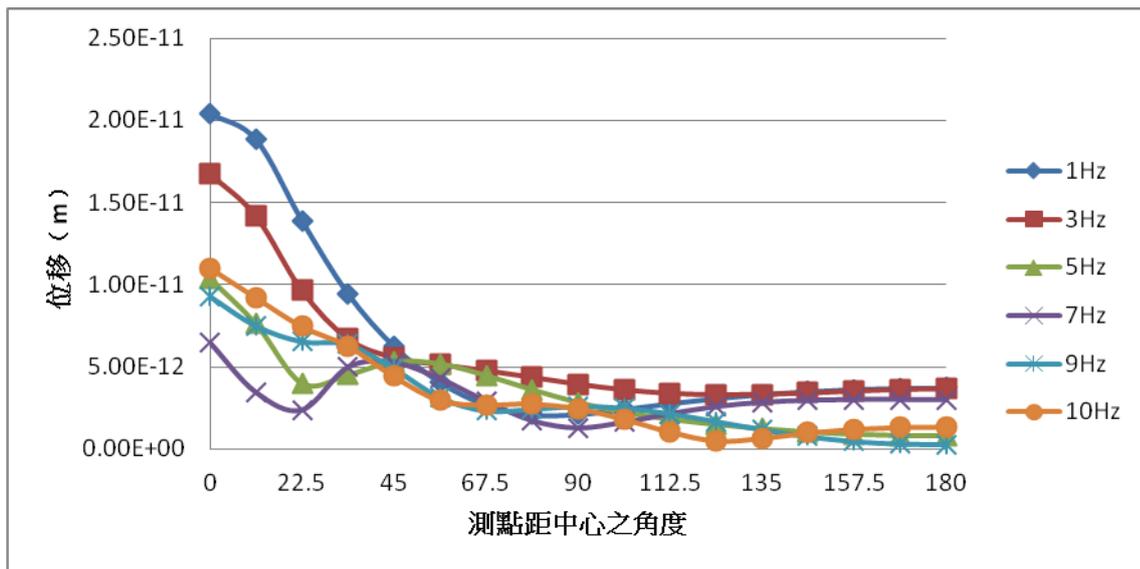


(a) 無放置屏蔽隧道區

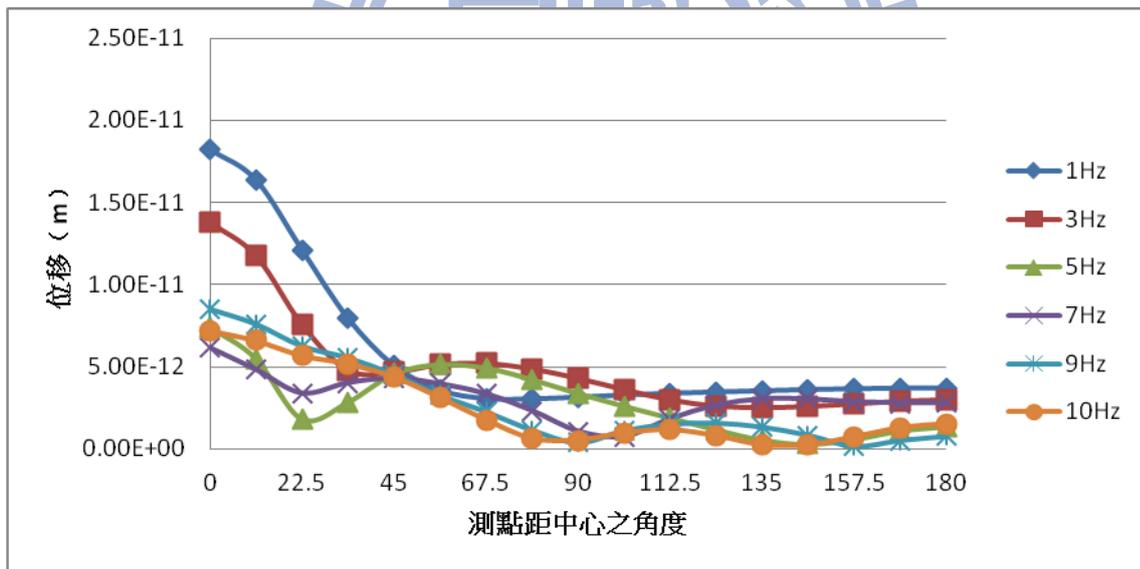


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.23 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 33m 之 U_z)

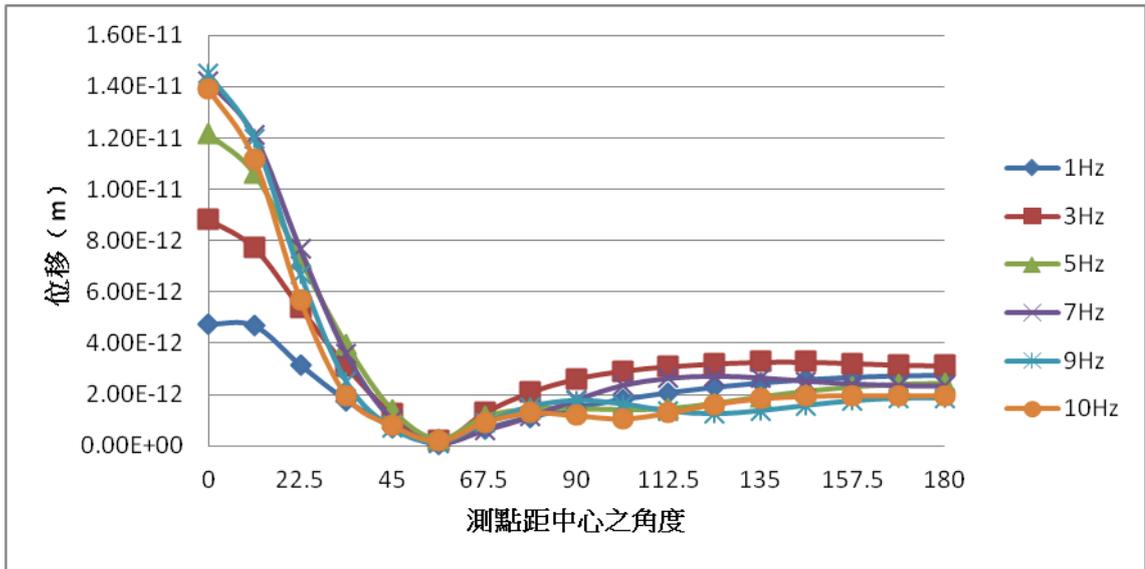


(a) 無放置屏蔽隧道區

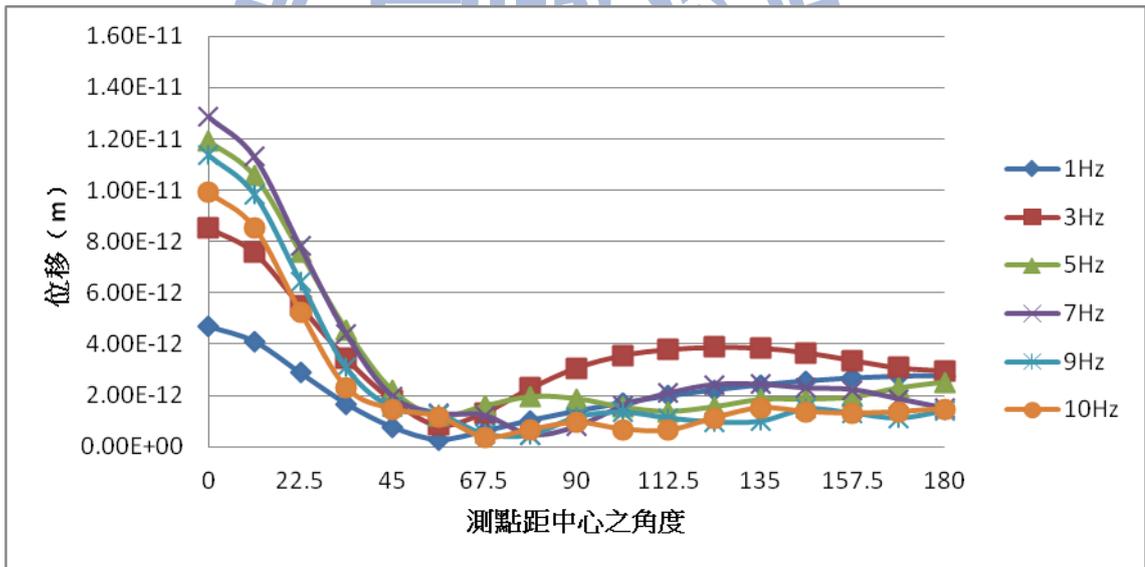


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.24 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 55m 之 U_r)

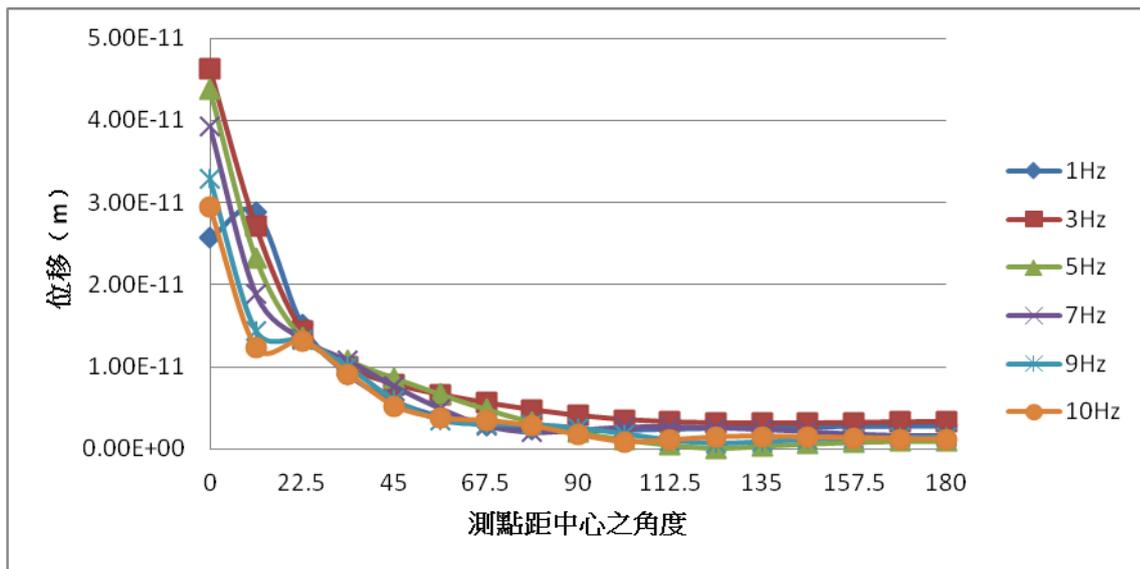


(a) 無放置屏蔽隧道區

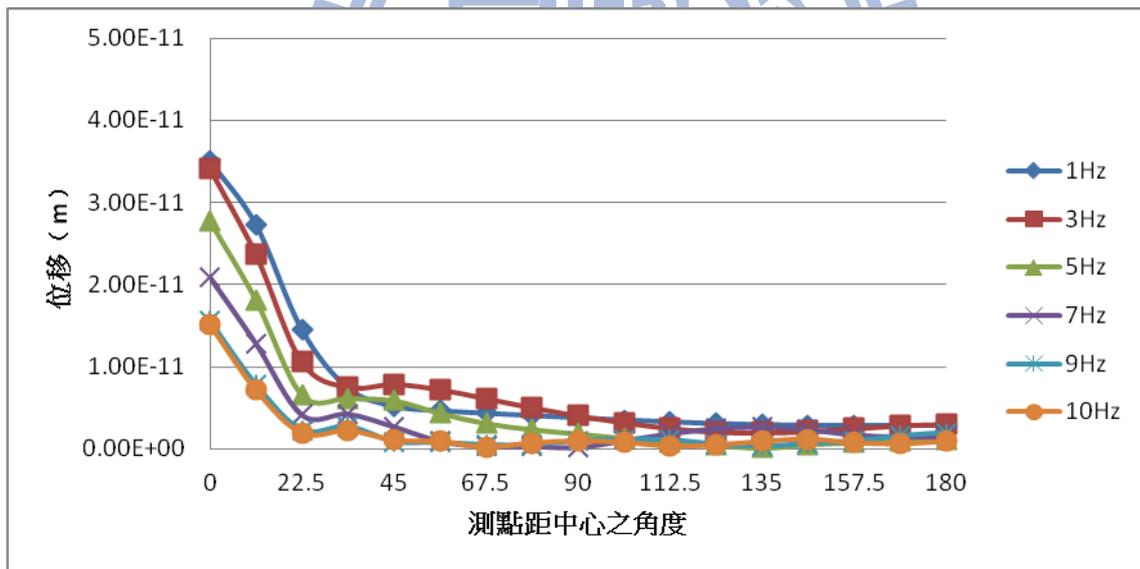


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.25 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 55m 之 U_z)

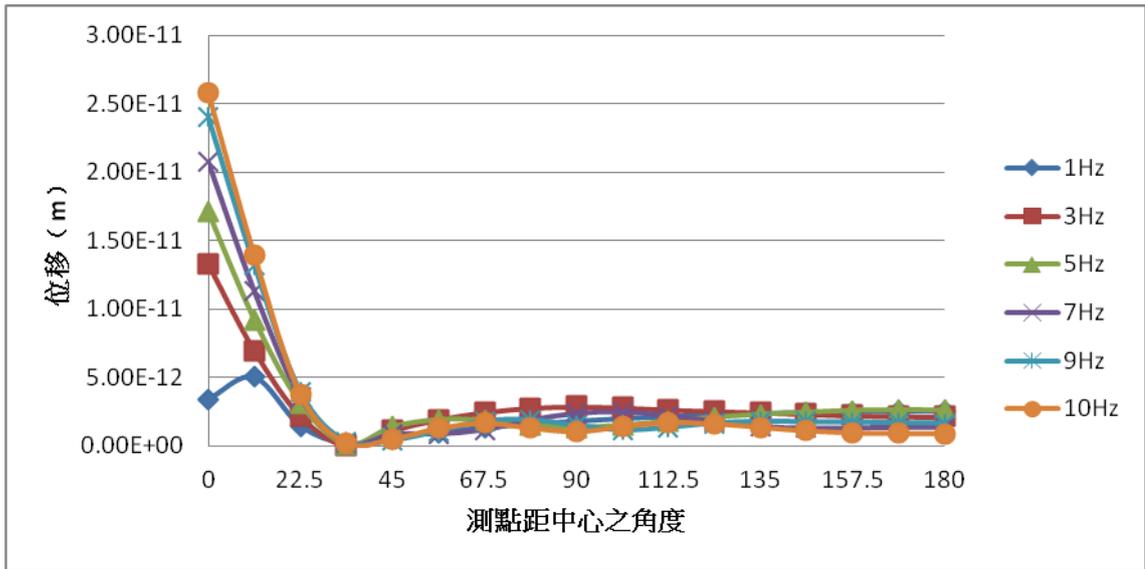


(a) 無放置屏蔽隧道區

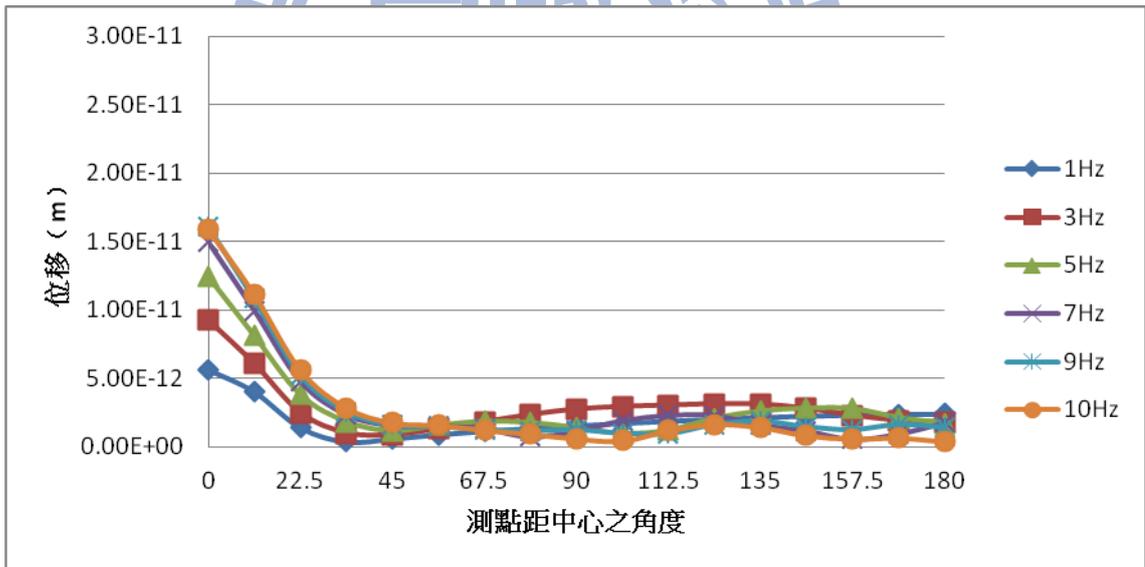


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.26 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 77m 之 U_r)

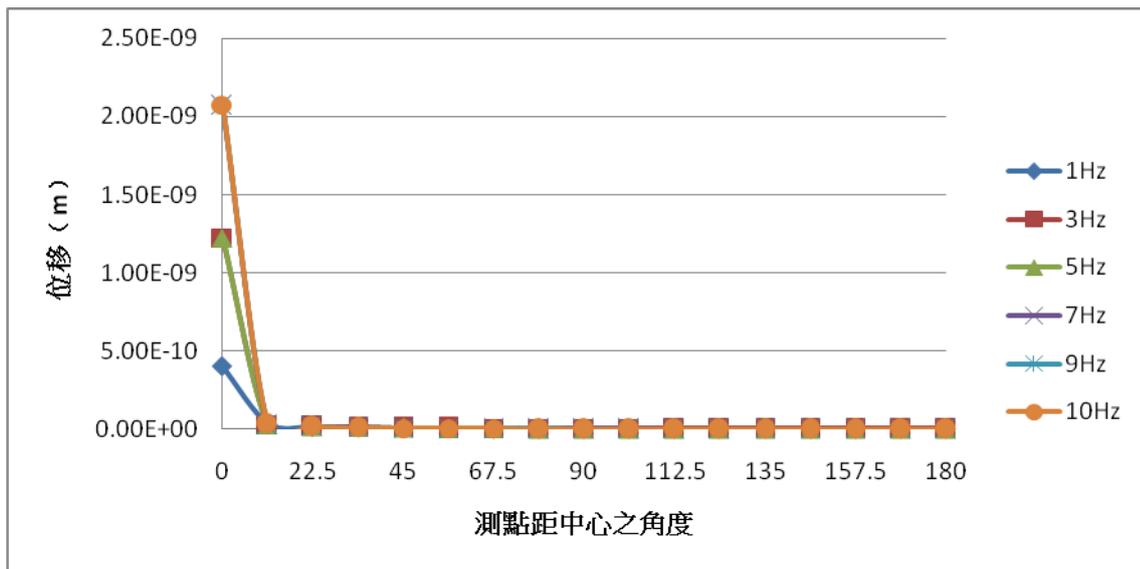


(a) 無放置屏蔽隧道區

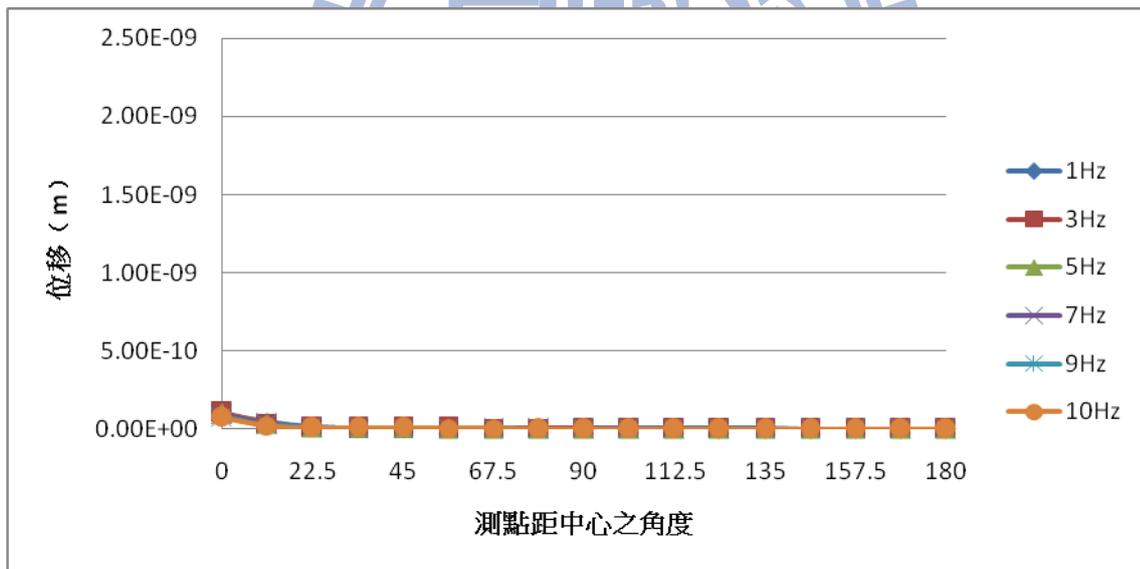


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.27 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 77m 之 U_z)

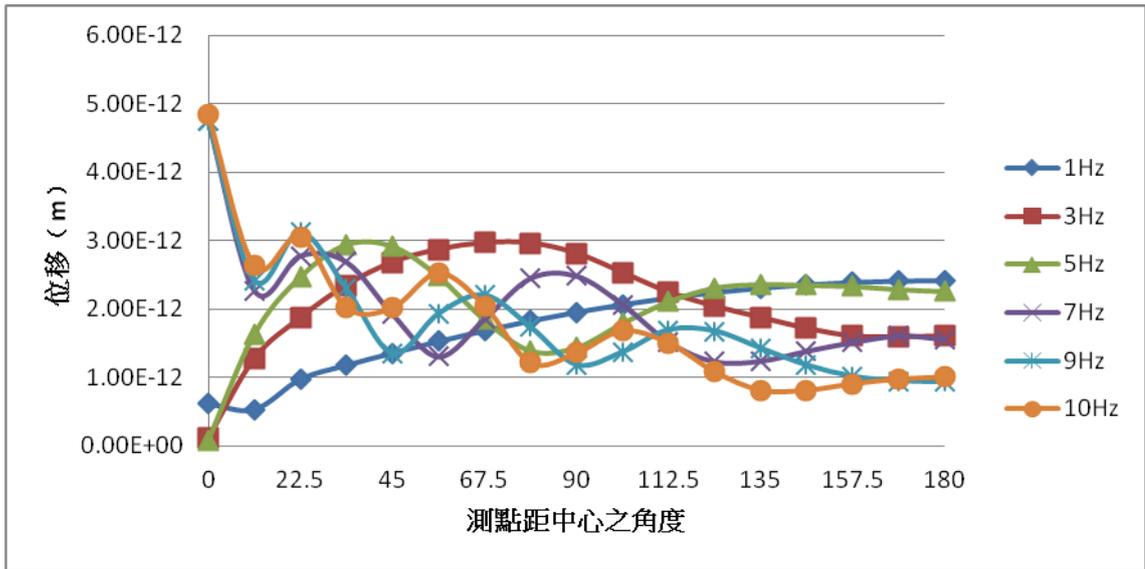


(a) 無放置屏蔽隧道區

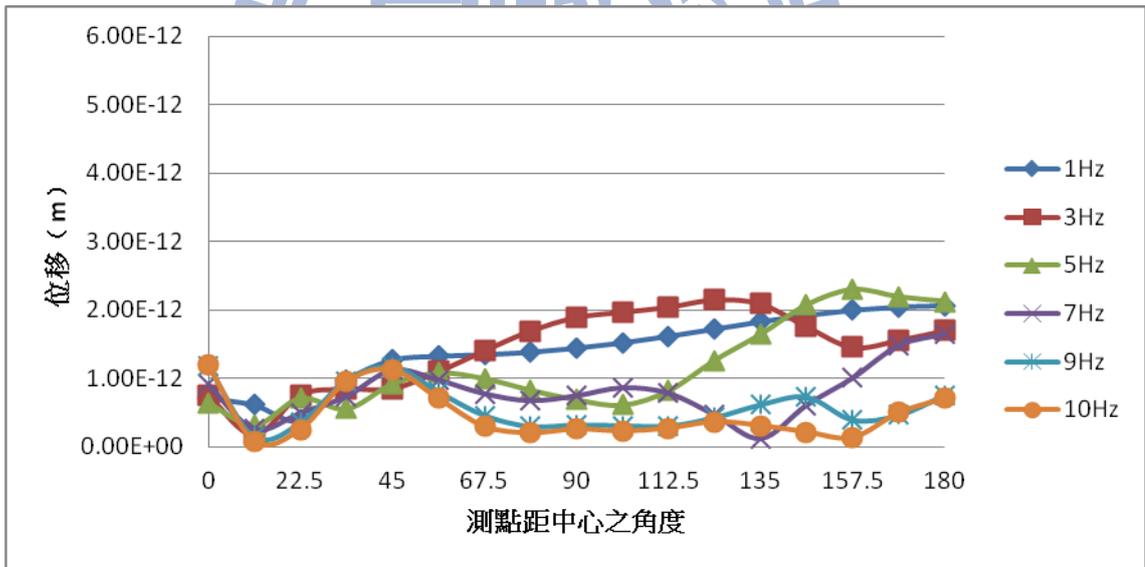


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.28 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_r)

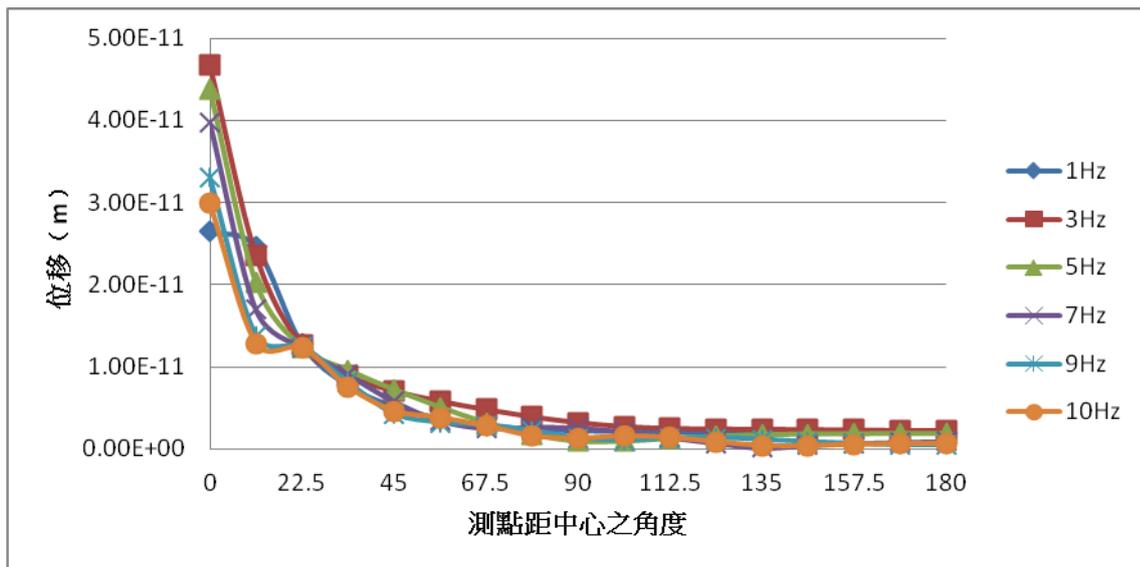


(a) 無放置屏蔽隧道區

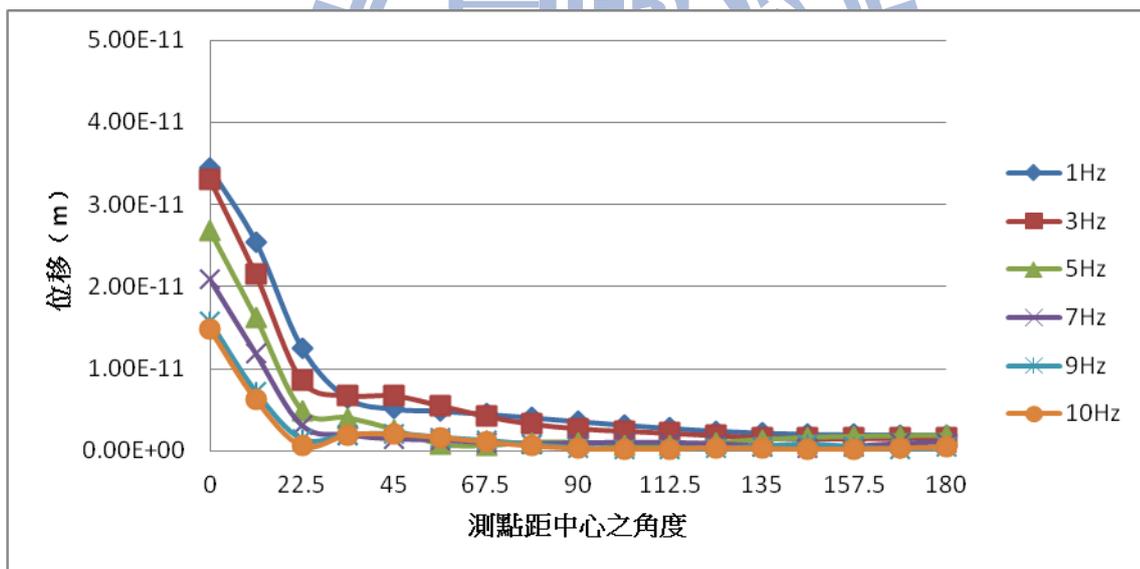


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.29 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_z)

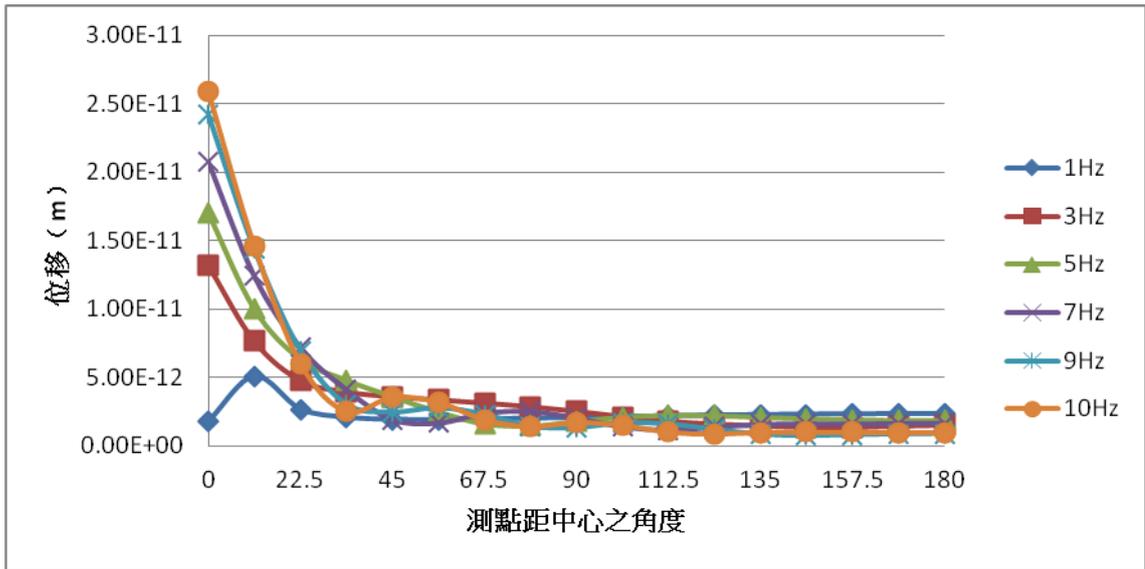


(a) 無放置屏蔽隧道區

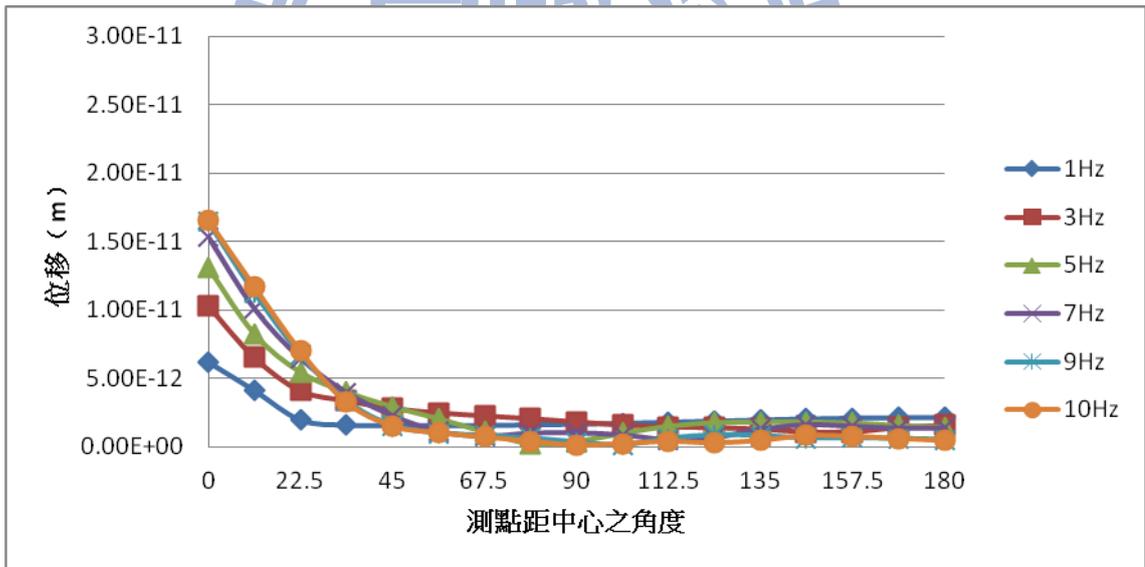


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.30 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 110m 之 U_r)

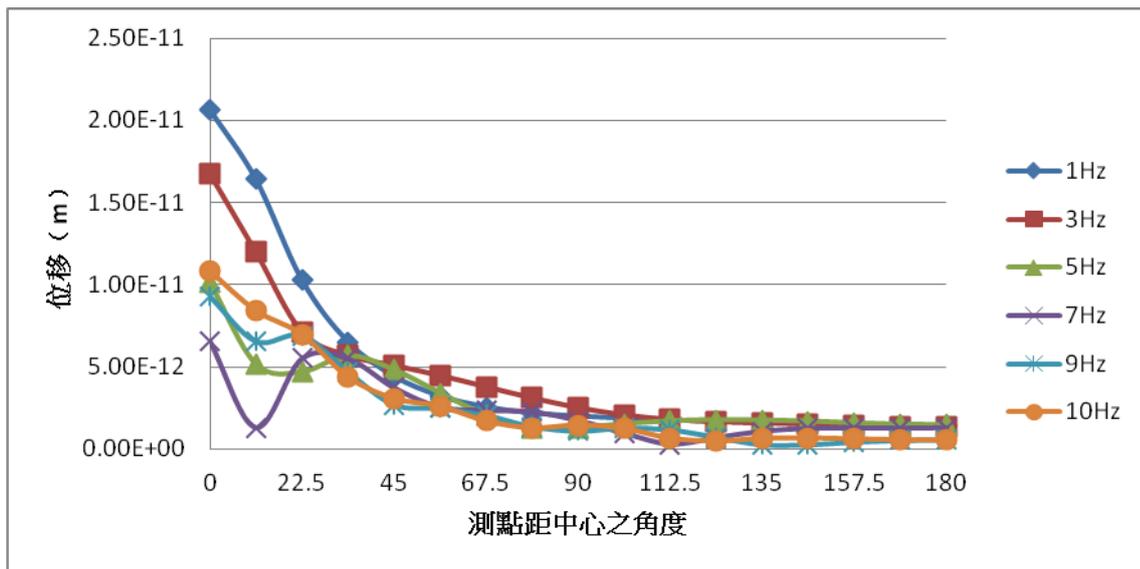


(a) 無放置屏蔽隧道區

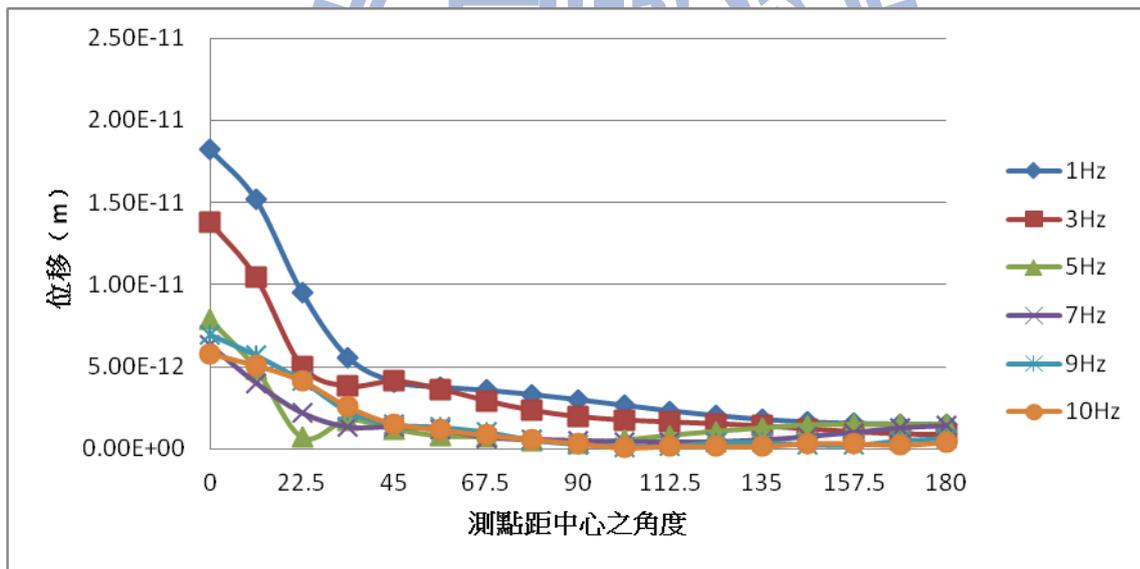


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.31 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 110m 之 U_z)

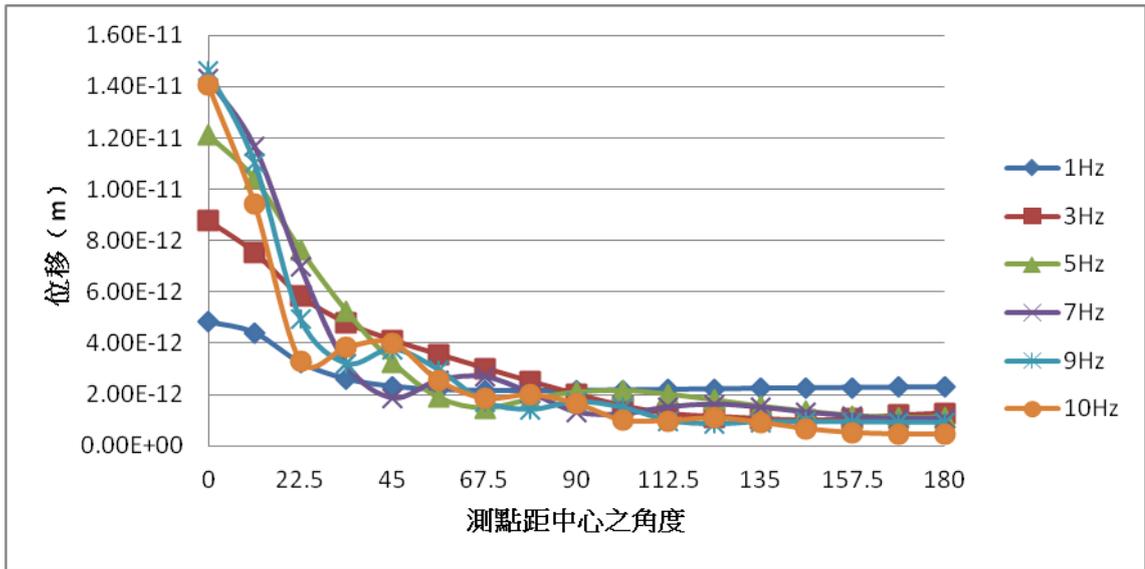


(a) 無放置屏蔽隧道區

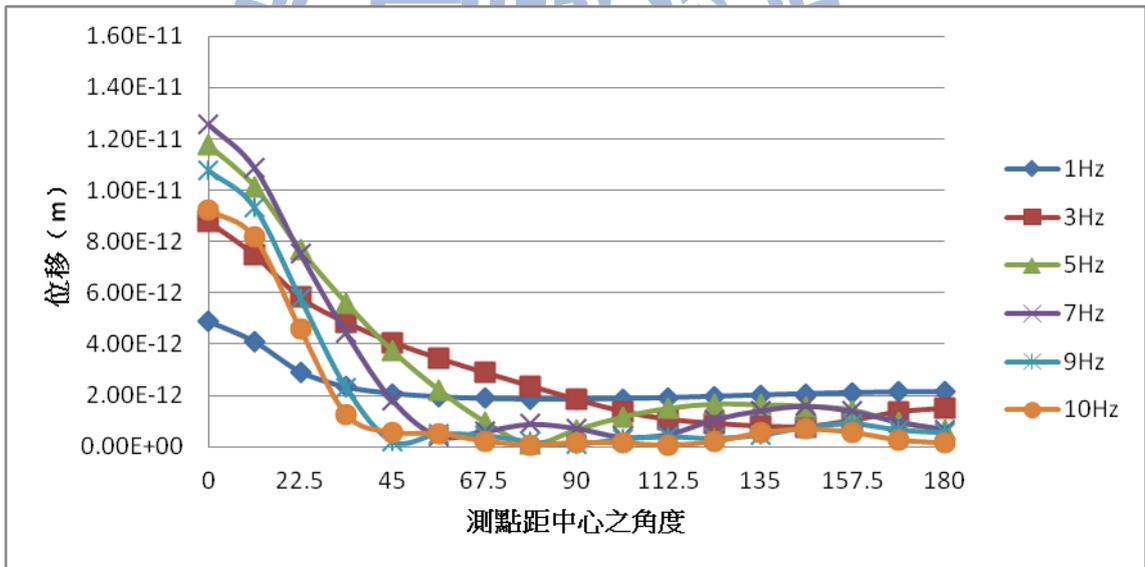


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.32 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 132m 之 U_r)

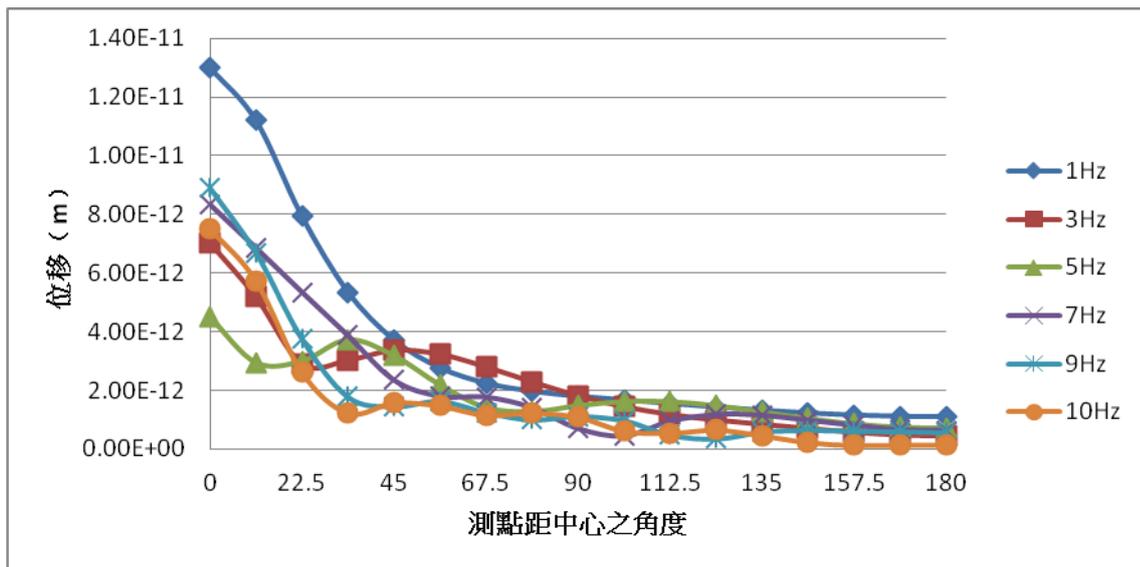


(a) 無放置屏蔽隧道區

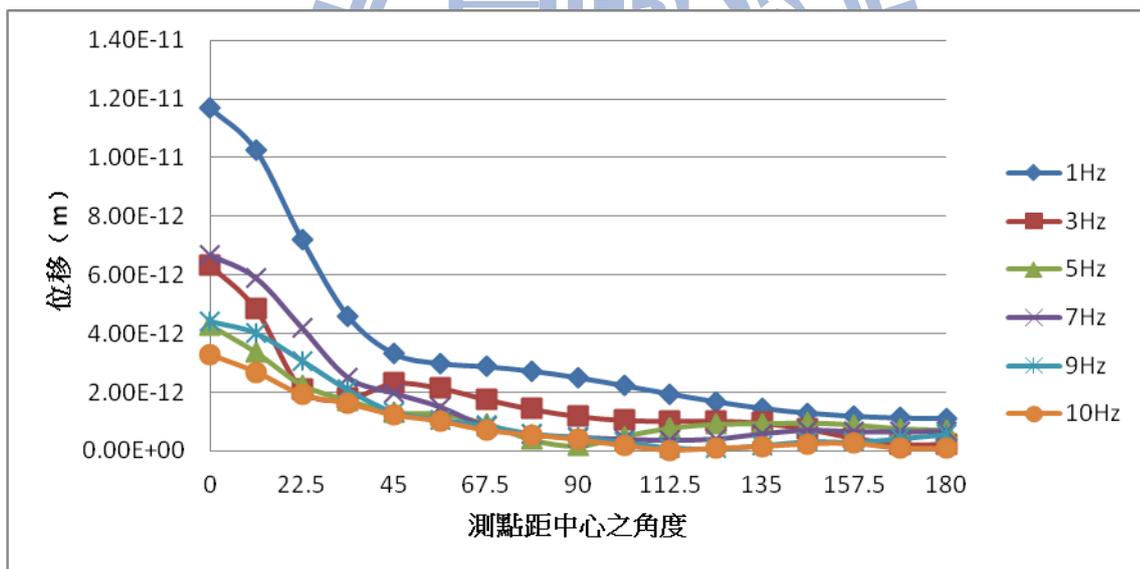


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.33 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 132m 之 U_z)

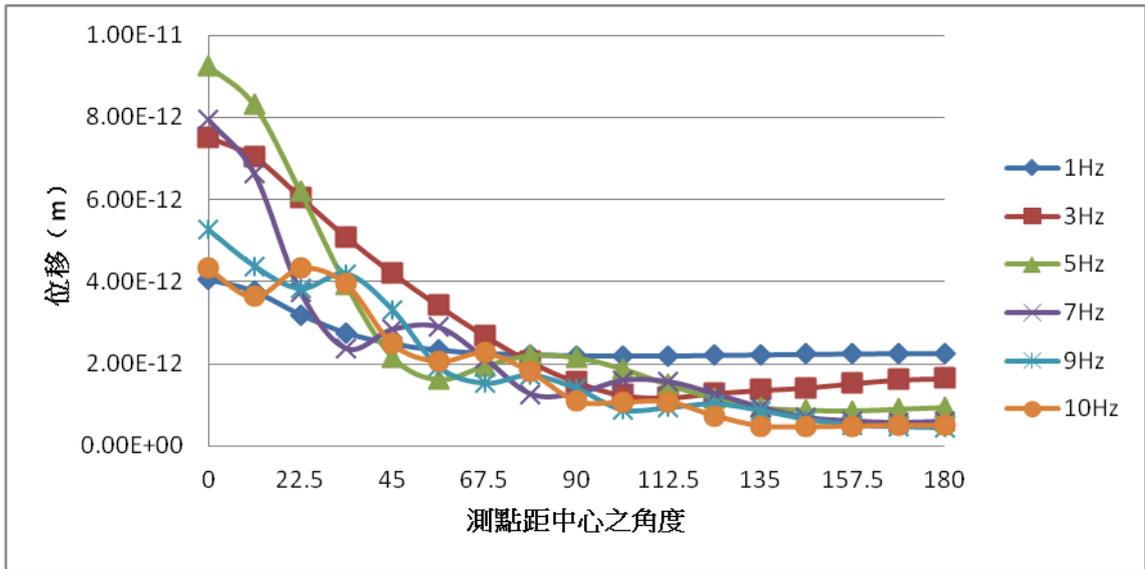


(a) 無放置屏蔽隧道區

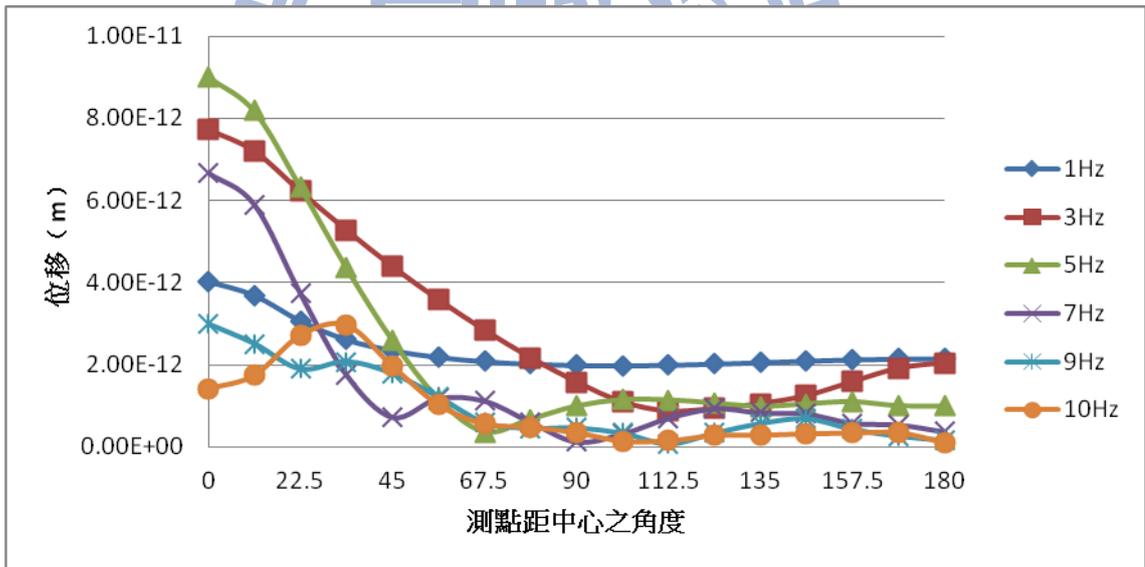


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.34 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 154m 之 U_r)

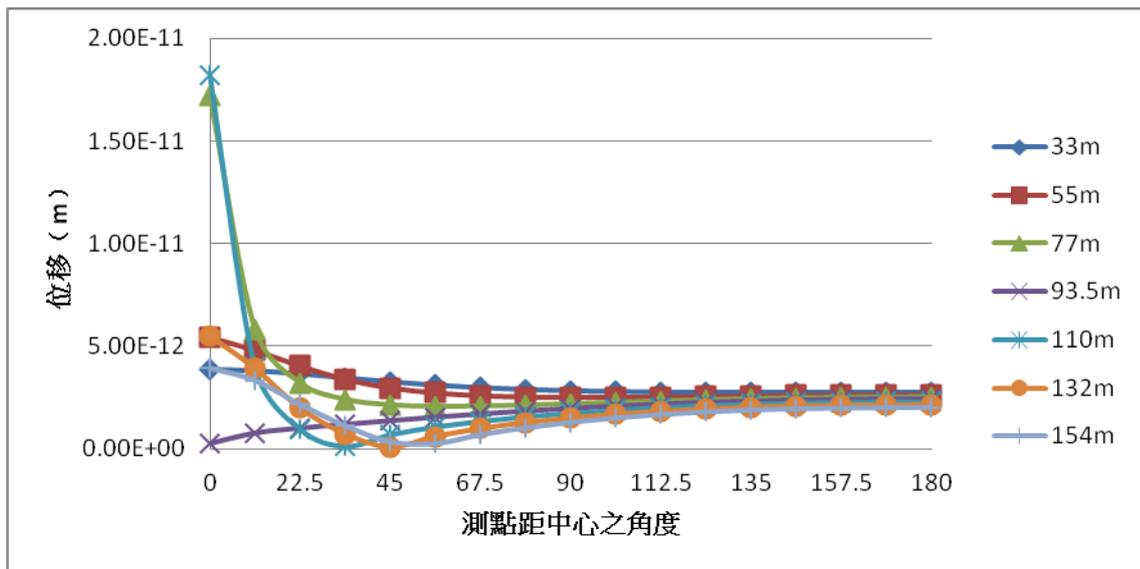


(a) 無放置屏蔽隧道區

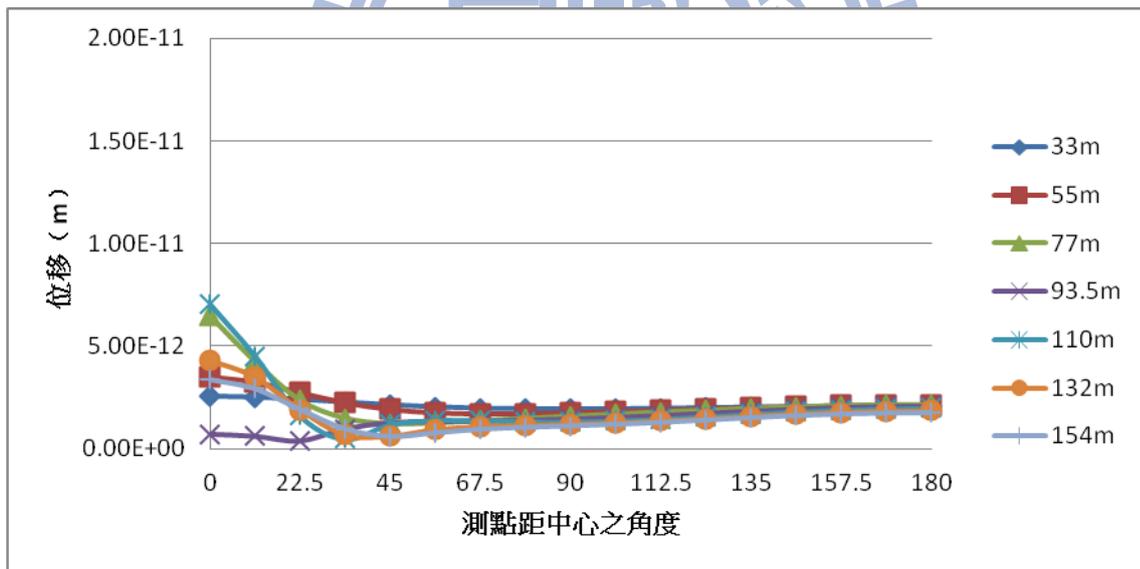


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.35 土壤無開挖之分析 (水平方向施力點距中心 154m 之 U_z)

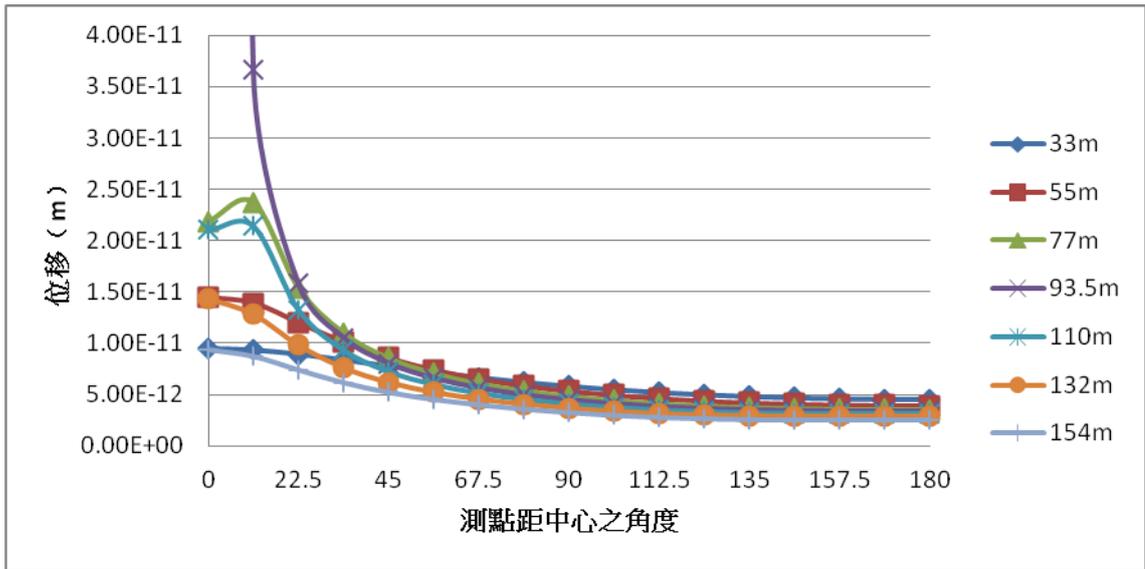


(a) 無放置屏蔽隧道區

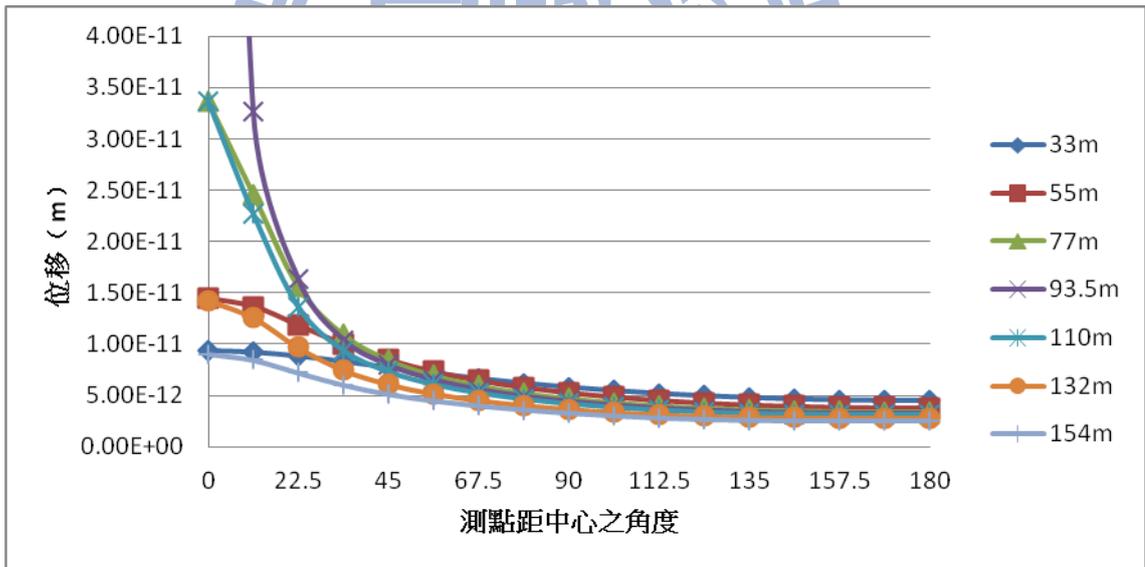


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.36 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

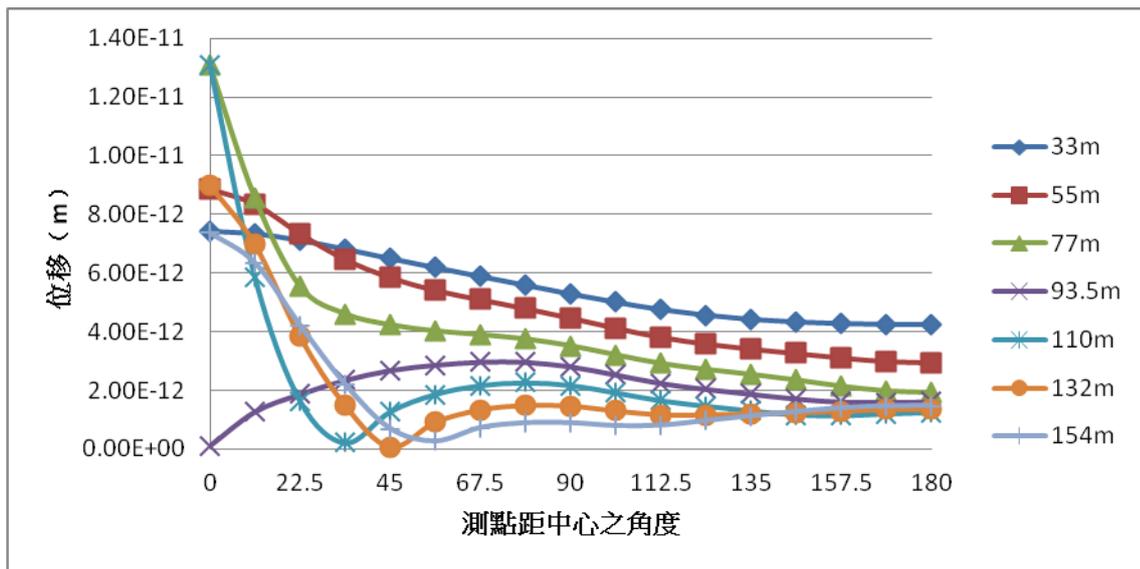


(a) 無放置屏蔽隧道區

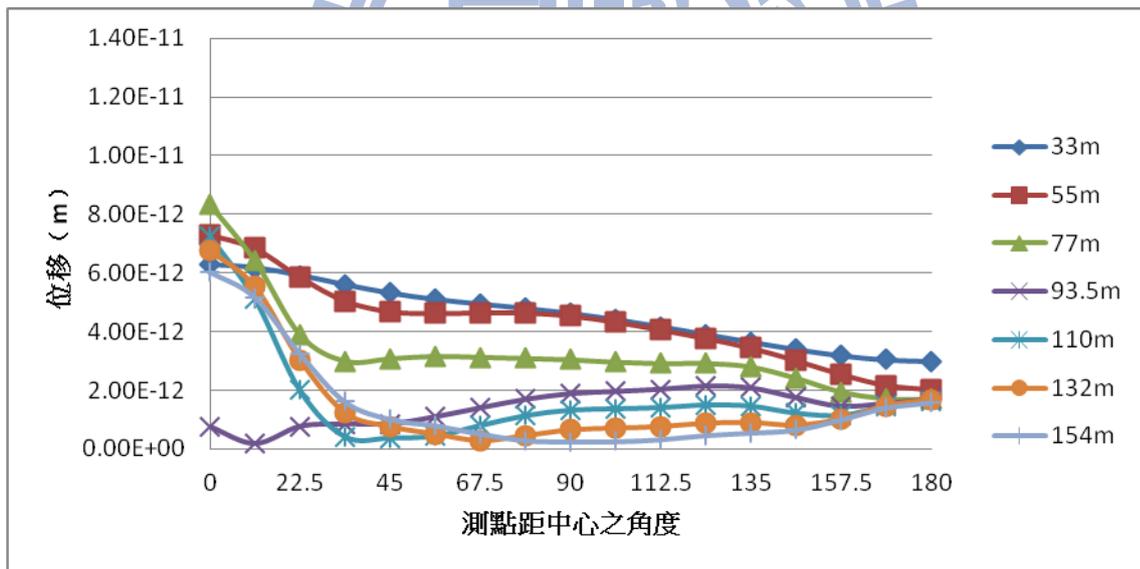


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.37 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

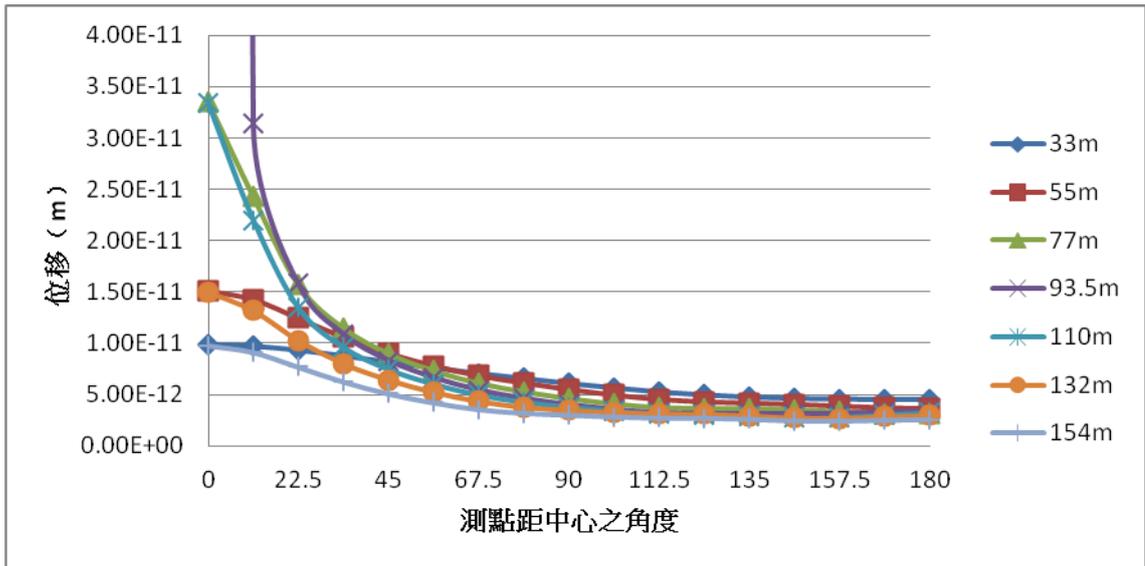


(a) 無放置屏蔽隧道區

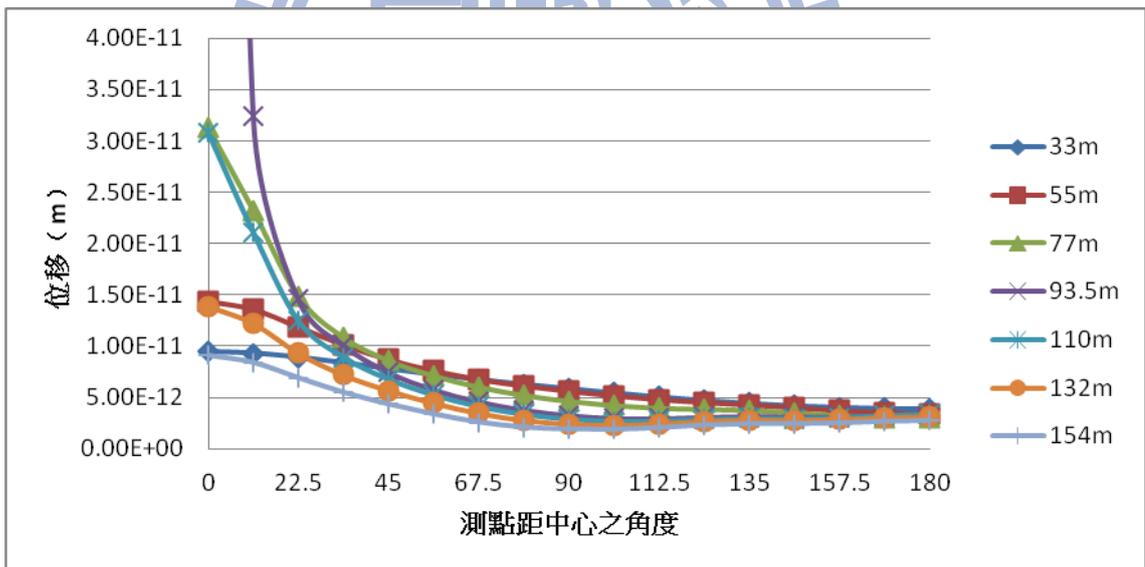


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.38 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

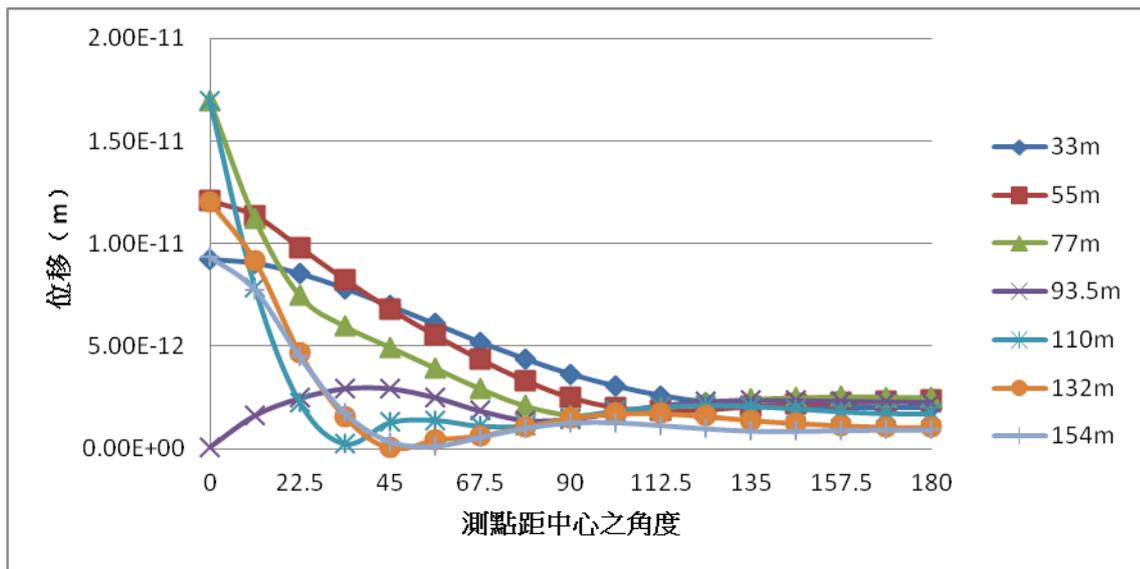


(a) 無放置屏蔽隧道區

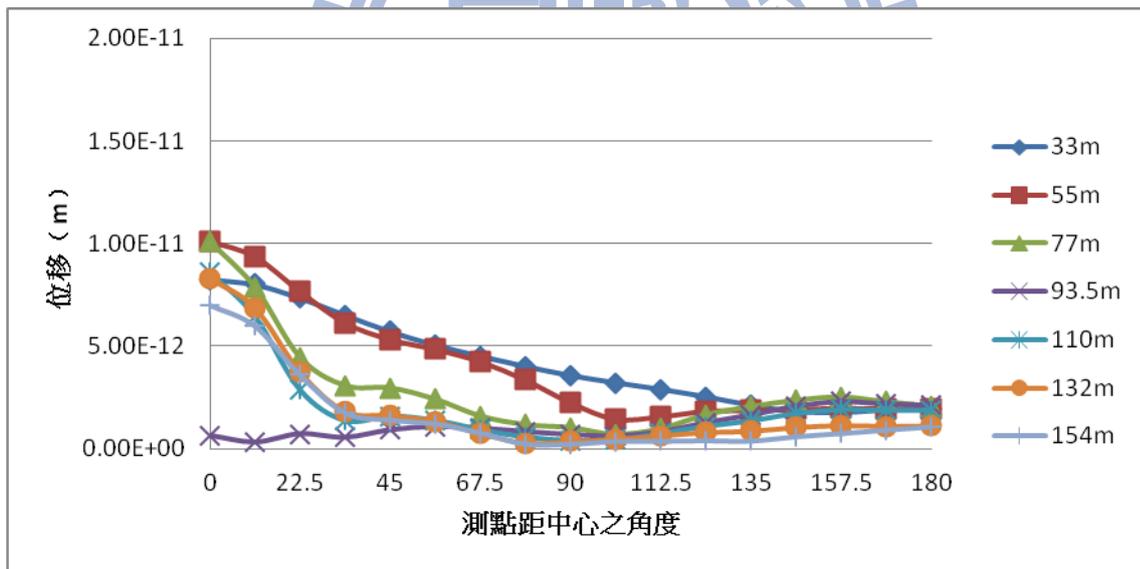


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.39 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

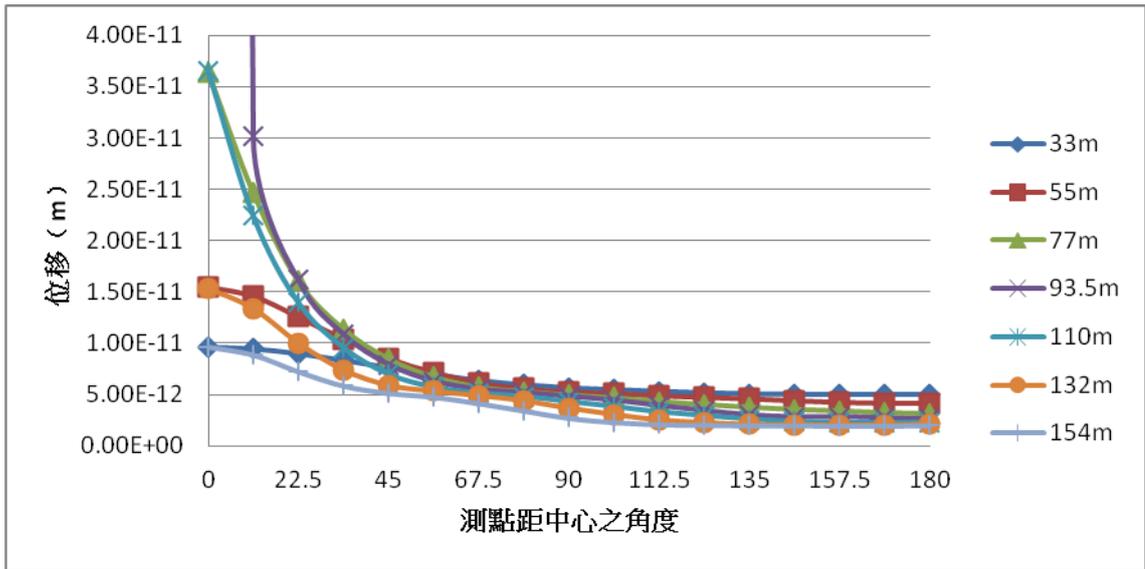


(a) 無放置屏蔽隧道區

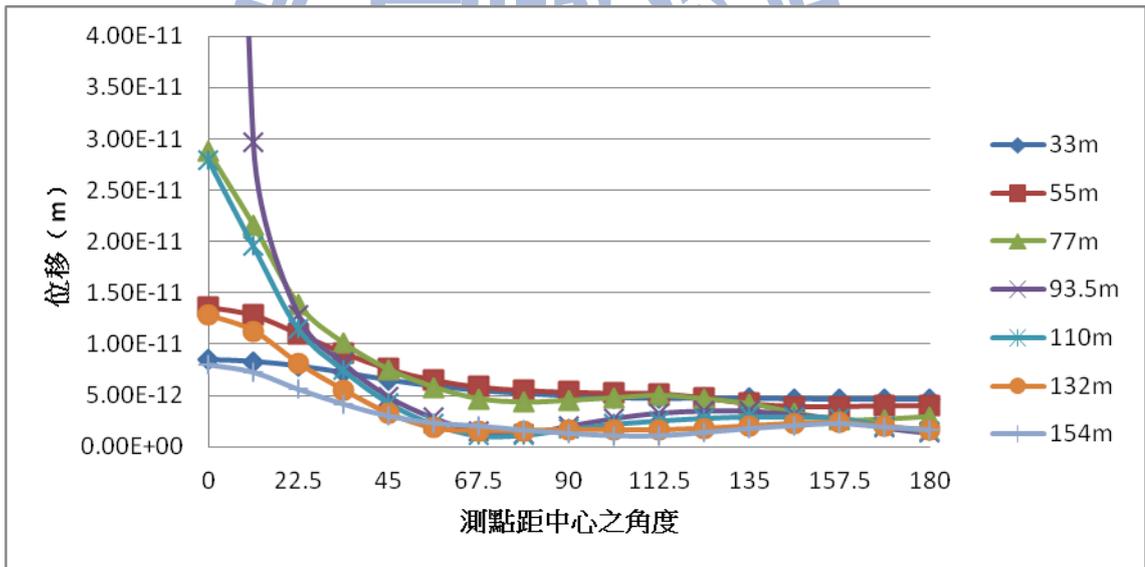


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.40 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

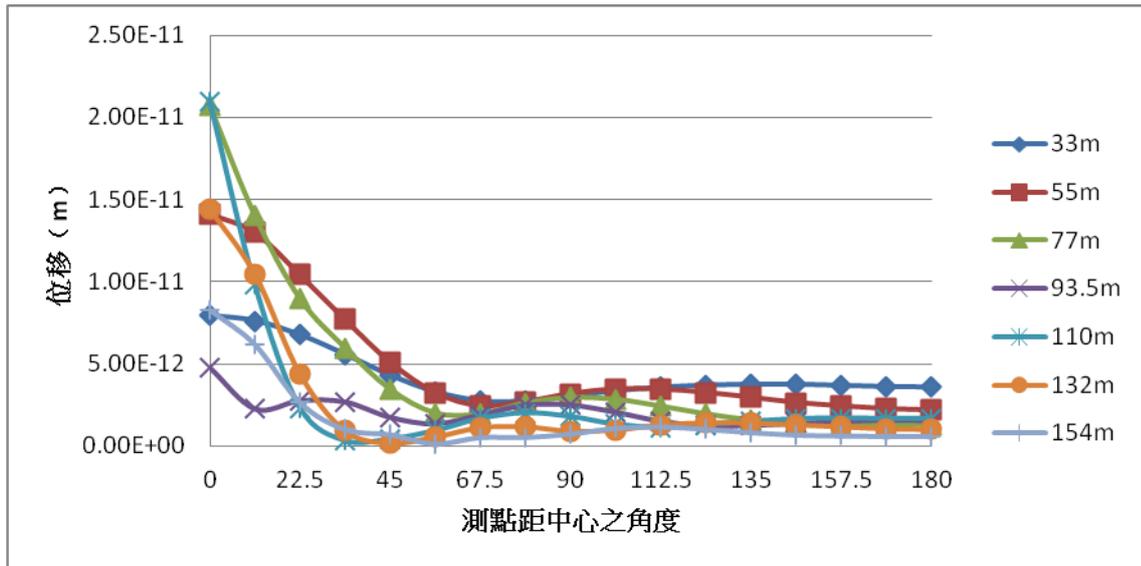


(a) 無放置屏蔽隧道區

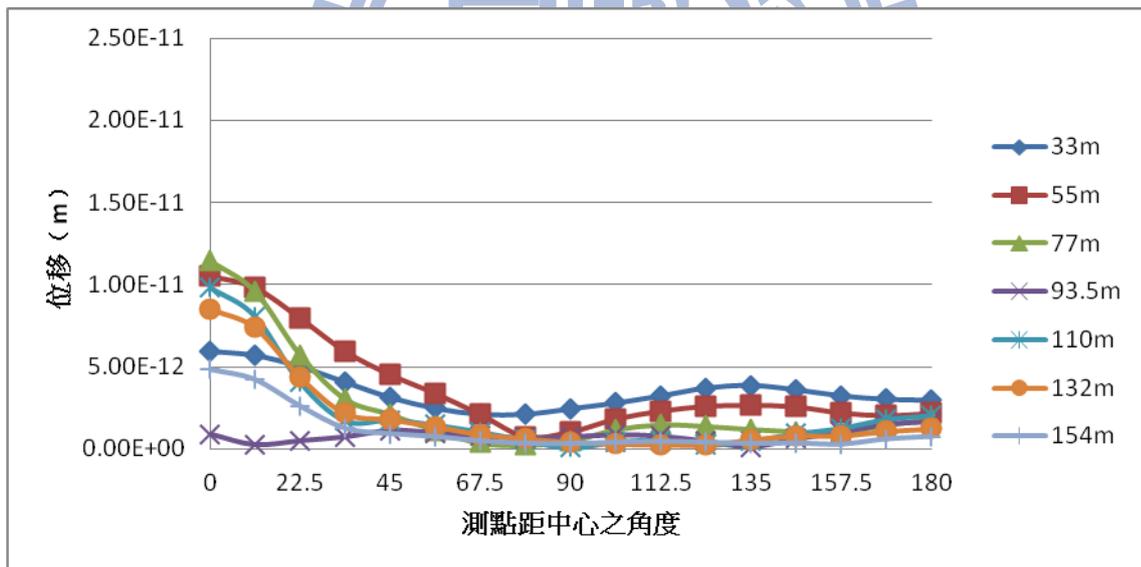


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.41 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)

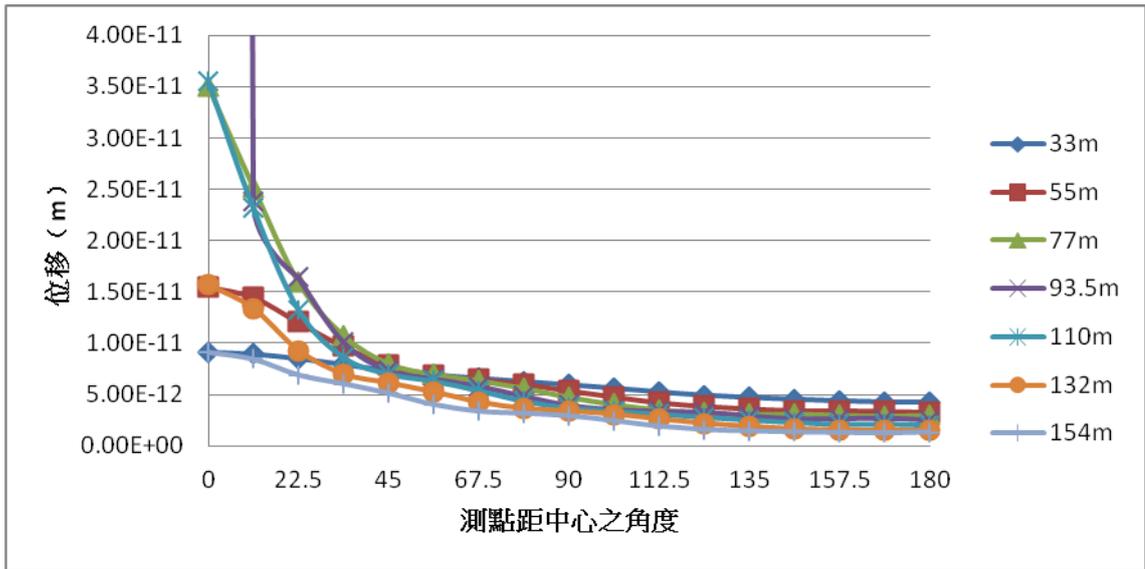


(a) 無放置屏蔽隧道區

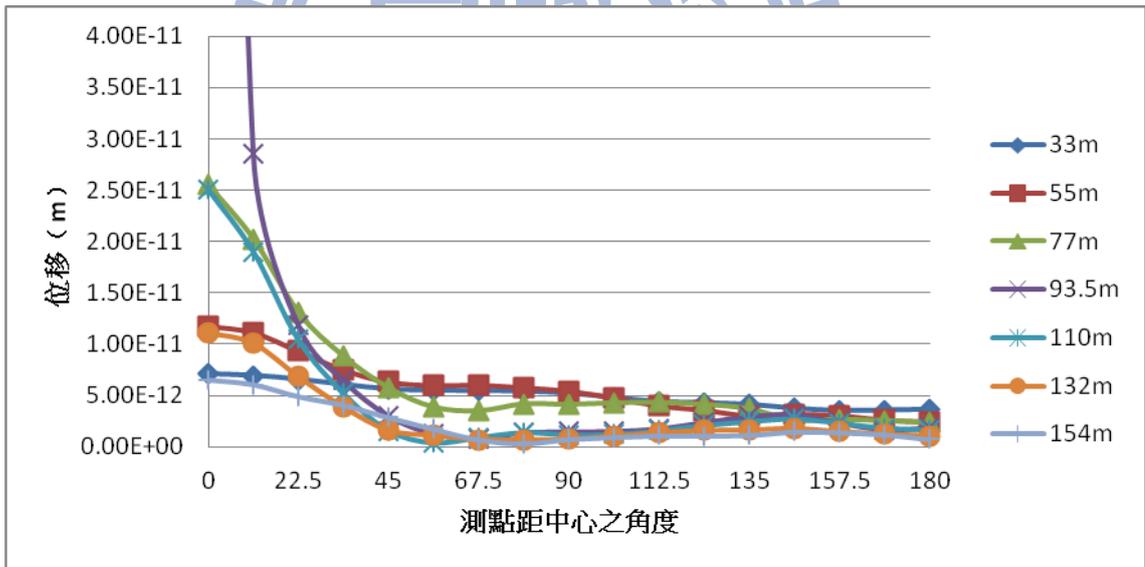


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.42 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

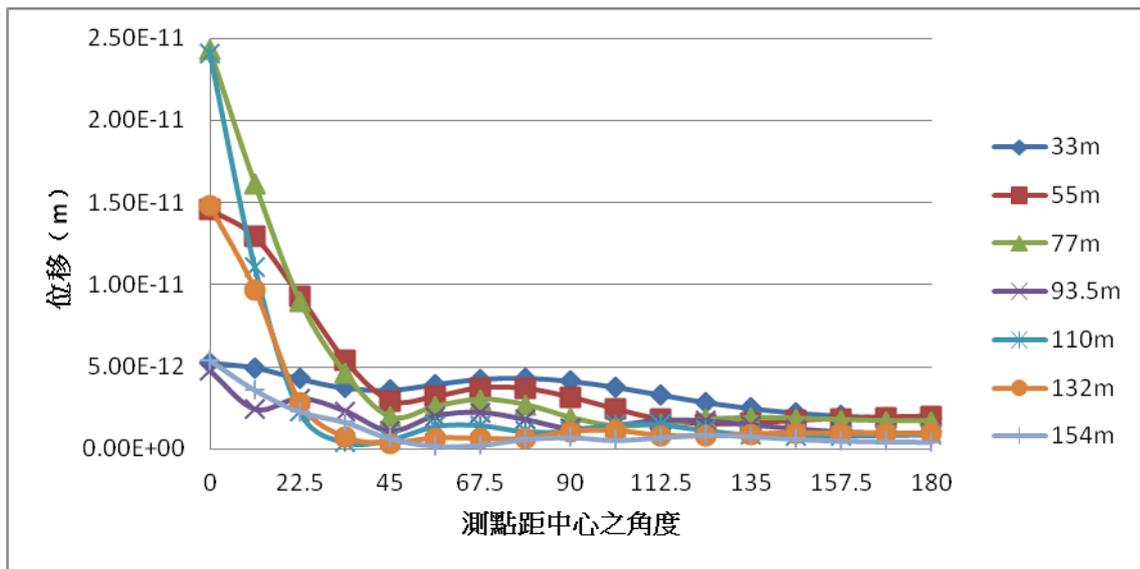


(a) 無放置屏蔽隧道區

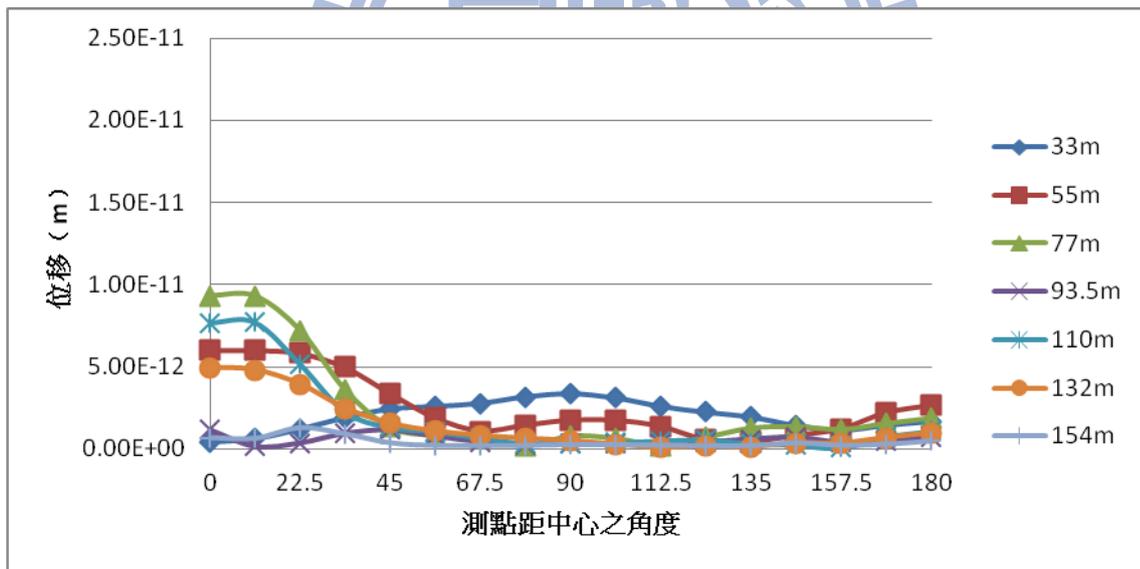


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.43 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

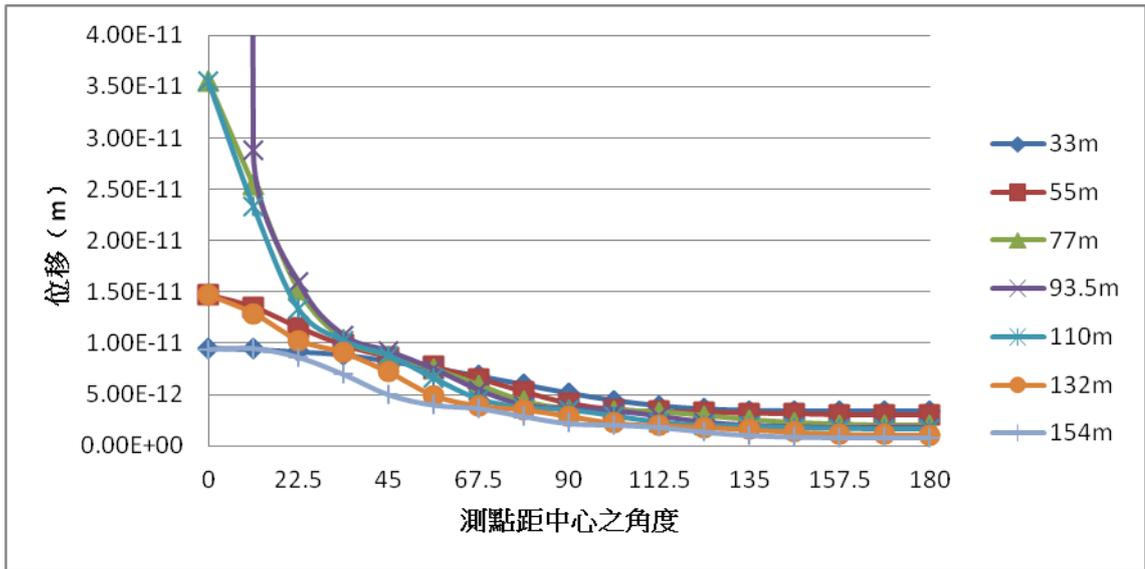


(a) 無放置屏蔽隧道區

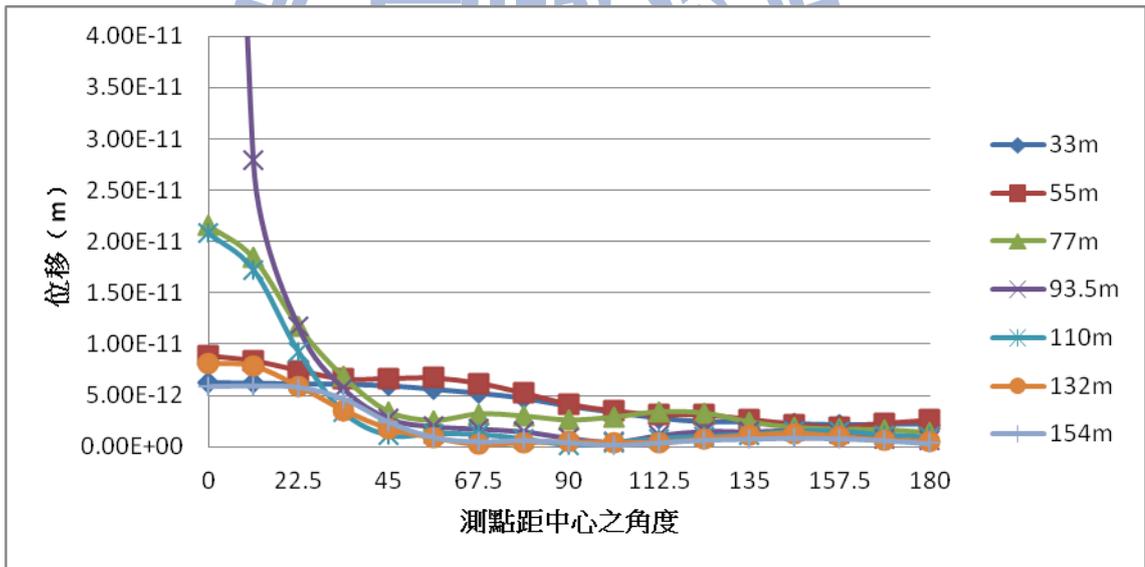


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.44 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

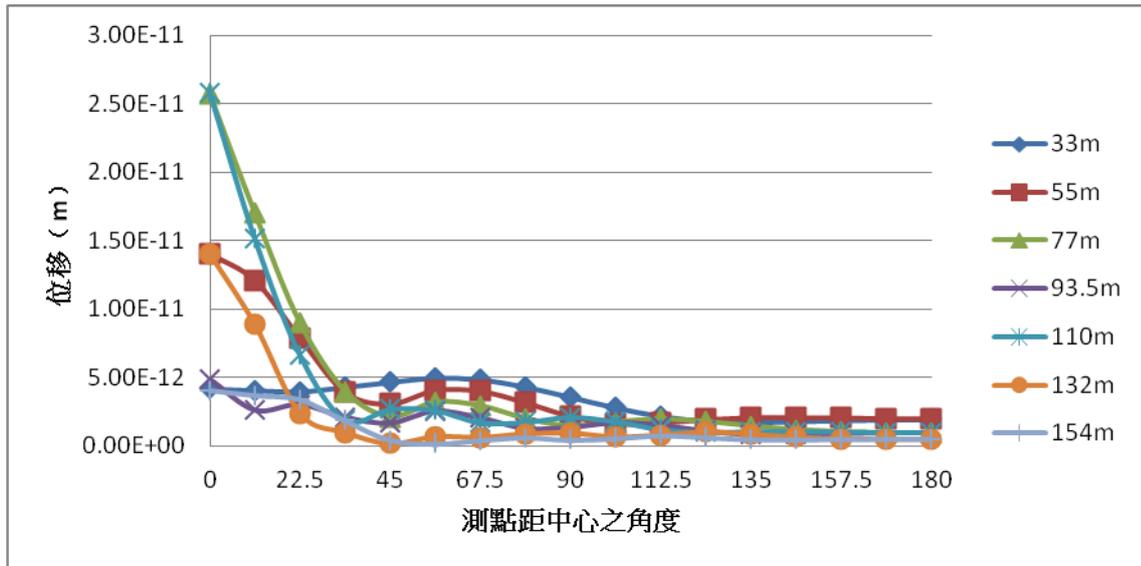


(a) 無放置屏蔽隧道區

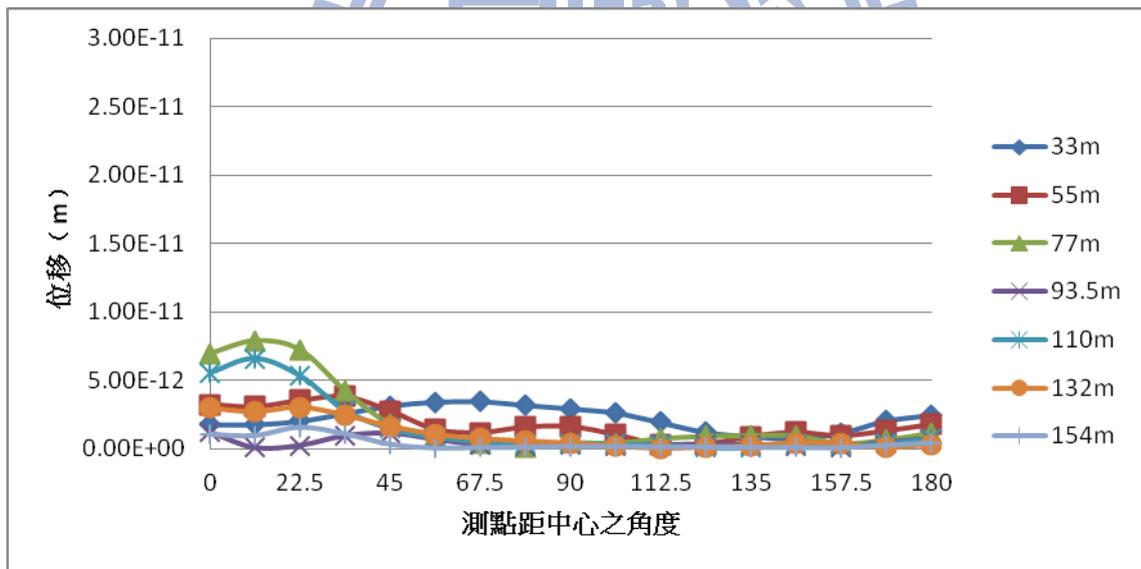


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.45 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

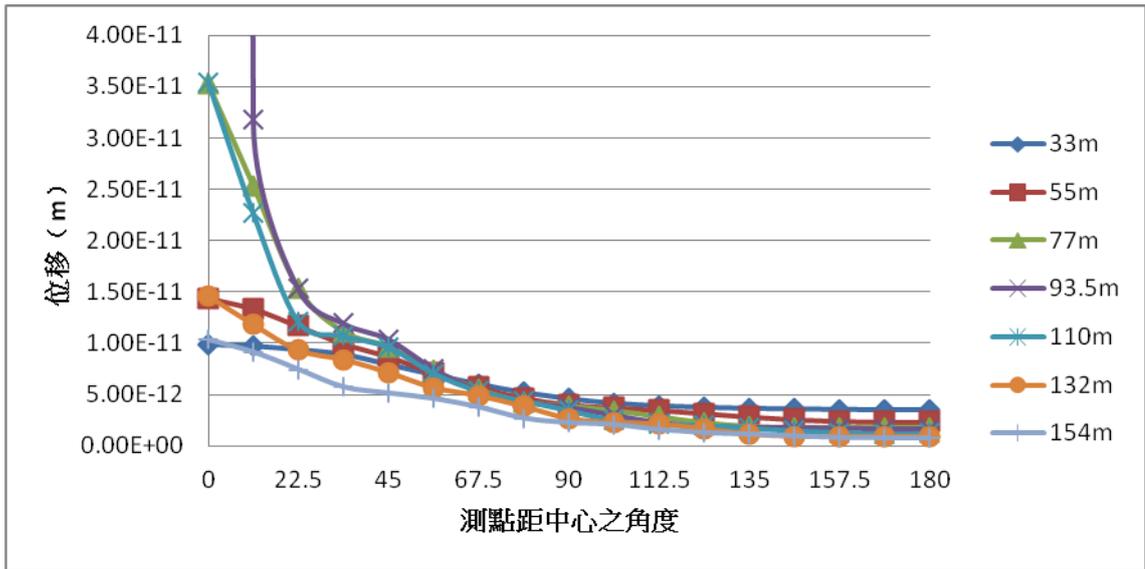


(a) 無放置屏蔽隧道區

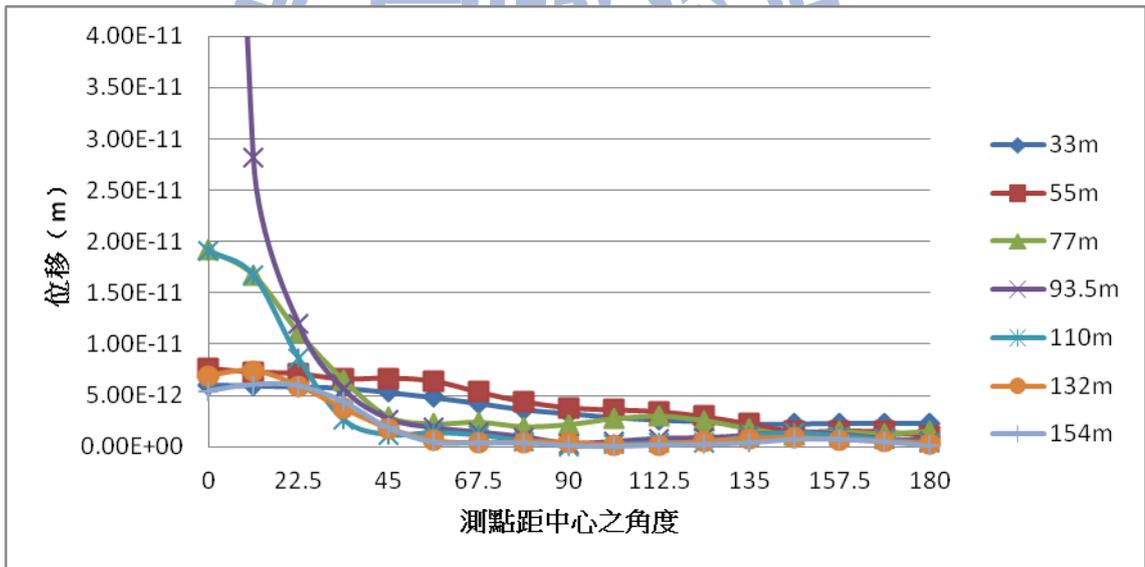


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.46 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)

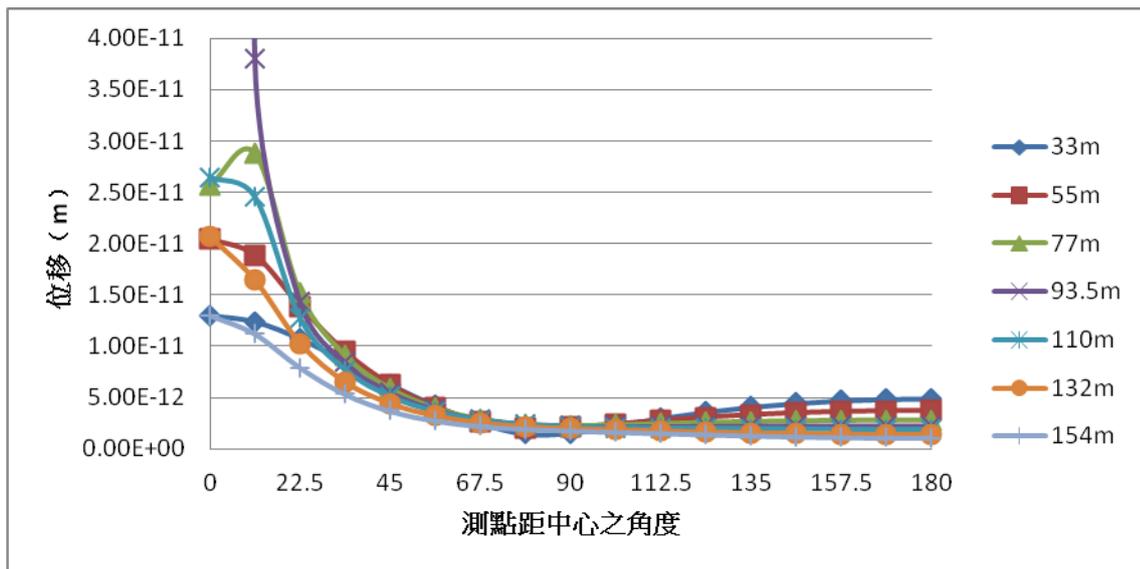


(a) 無放置屏蔽隧道區

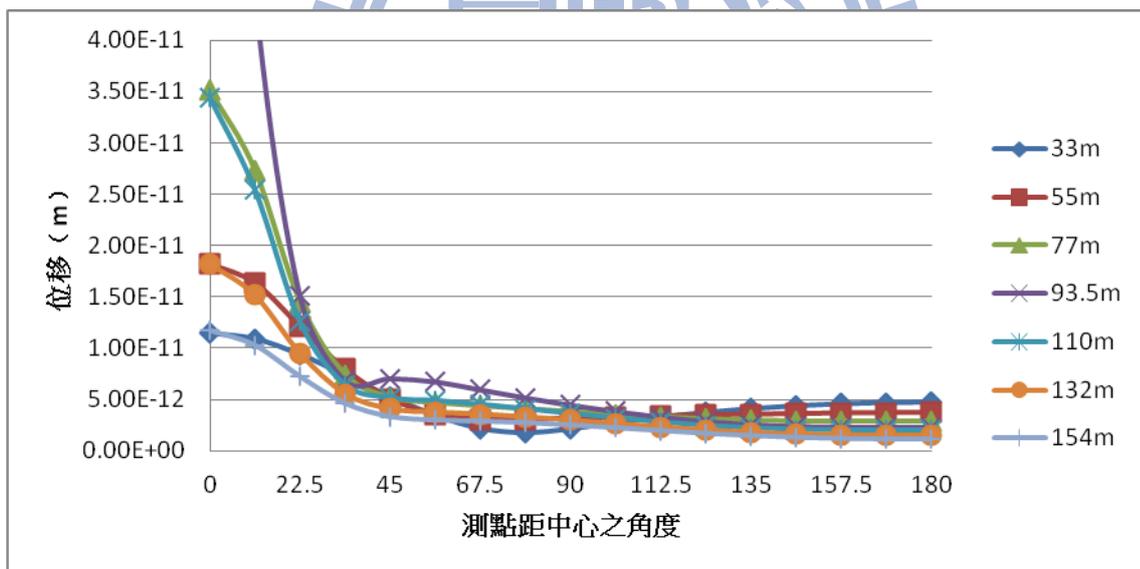


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.47 土壤無開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

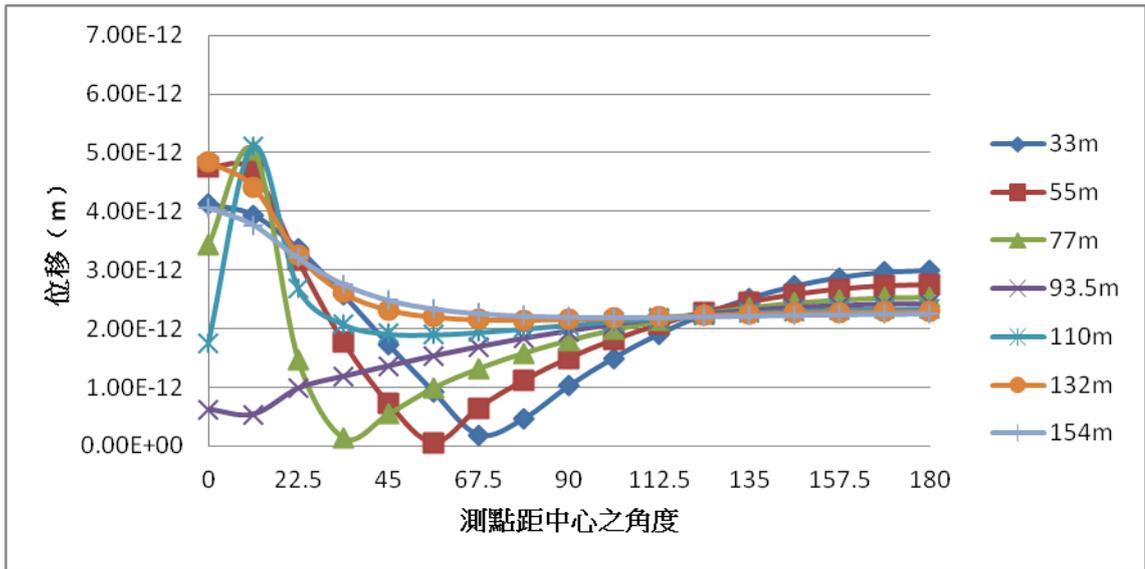


(a) 無放置屏蔽隧道區

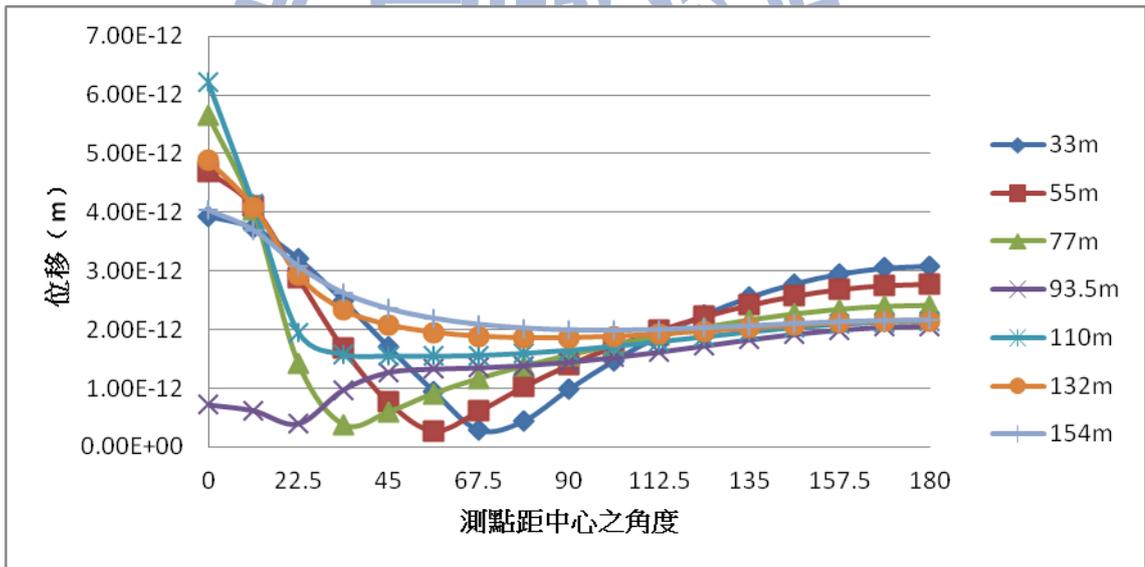


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.48 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

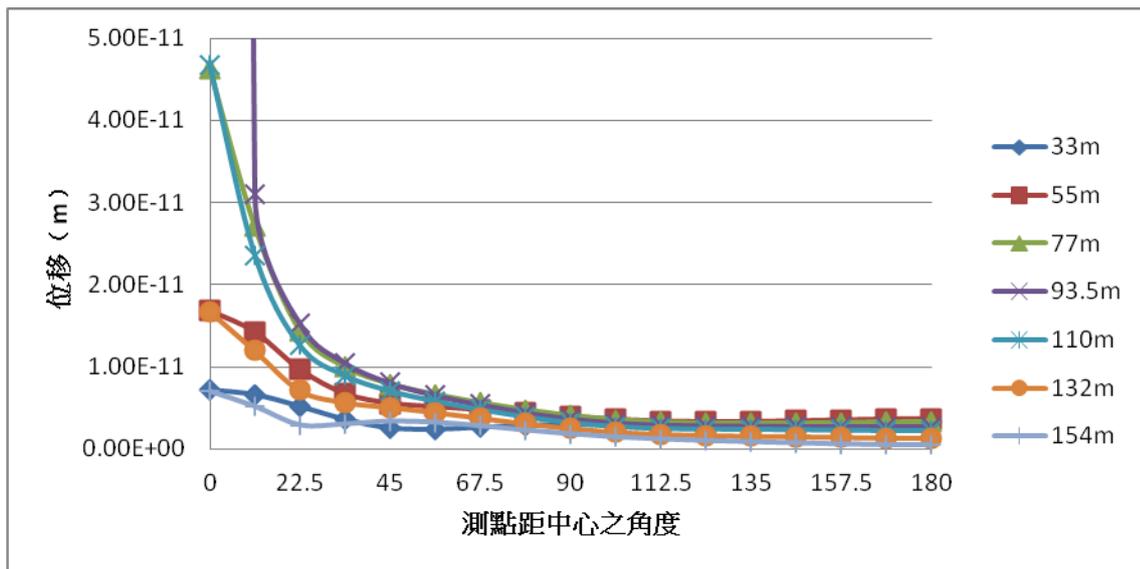


(a) 無放置屏蔽隧道區

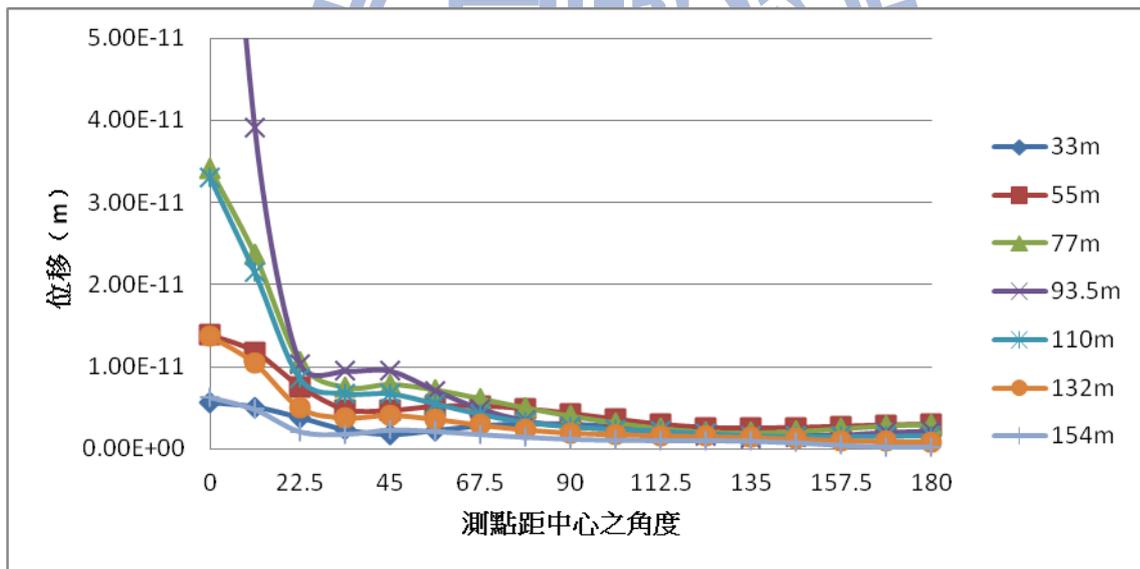


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.49 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

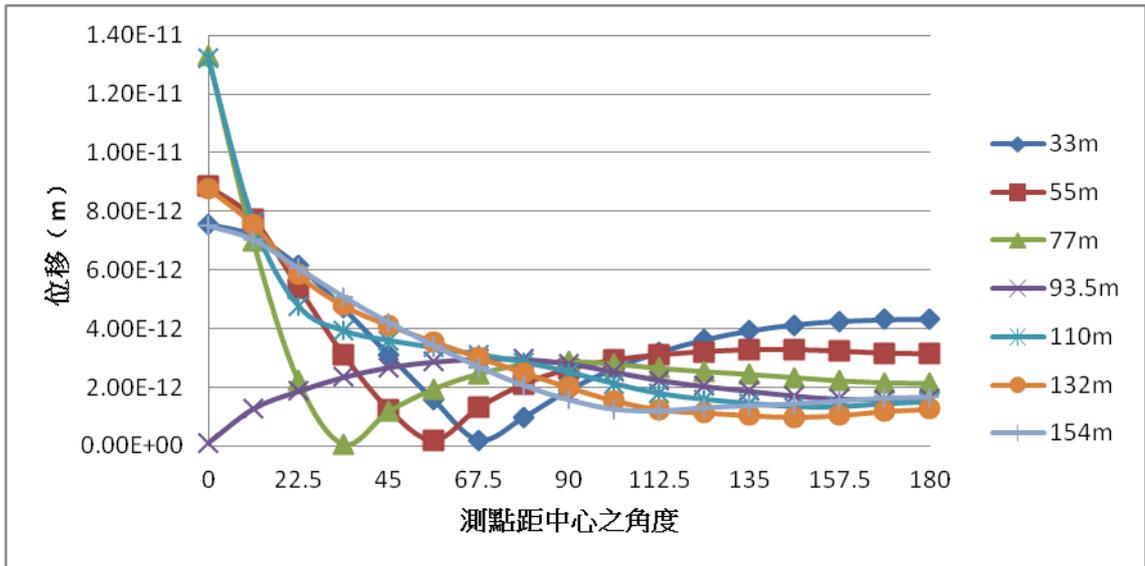


(a) 無放置屏蔽隧道區

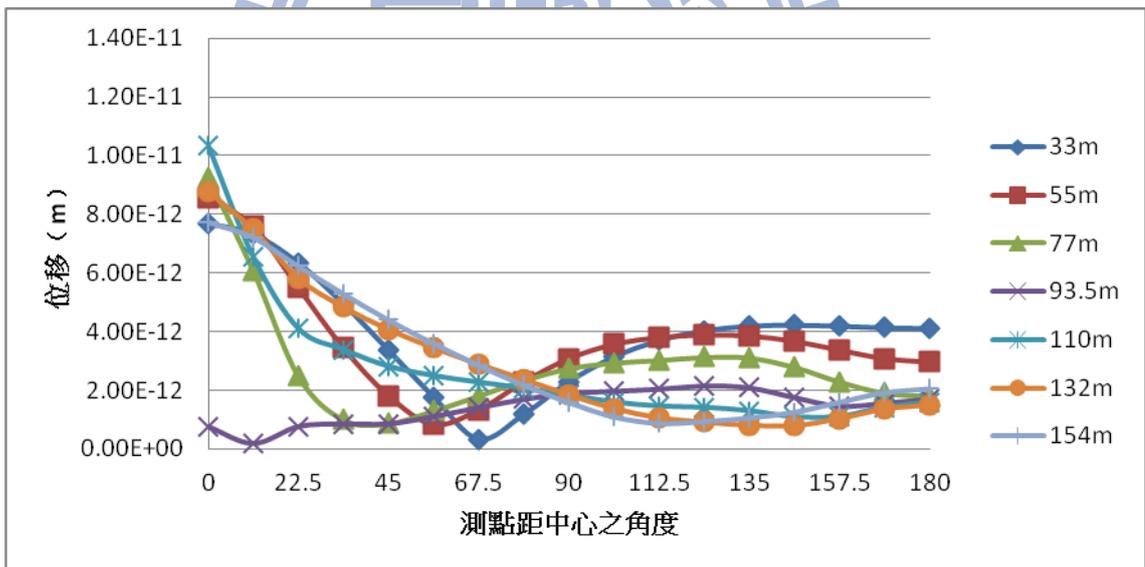


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.50 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

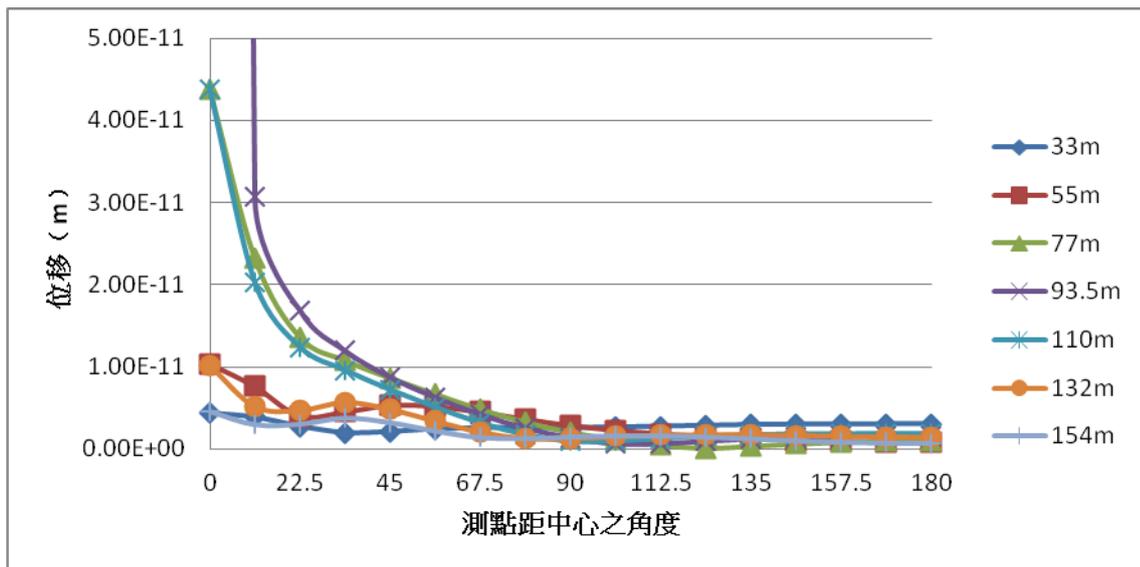


(a) 無放置屏蔽隧道區

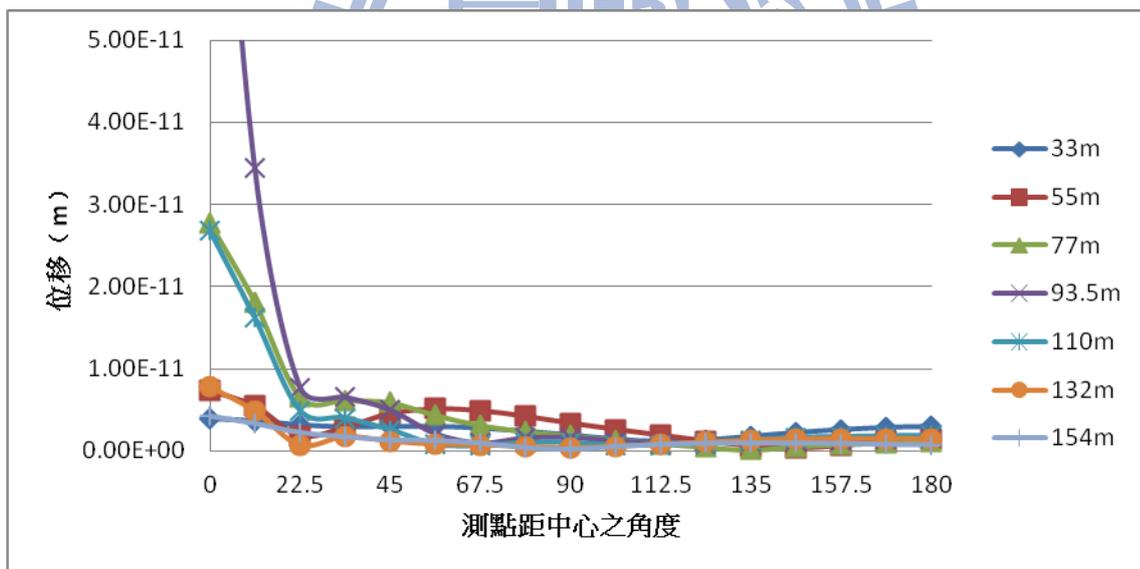


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.51 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

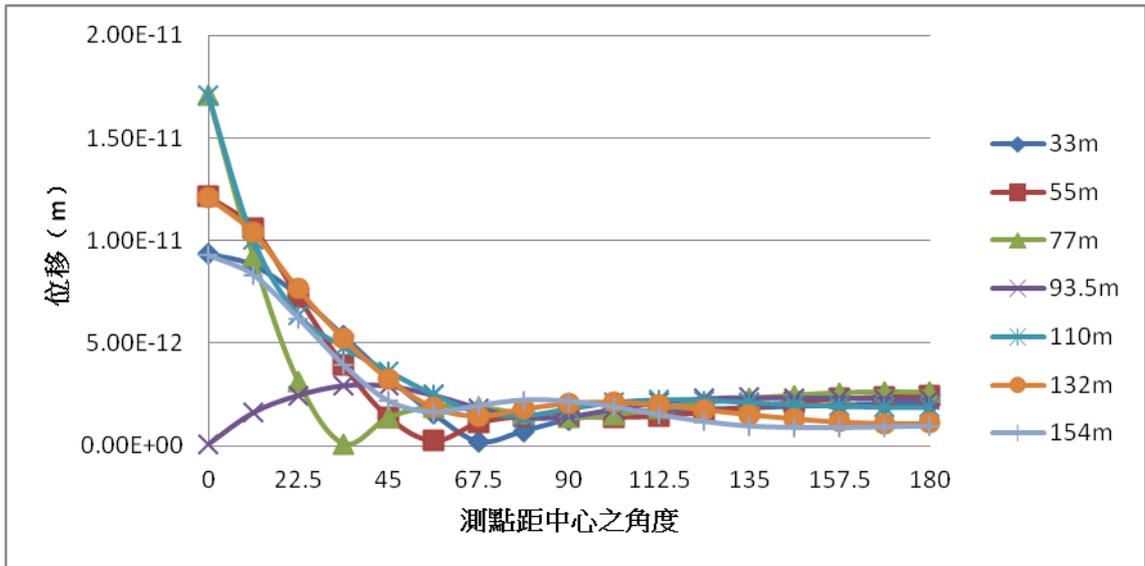


(a) 無放置屏蔽隧道區

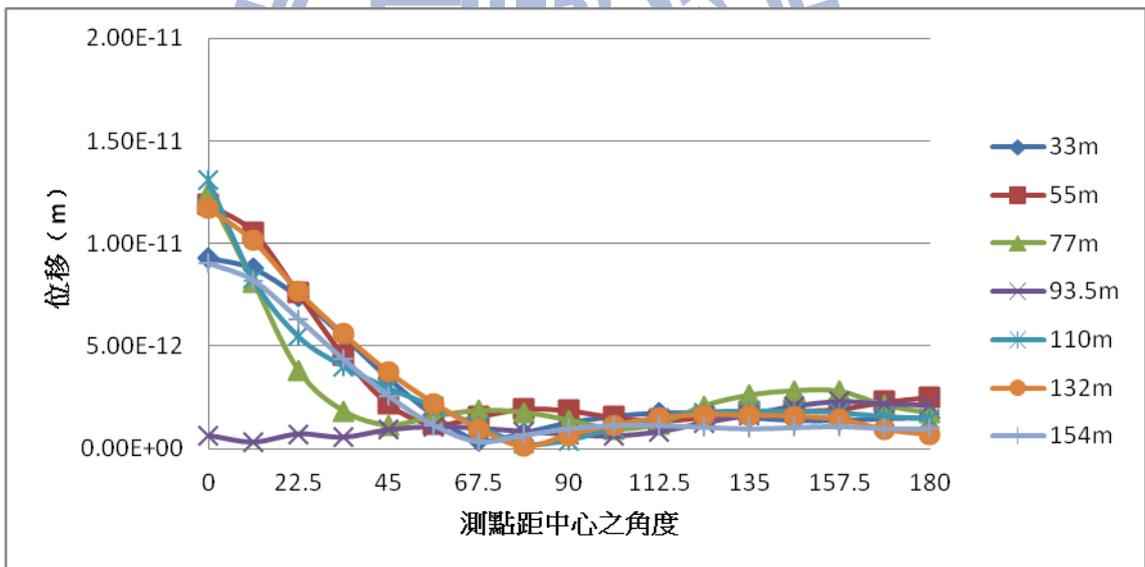


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.52 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

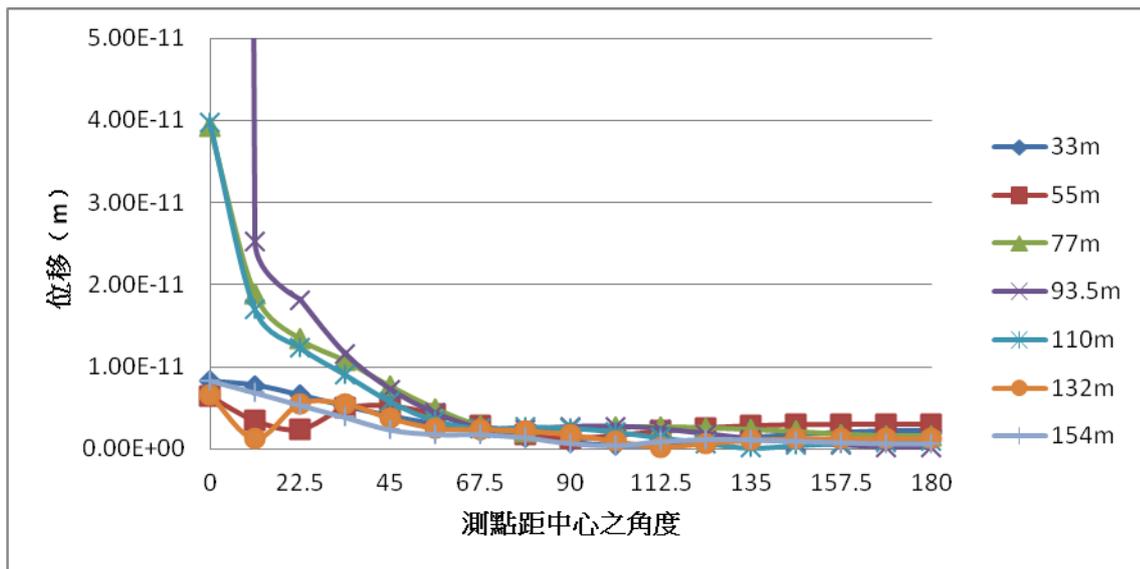


(a) 無放置屏蔽隧道區

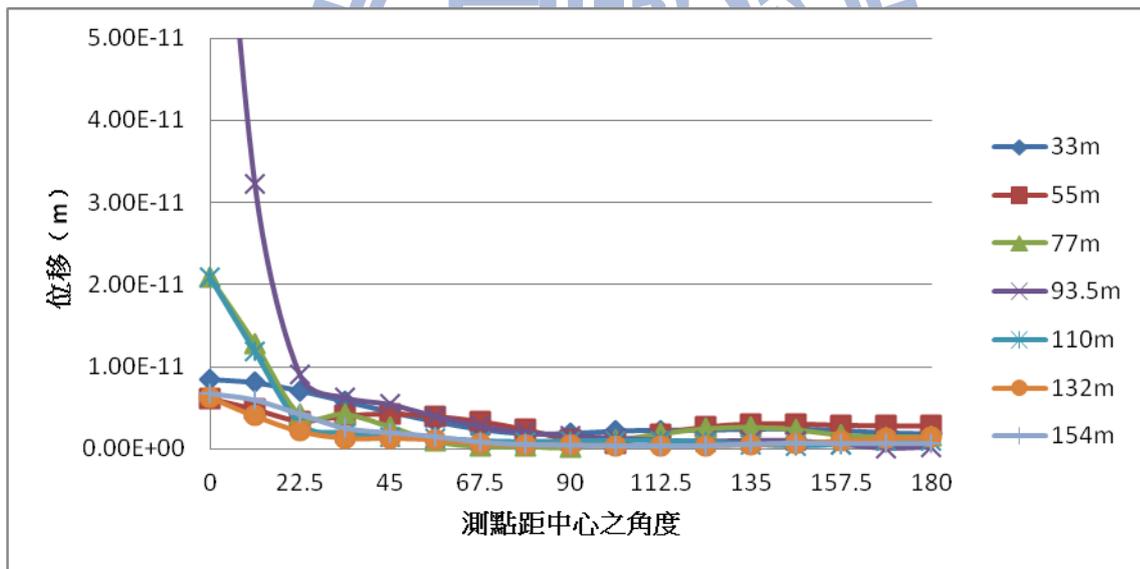


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.53 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)

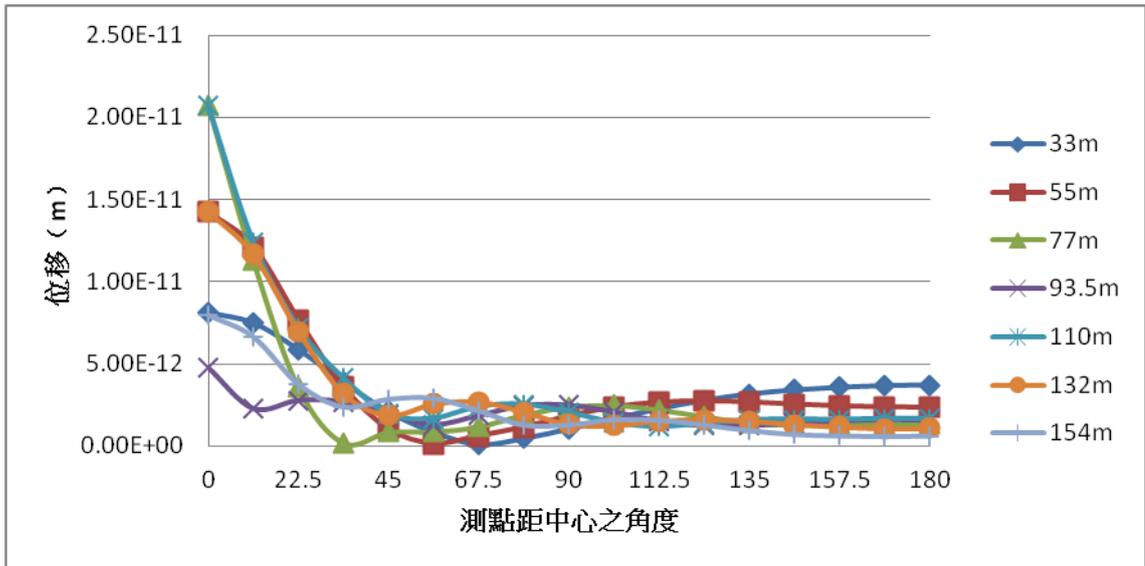


(a) 無放置屏蔽隧道區

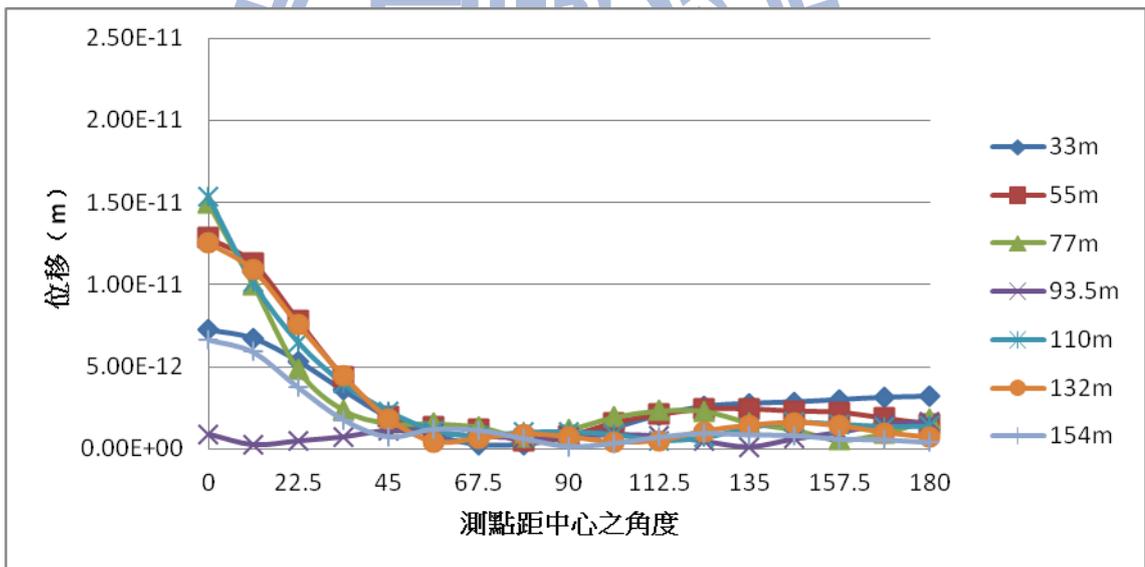


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.54 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

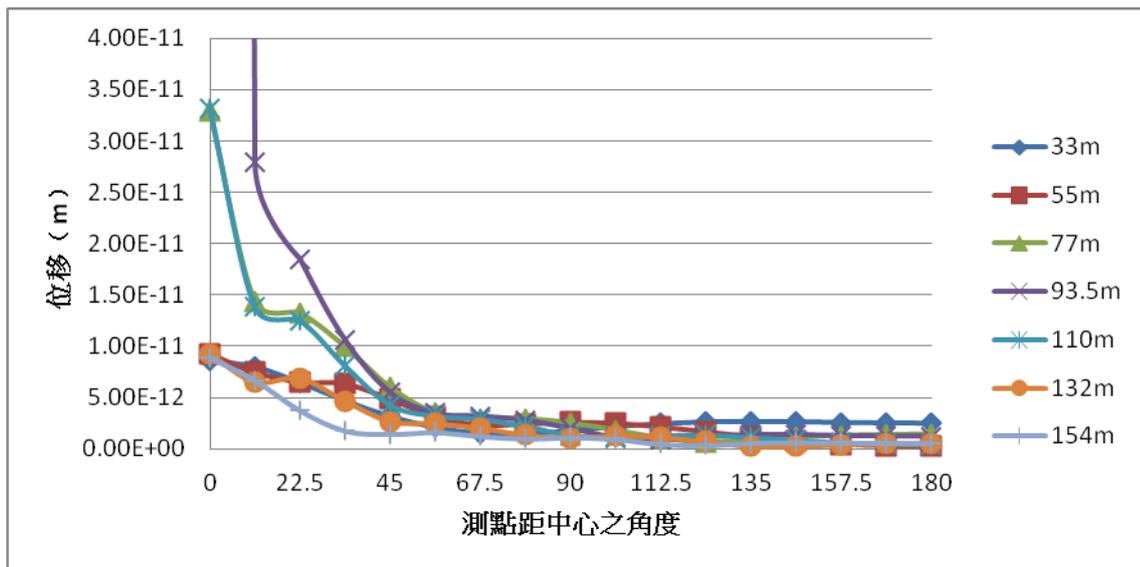


(a) 無放置屏蔽隧道區

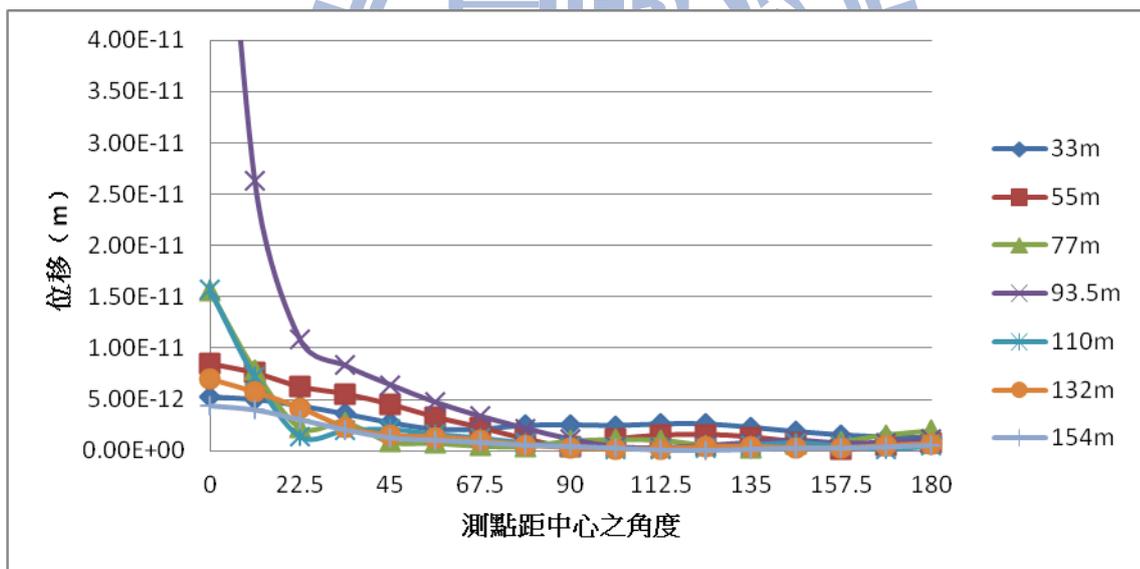


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.55 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

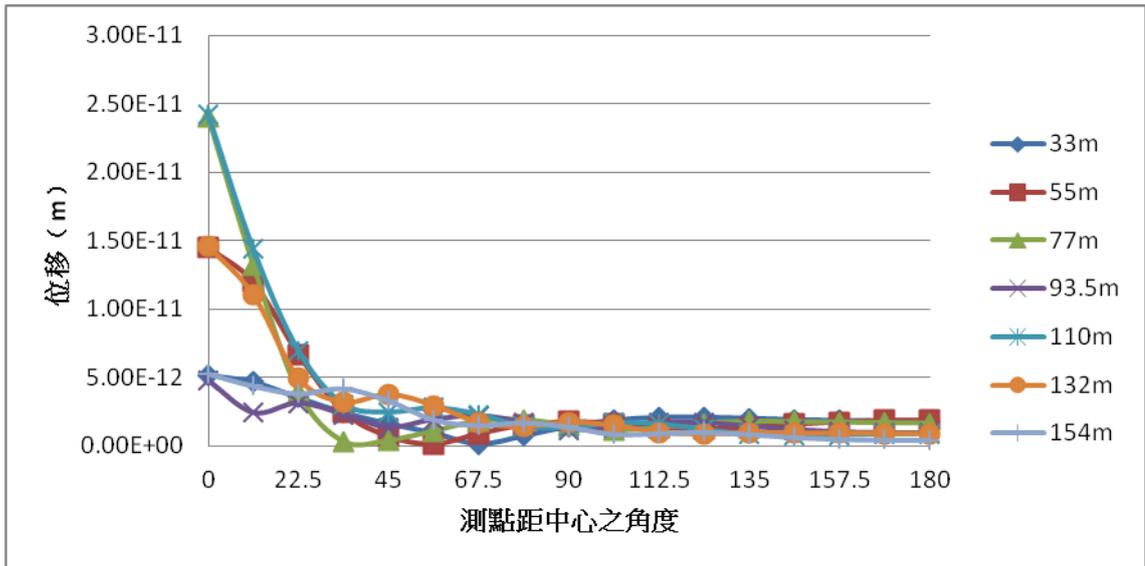


(a) 無放置屏蔽隧道區

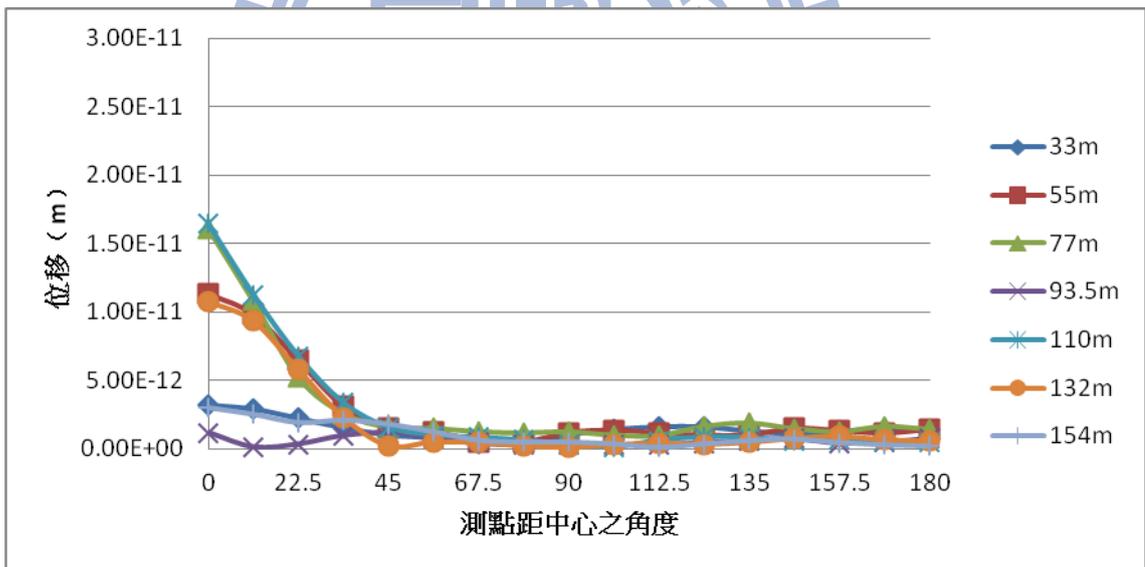


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.56 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

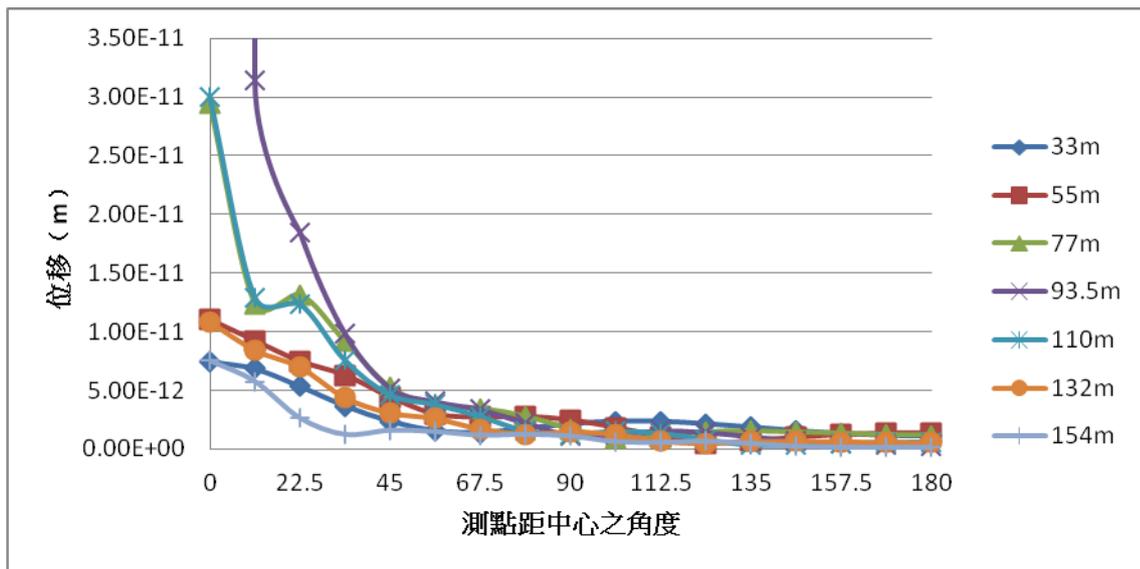


(a) 無放置屏蔽隧道區

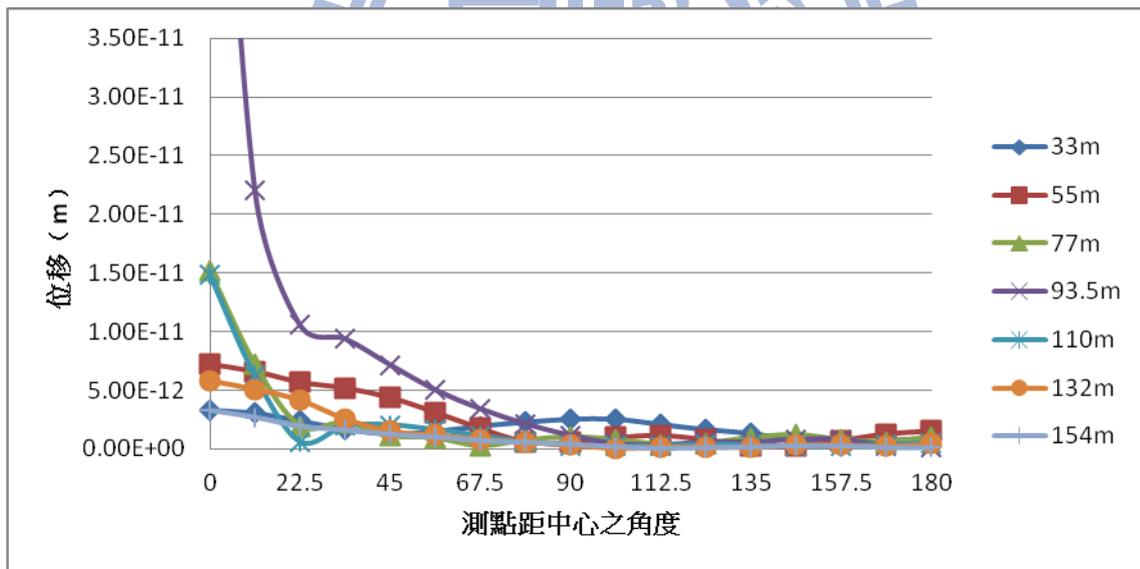


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.57 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

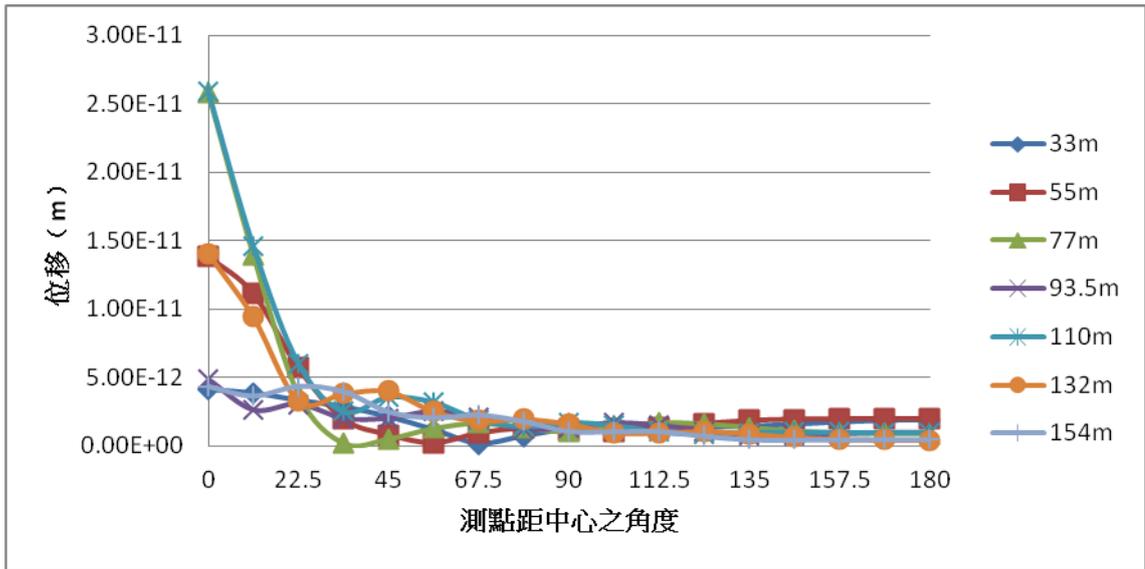


(a) 無放置屏蔽隧道區

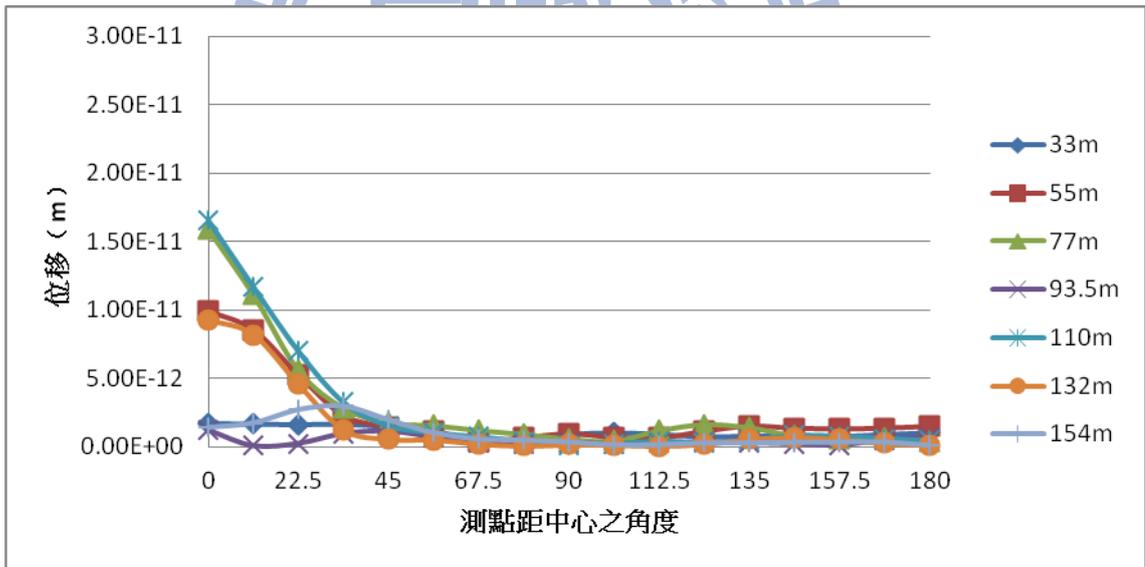


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.58 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)

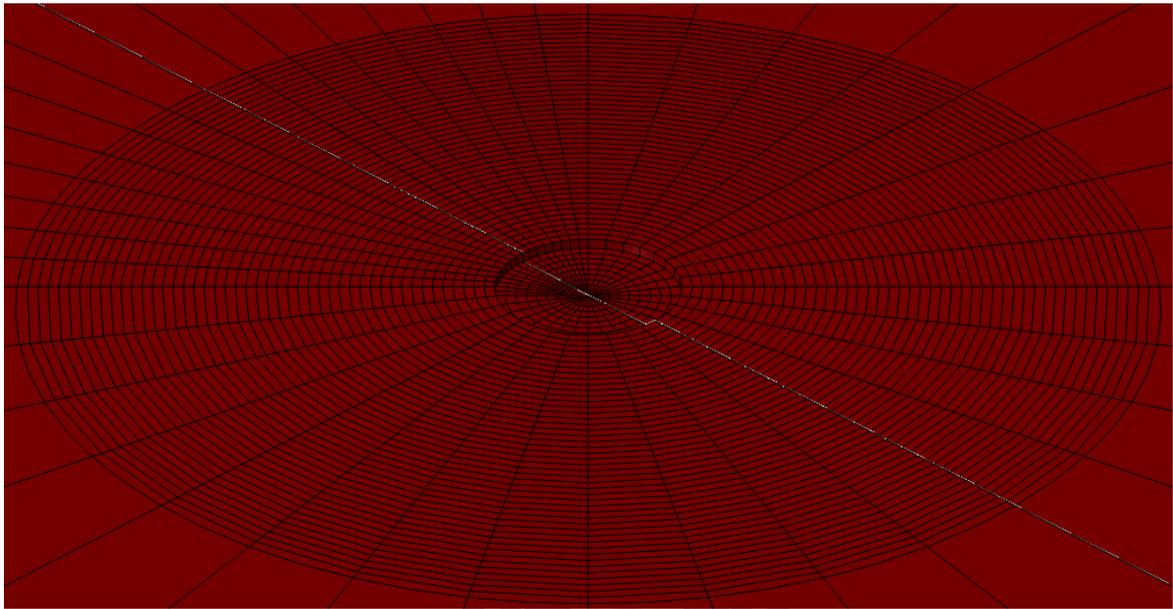


(a) 無放置屏蔽隧道區

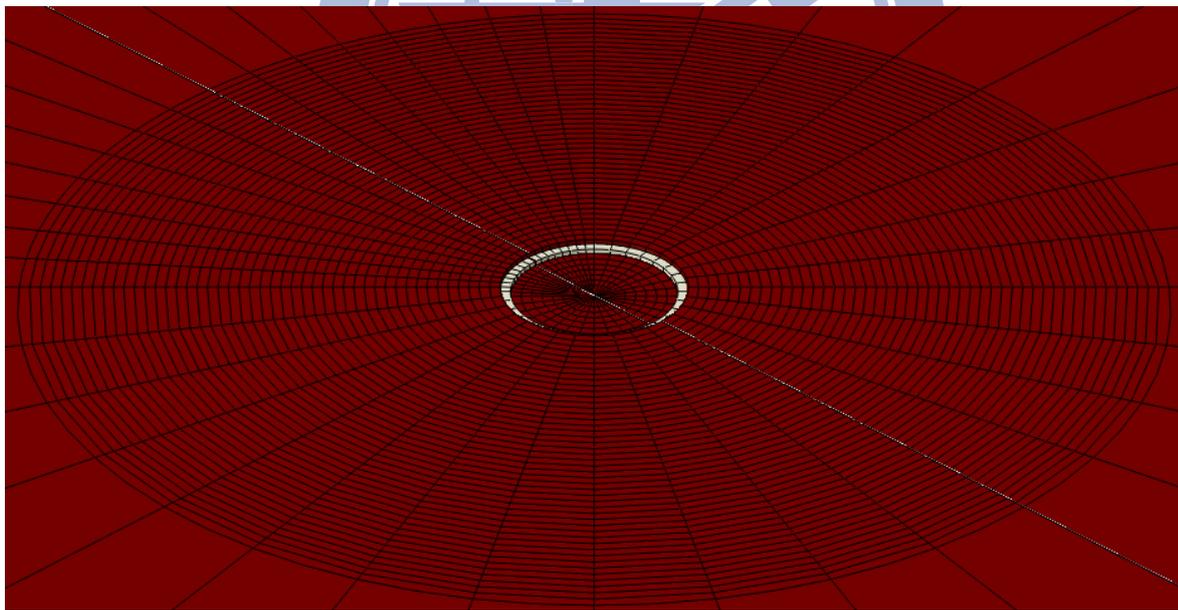


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.59 土壤無開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

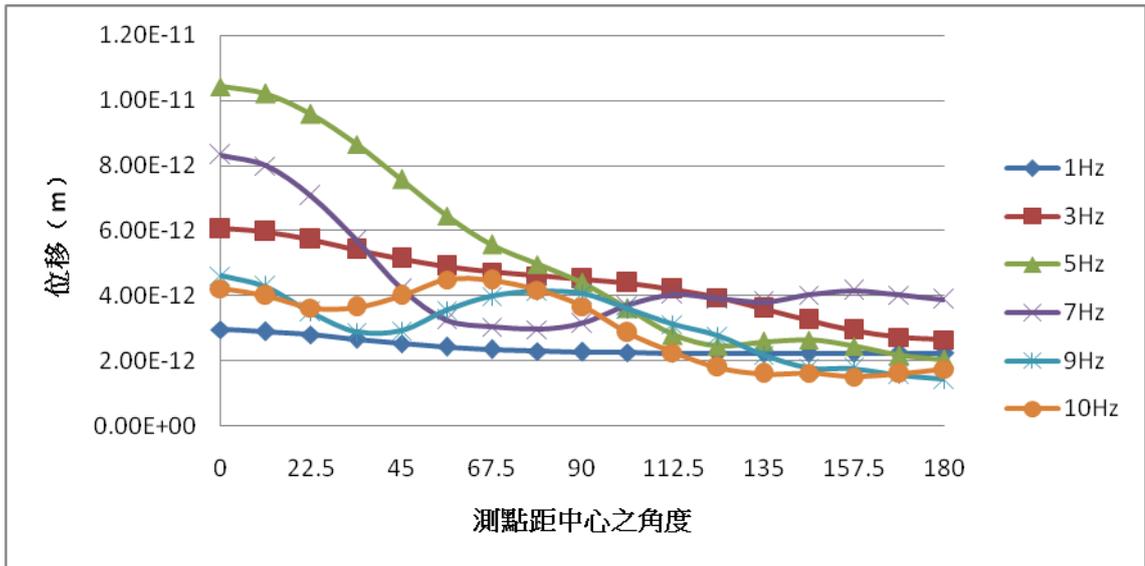


(a) 無放置屏蔽隧道區

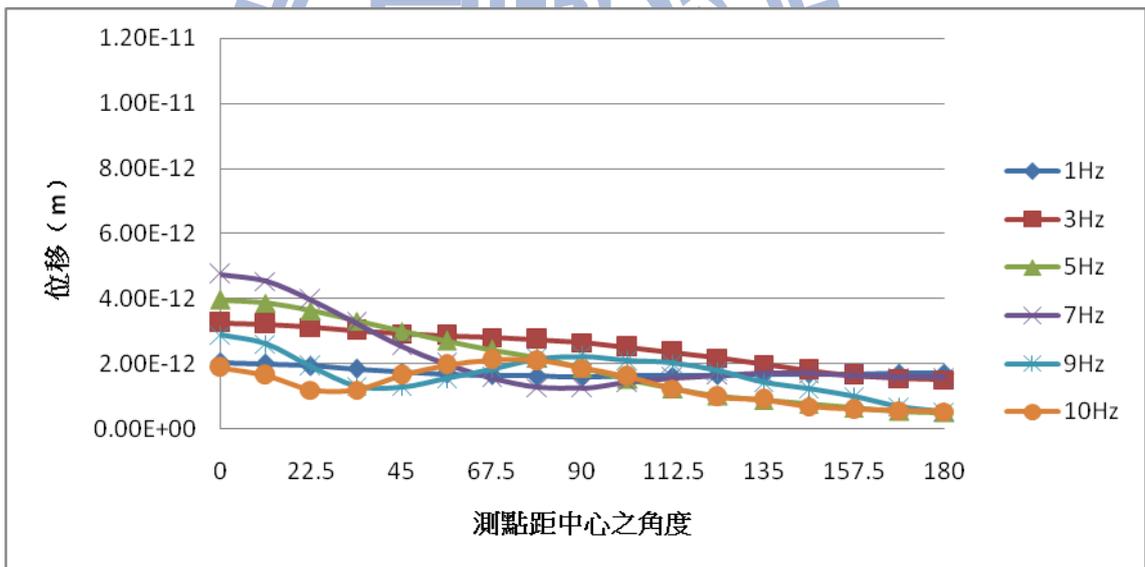


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.60 土壤全開挖之分析示意圖

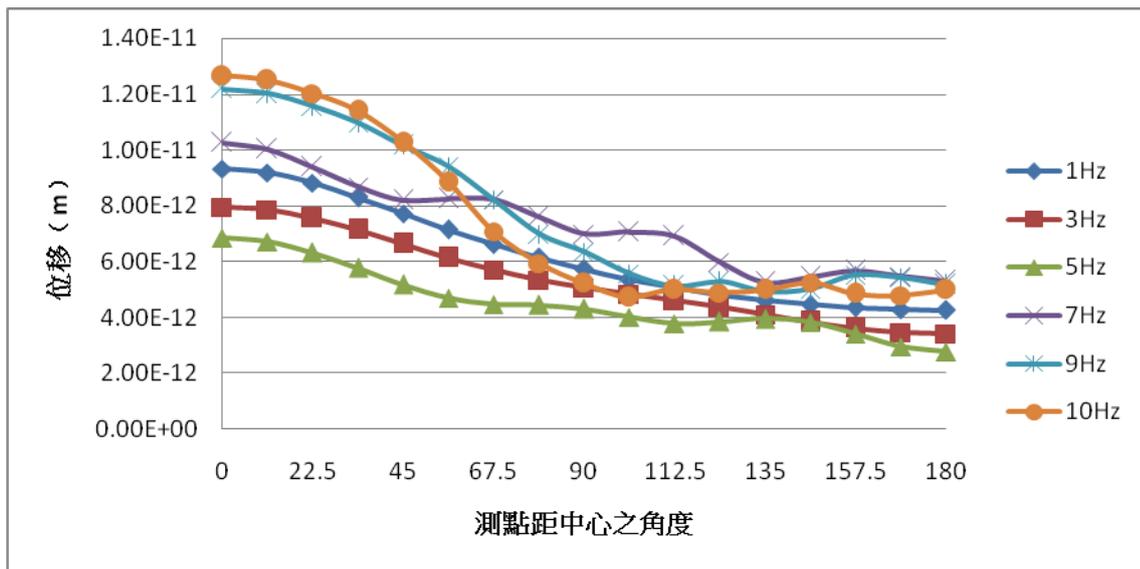


(a) 無放置屏蔽隧道區

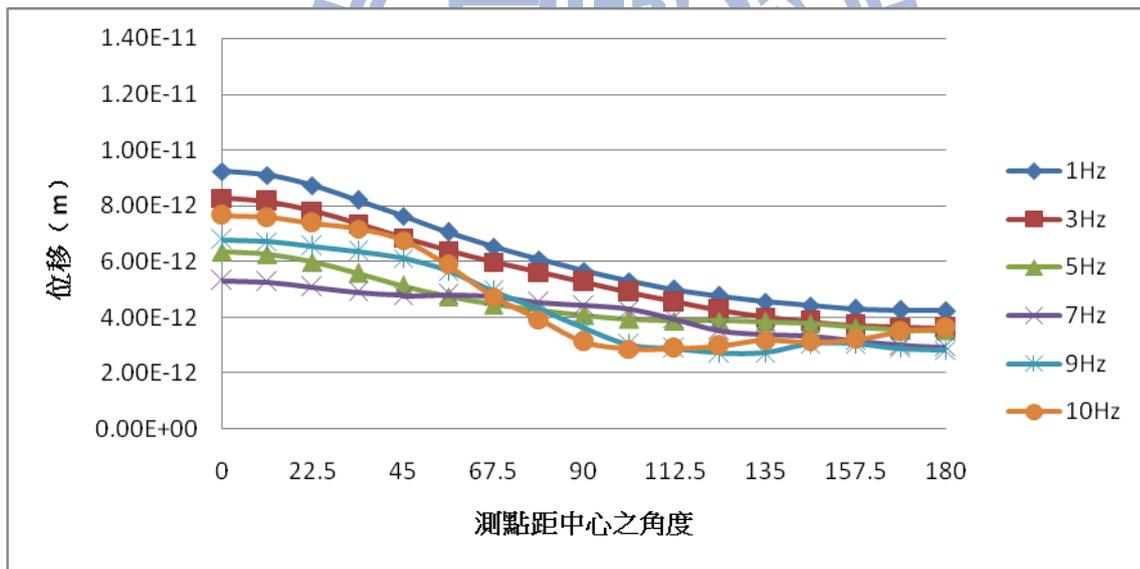


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.61 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_r)

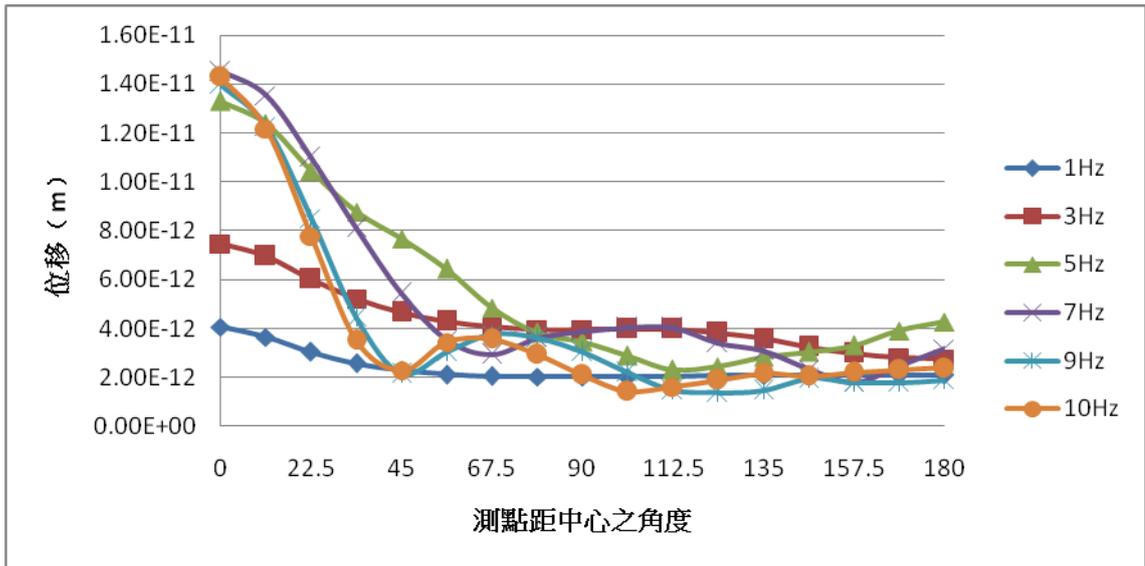


(a) 無放置屏蔽隧道區

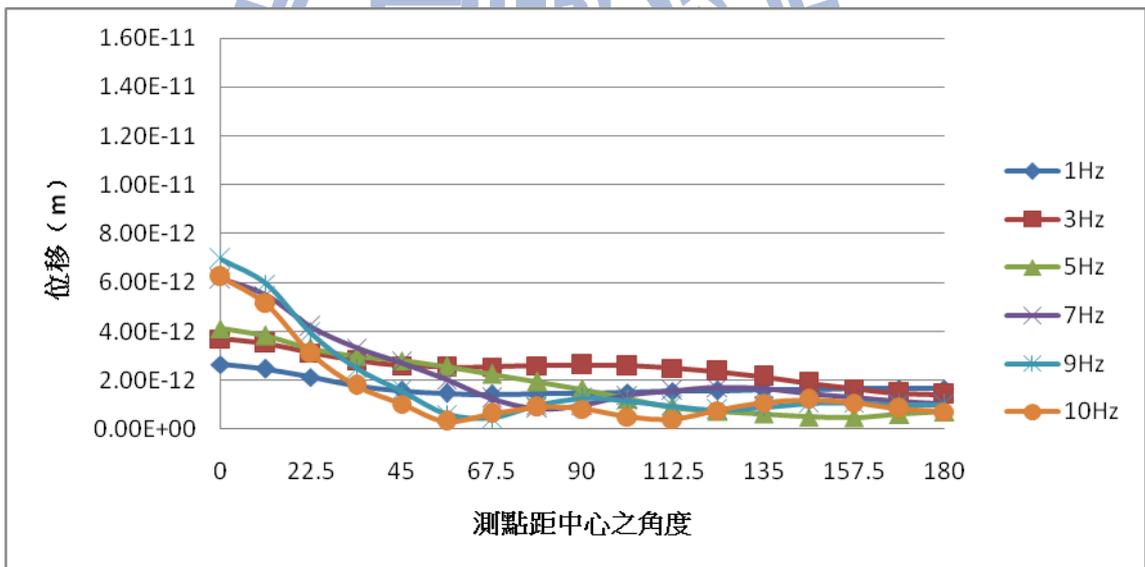


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.62 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 33m 之 U_z)

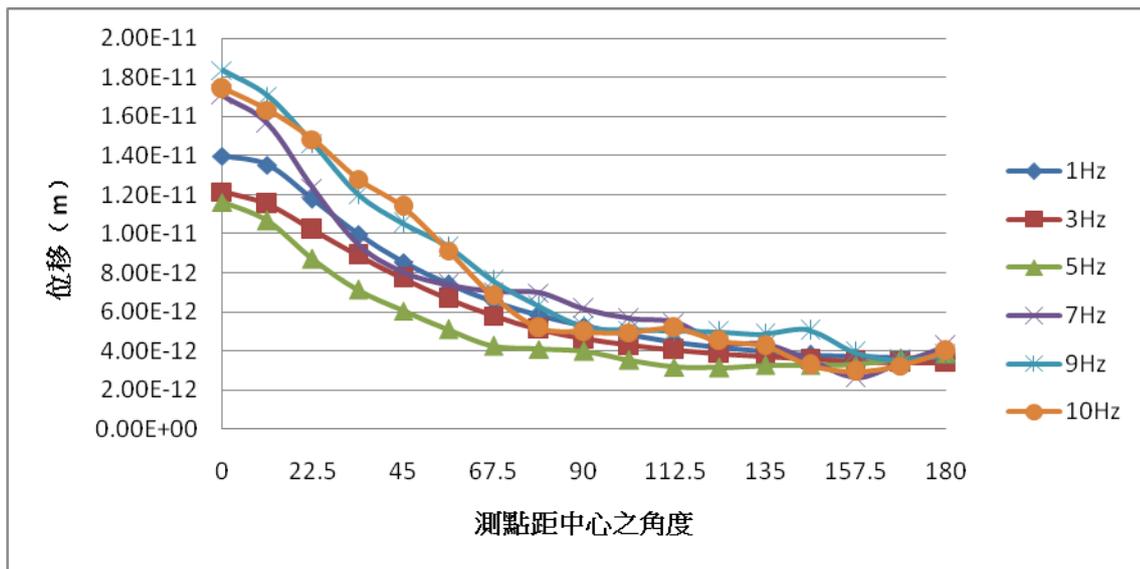


(a) 無放置屏蔽隧道區

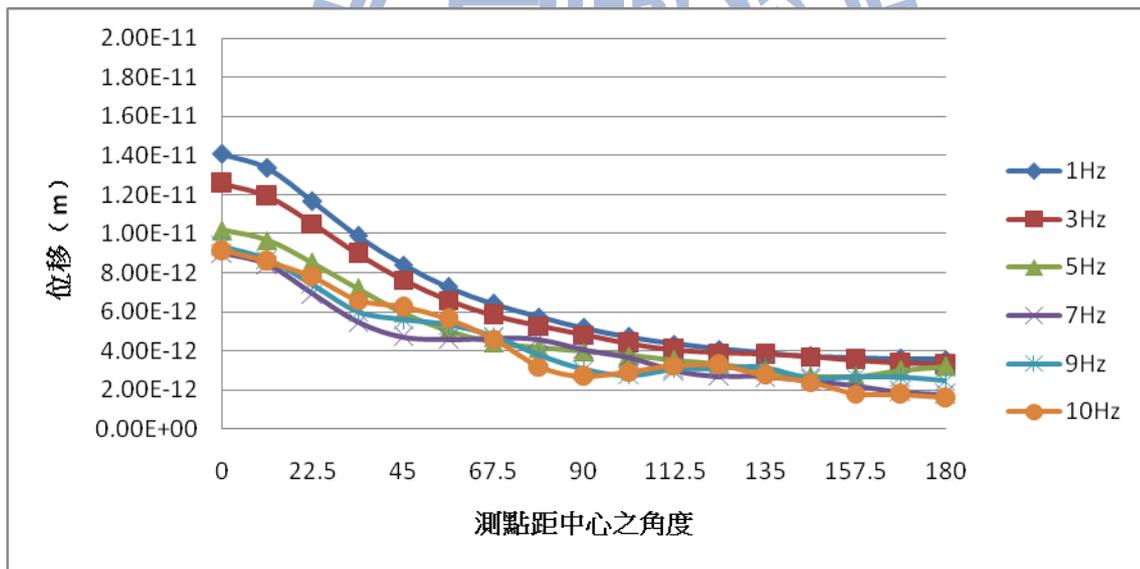


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.63 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_r)

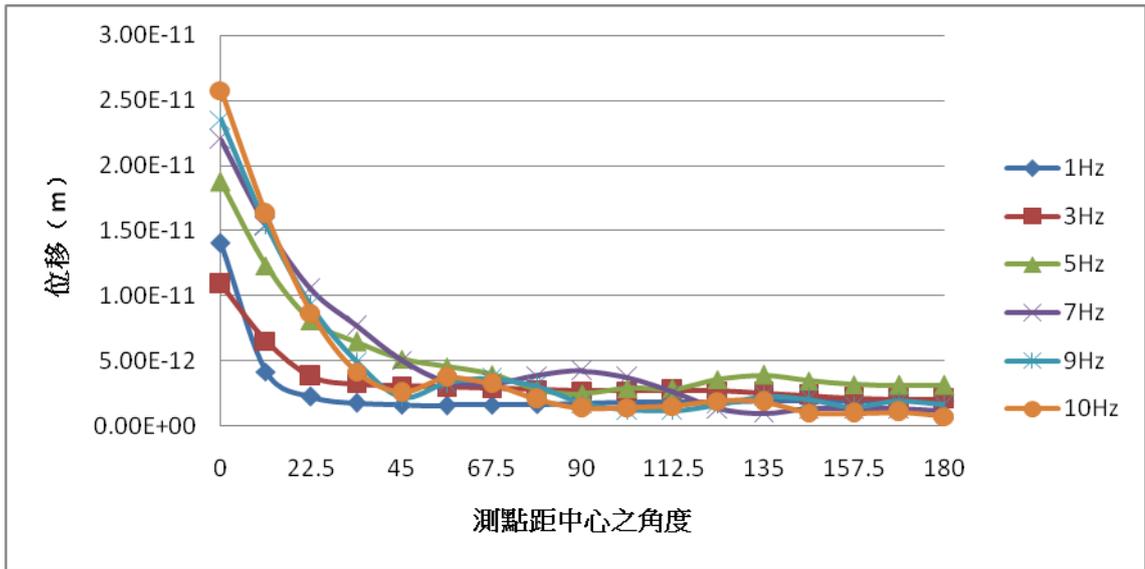


(a) 無放置屏蔽隧道區

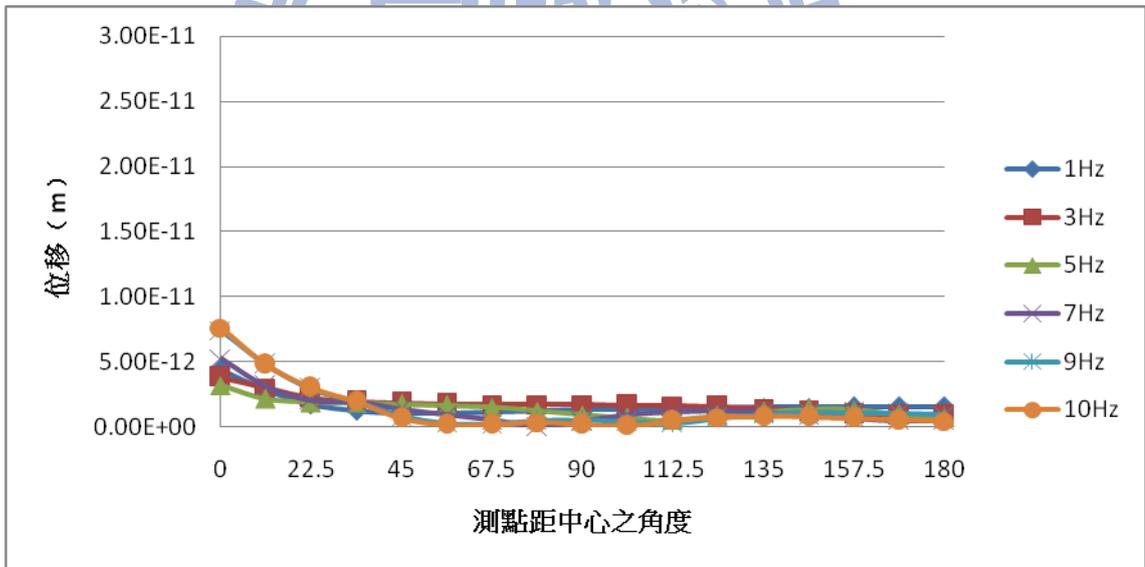


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.64 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 55m 之 U_z)

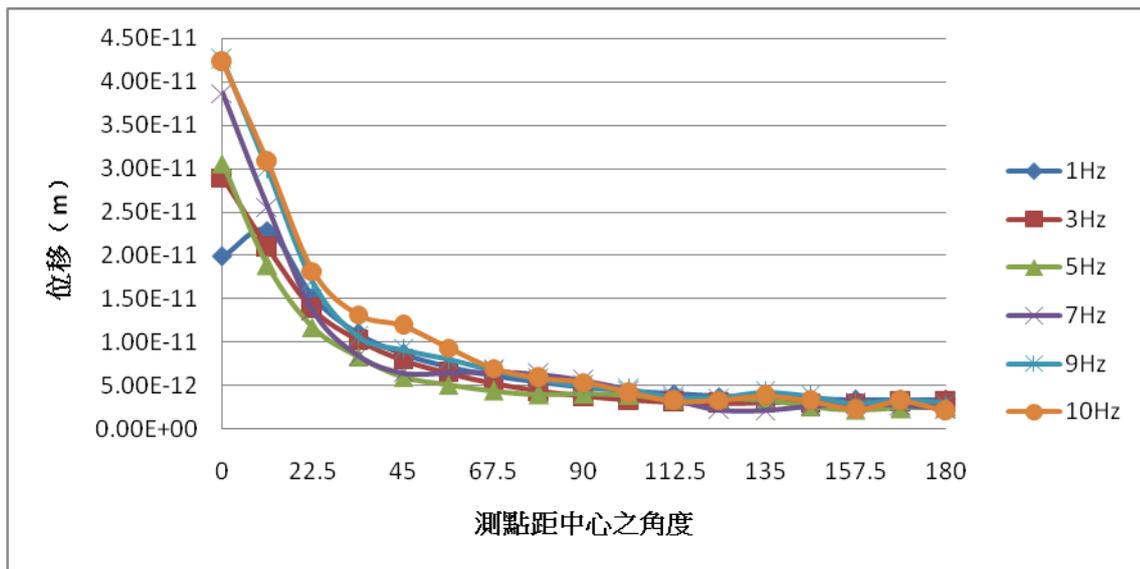


(a) 無放置屏蔽隧道區

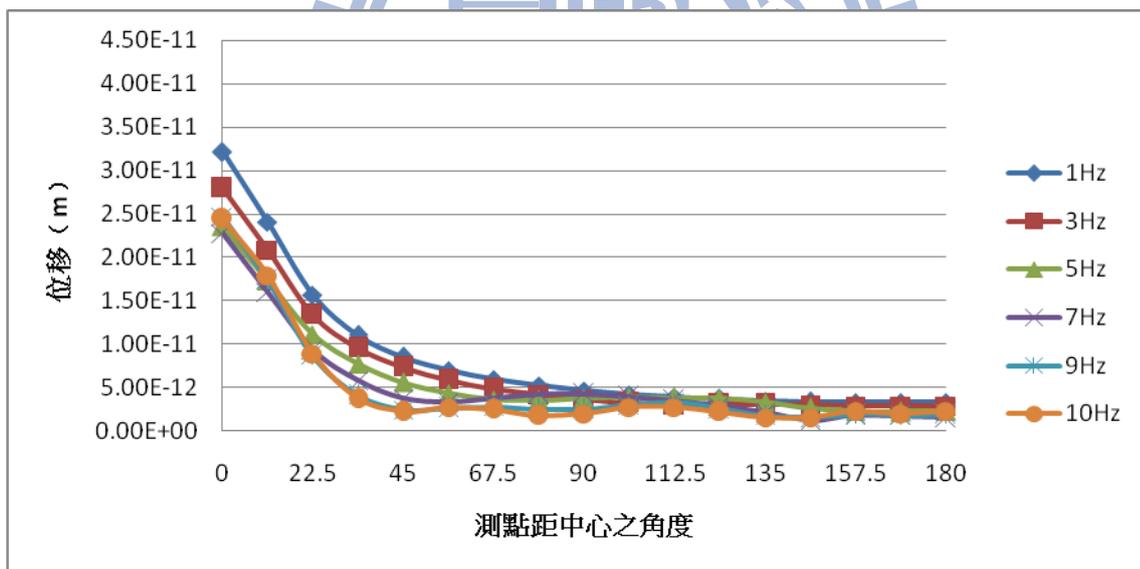


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.65 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_r)

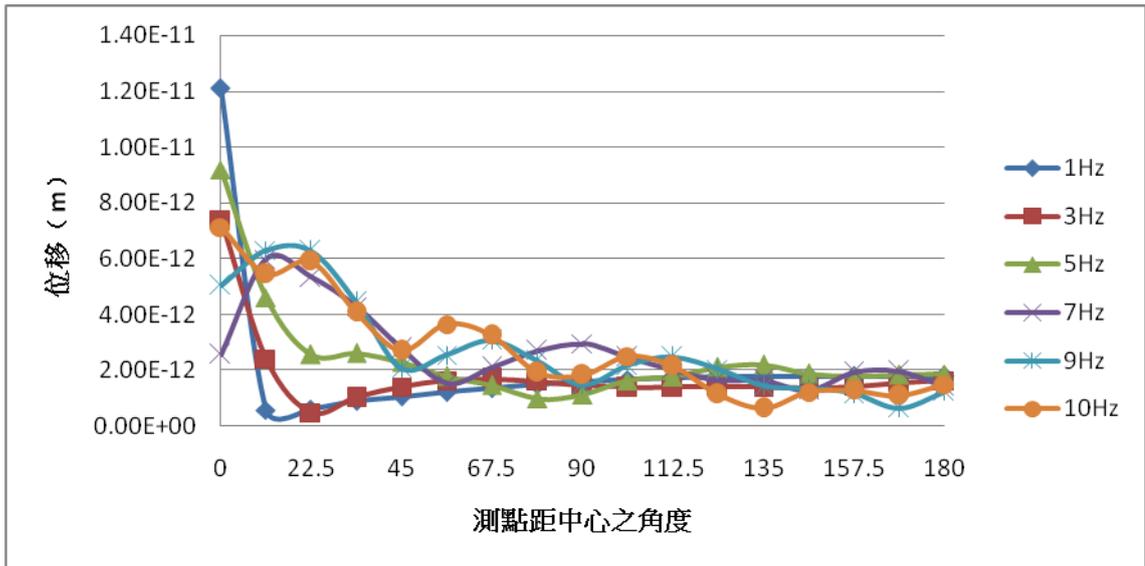


(a) 無放置屏蔽隧道區

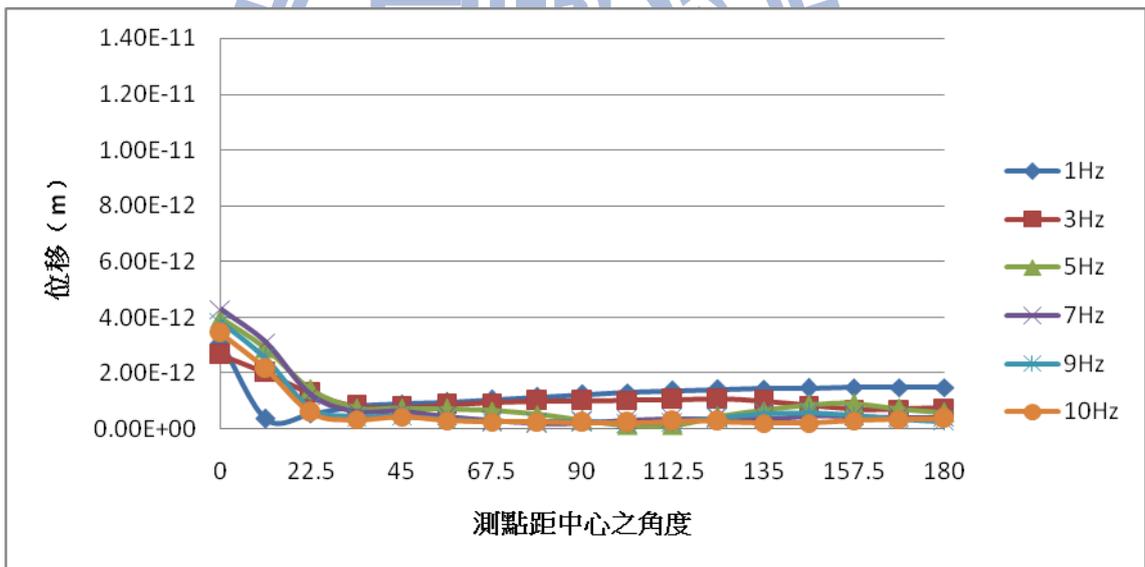


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.66 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 77m 之 U_z)

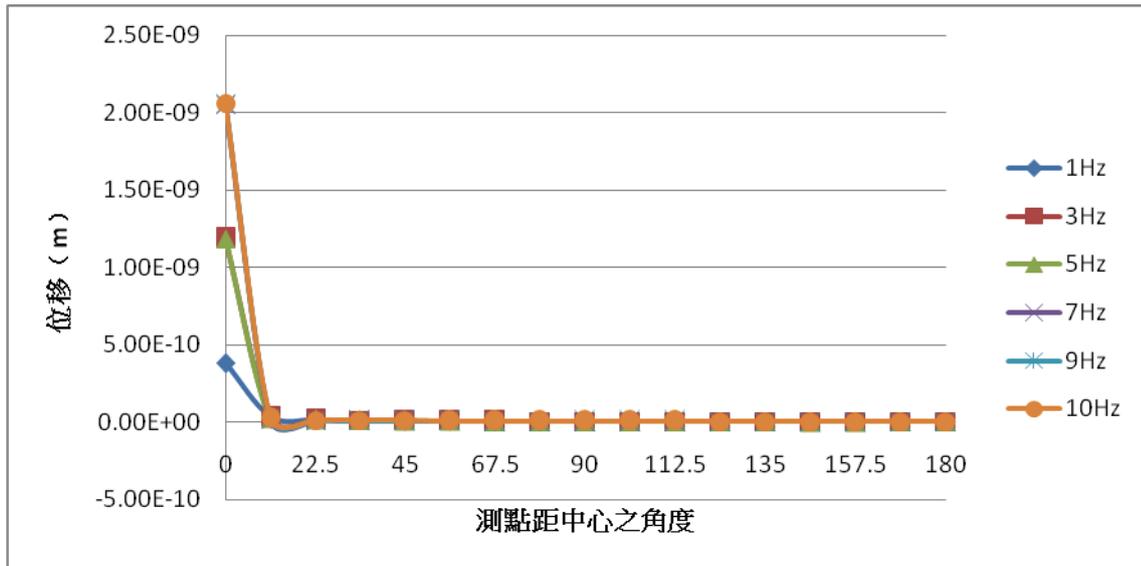


(a) 無放置屏蔽隧道區

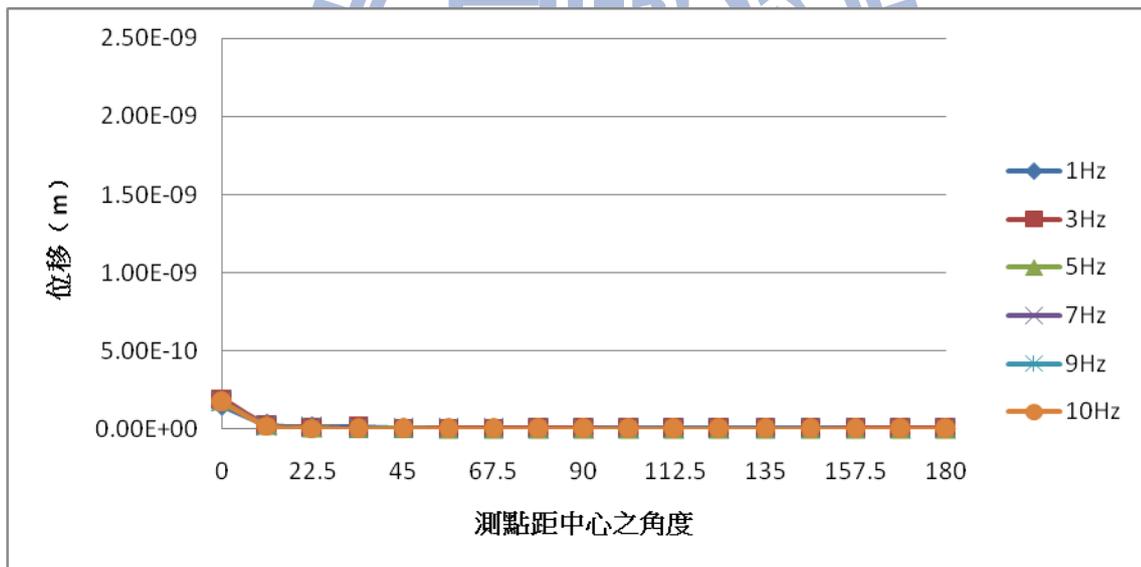


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.67 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_r)

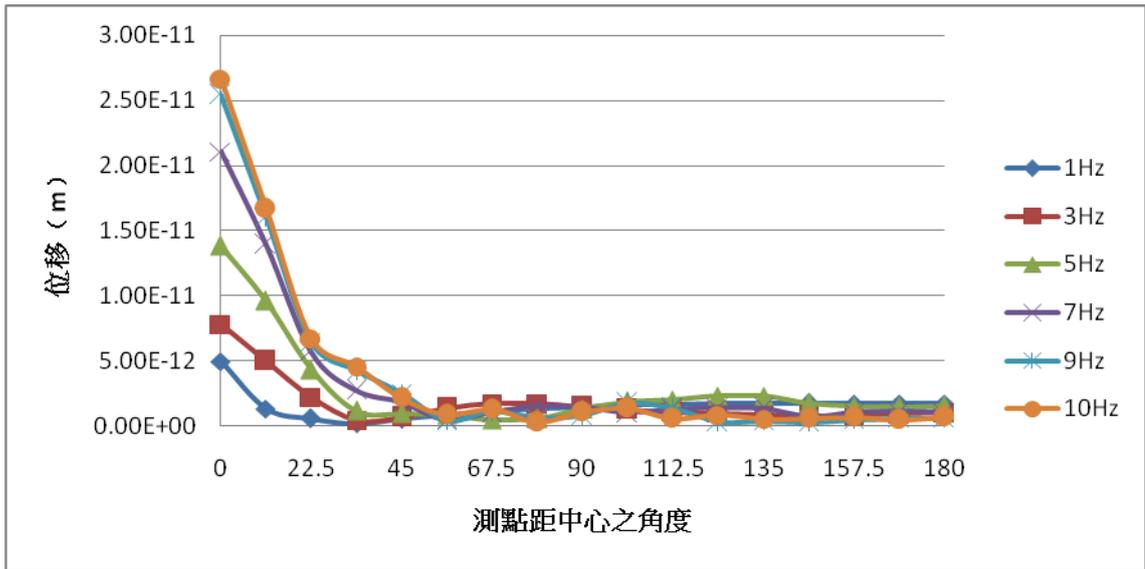


(a) 無放置屏蔽隧道區

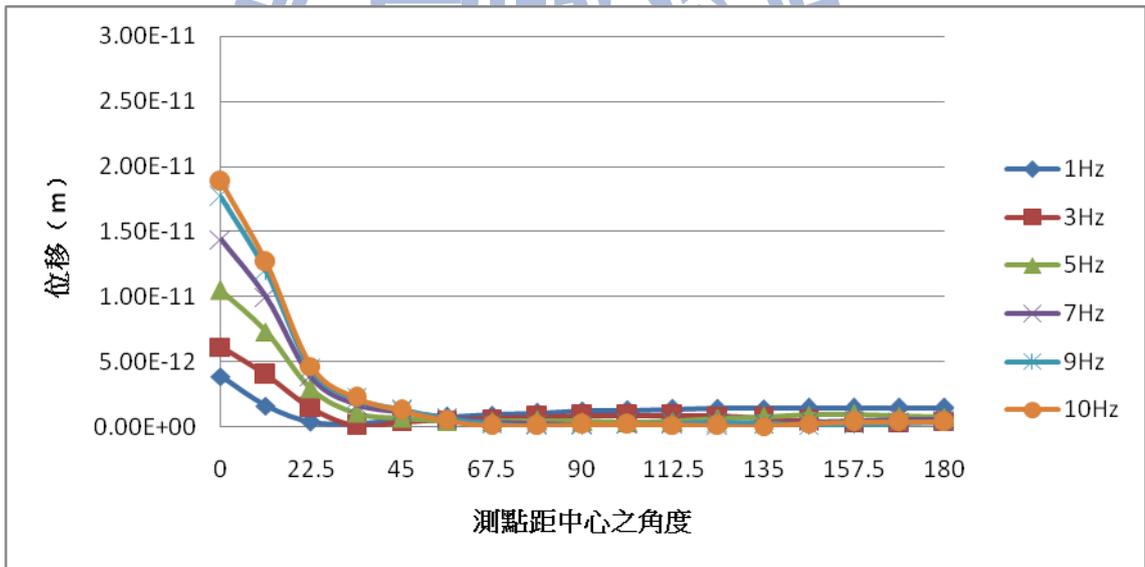


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.68 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 93.5m 之 U_z)

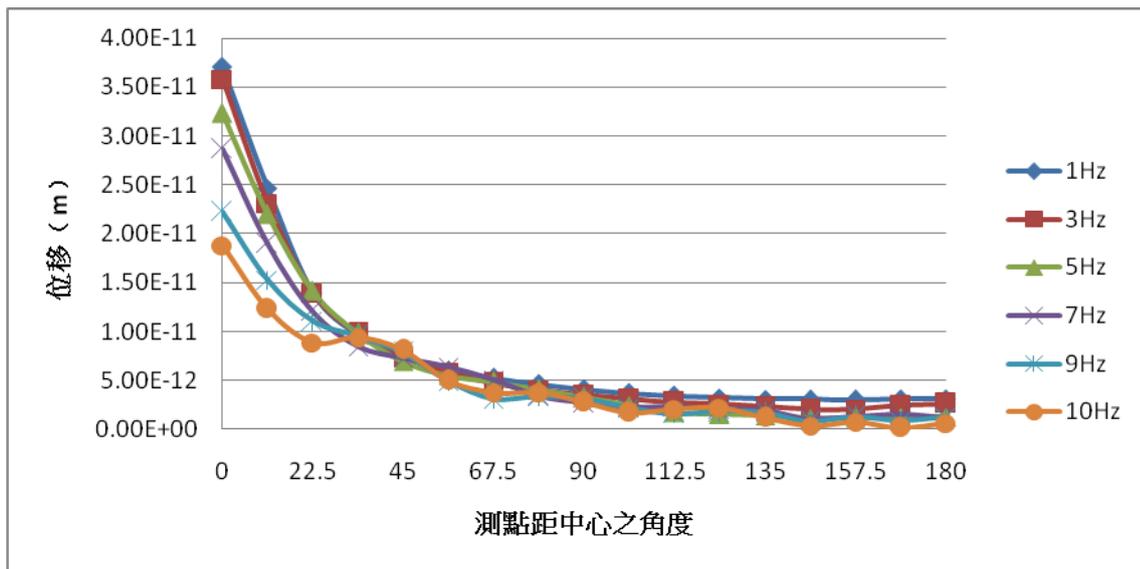


(a) 無放置屏蔽隧道區

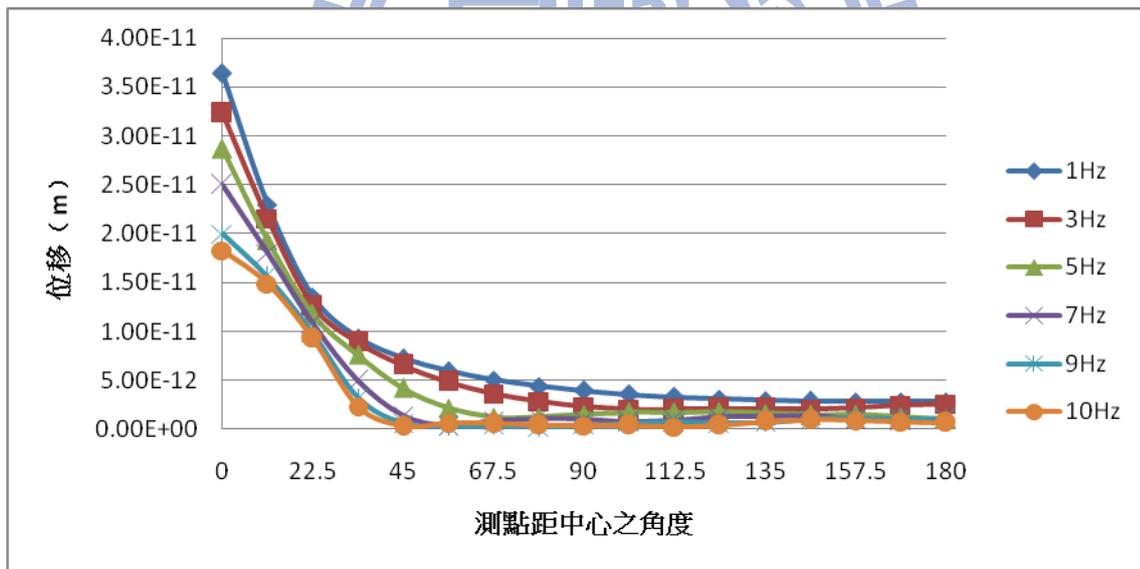


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.69 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_r)

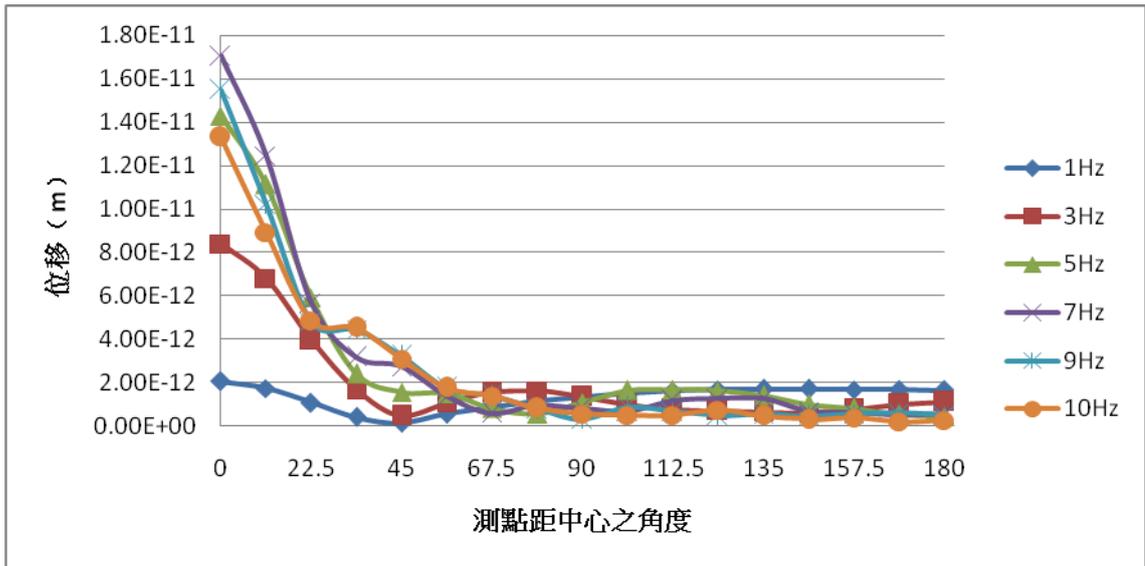


(a) 無放置屏蔽隧道區

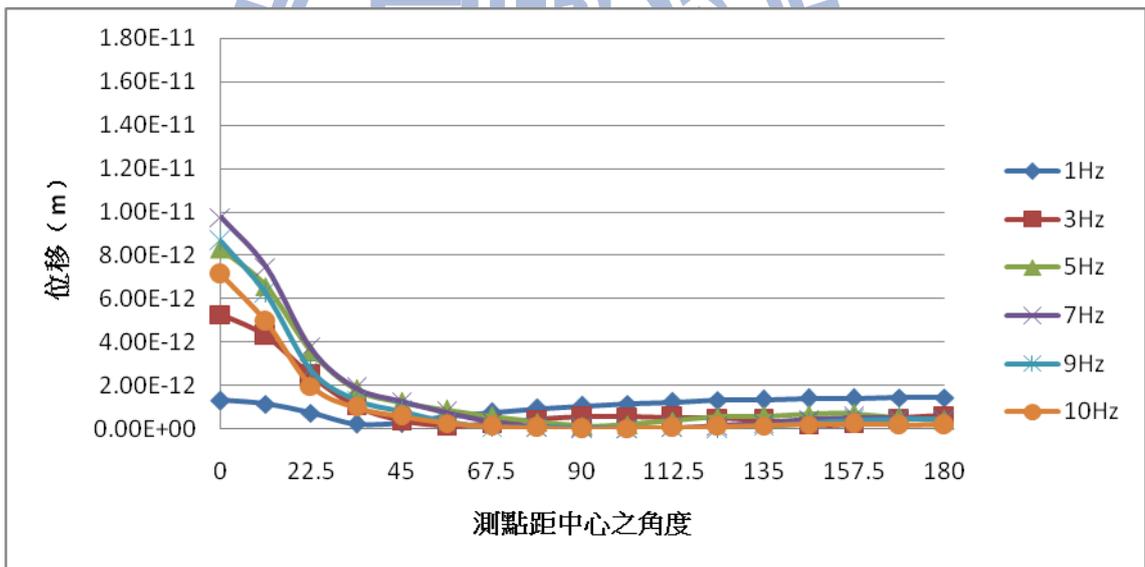


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.70 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 110m 之 U_z)

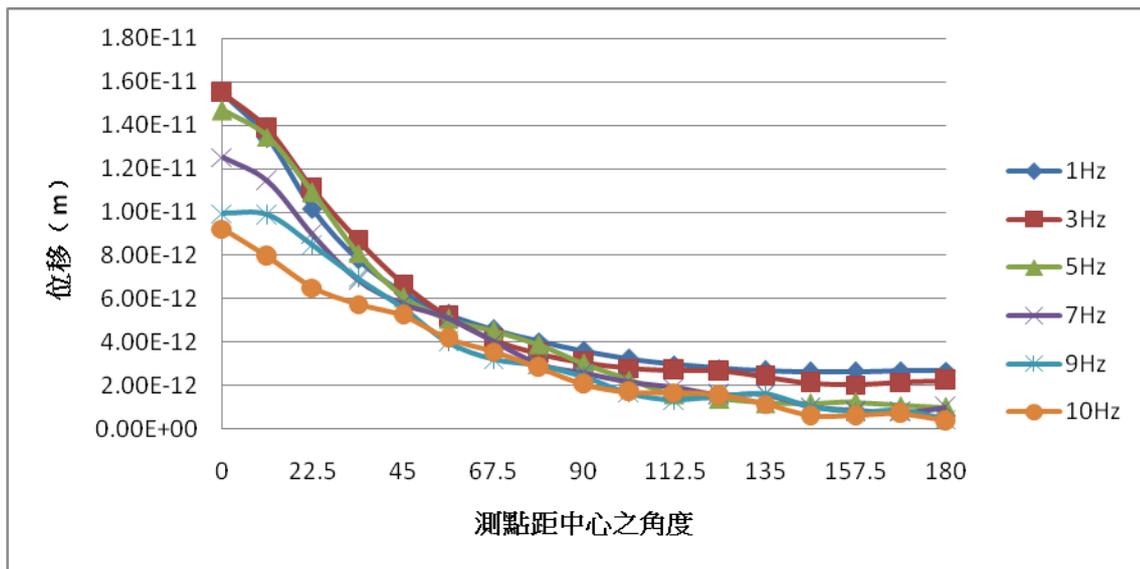


(a) 無放置屏蔽隧道區

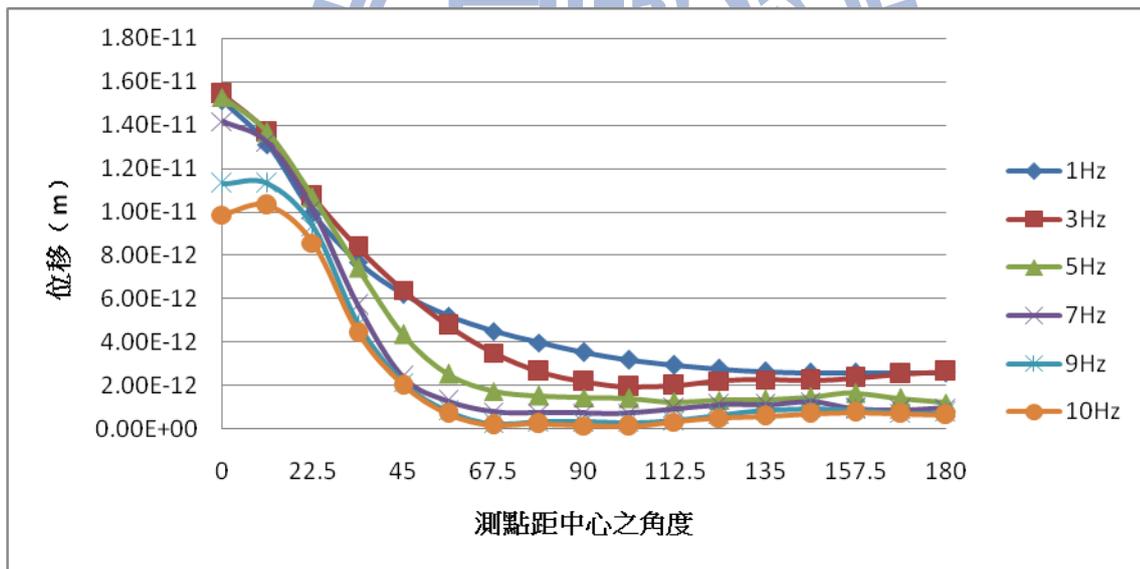


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.71 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_r)

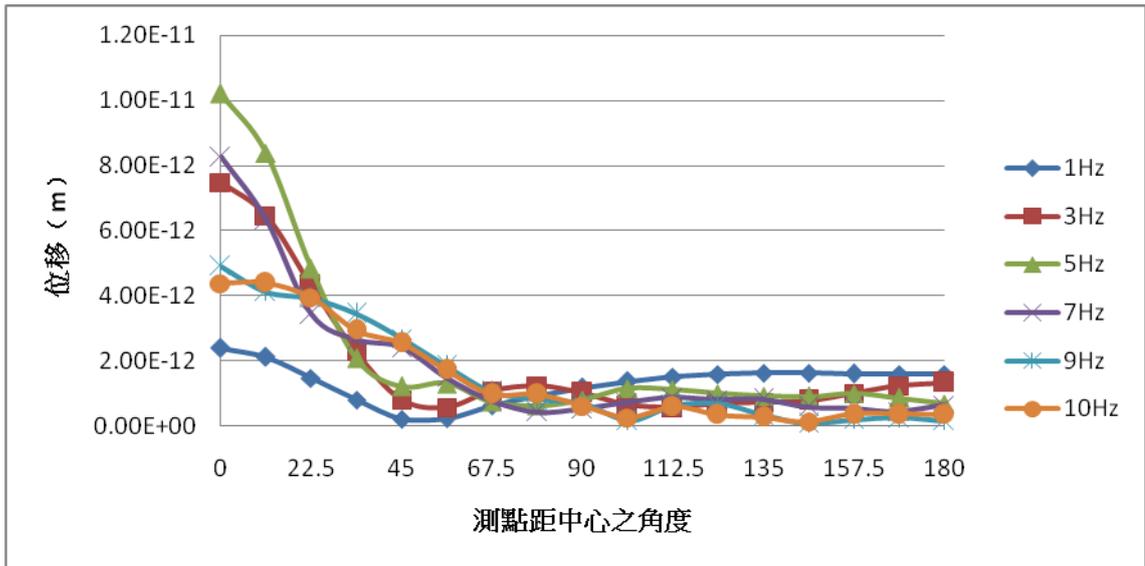


(a) 無放置屏蔽隧道區

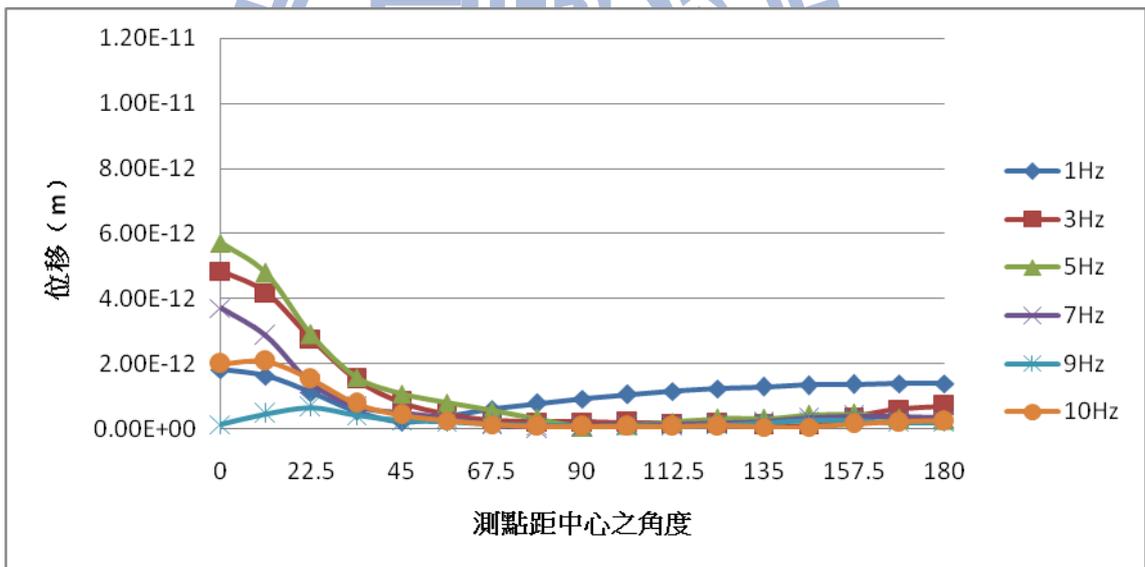


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.72 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 132m 之 U_z)

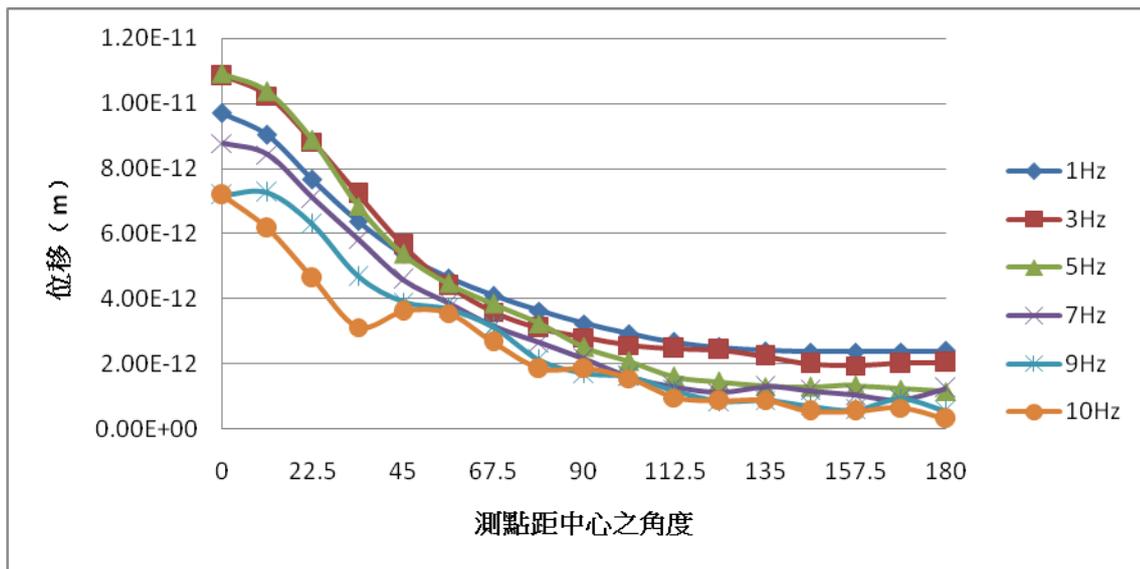


(a) 無放置屏蔽隧道區

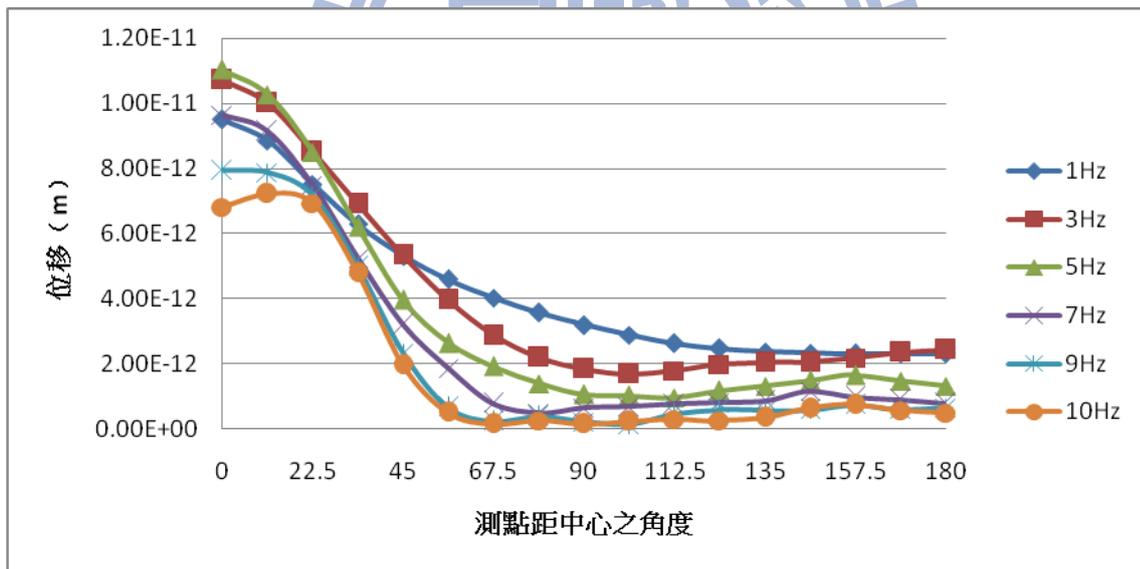


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.73 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_r)

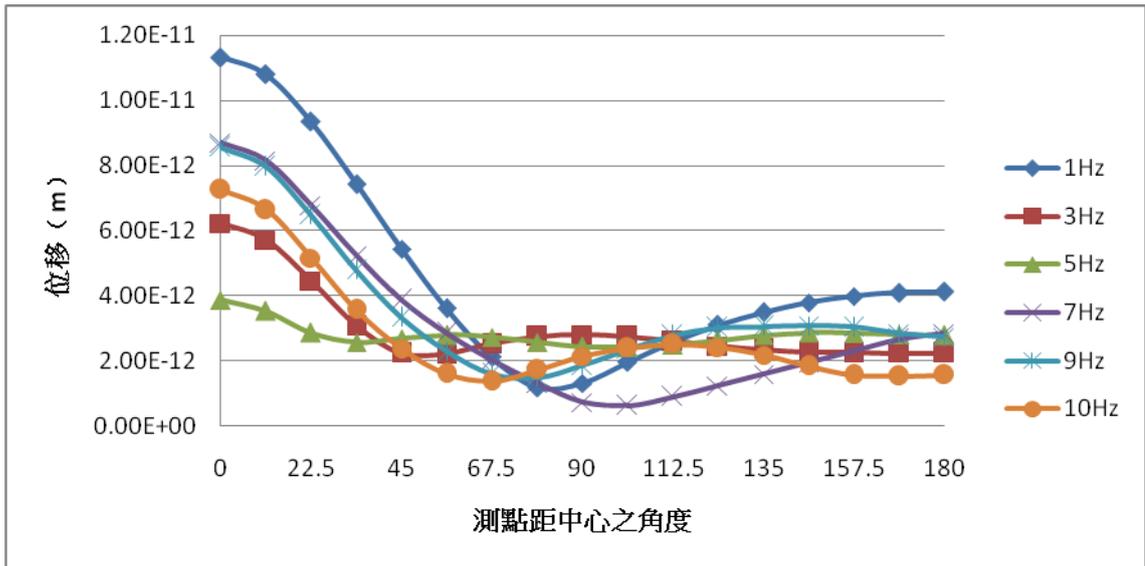


(a) 無放置屏蔽隧道區

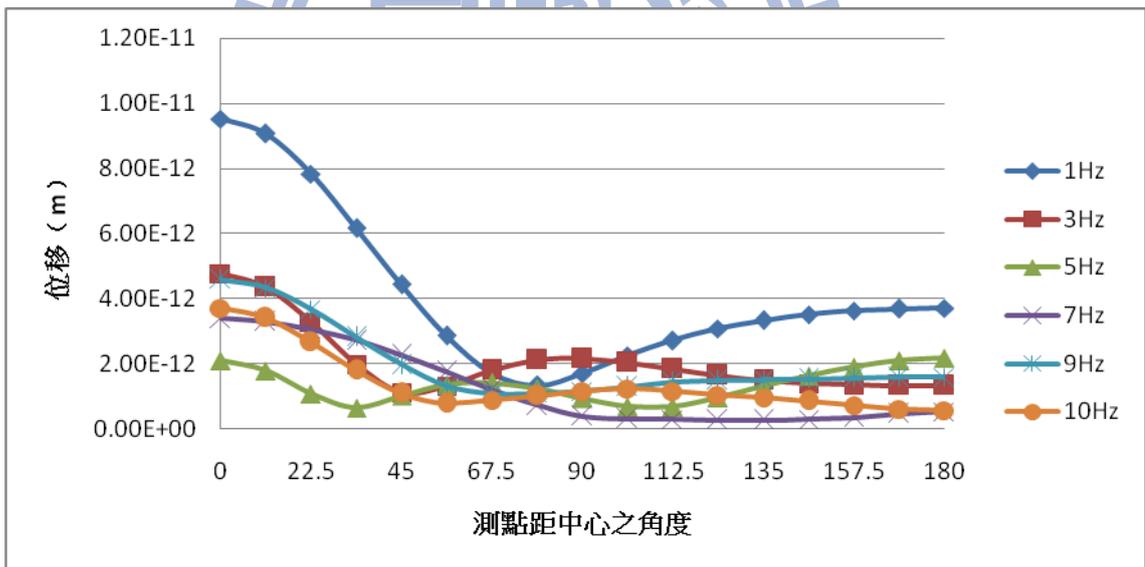


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.74 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向施力點距中心 154m 之 U_z)

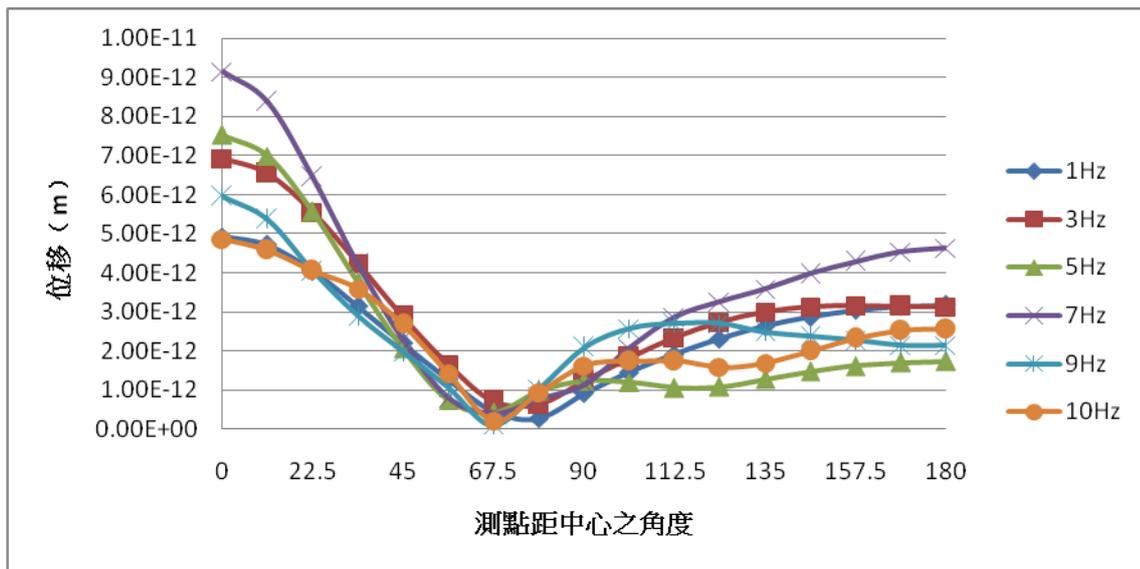


(a) 無放置屏蔽隧道區

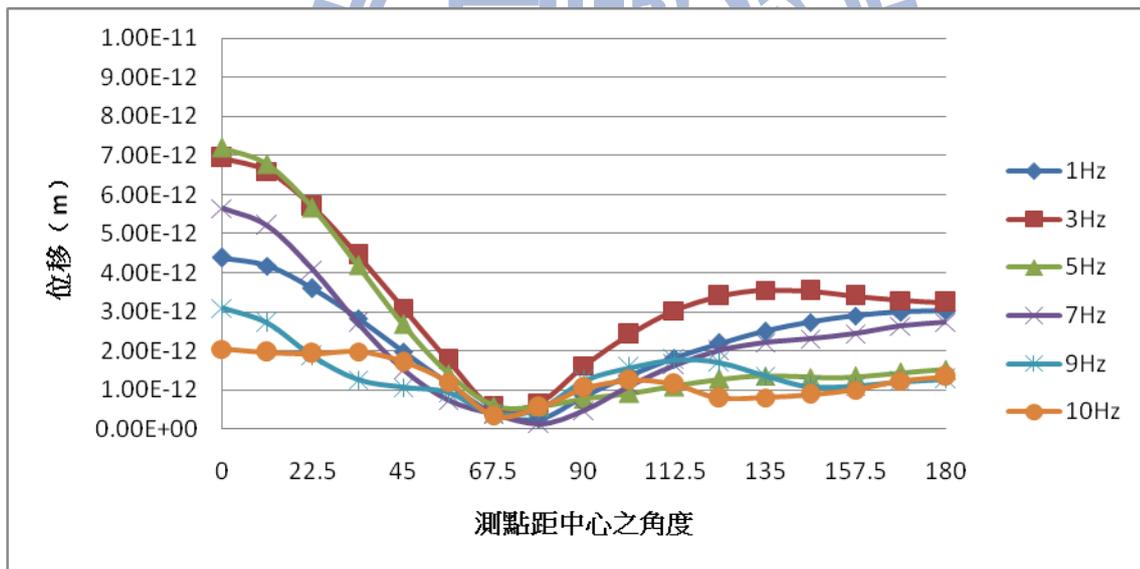


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.75 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 33m 之 U_r)

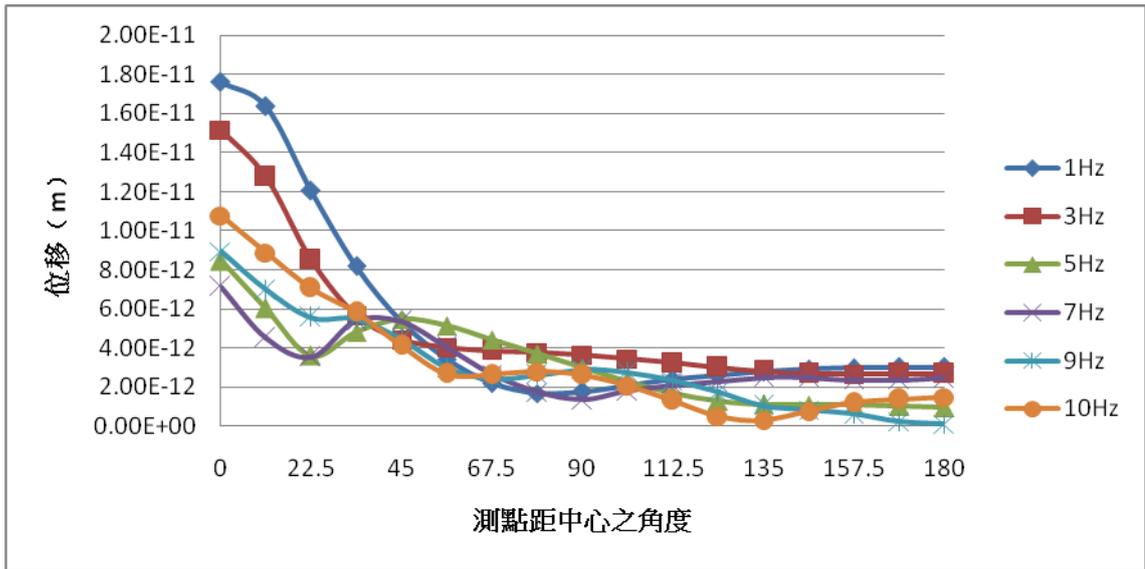


(a) 無放置屏蔽隧道區

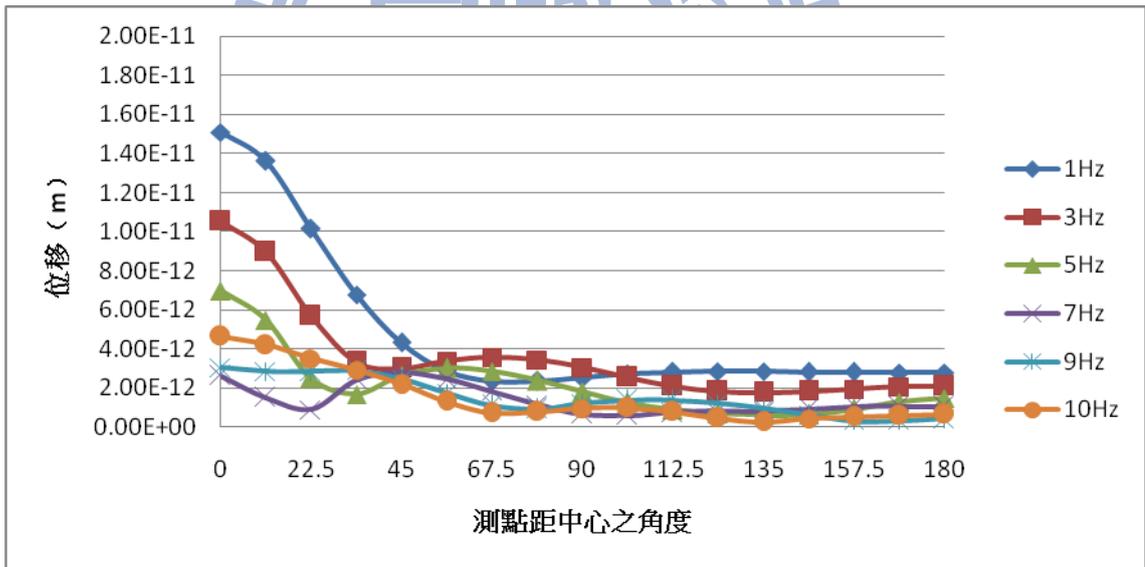


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.76 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 33m 之 U_z)

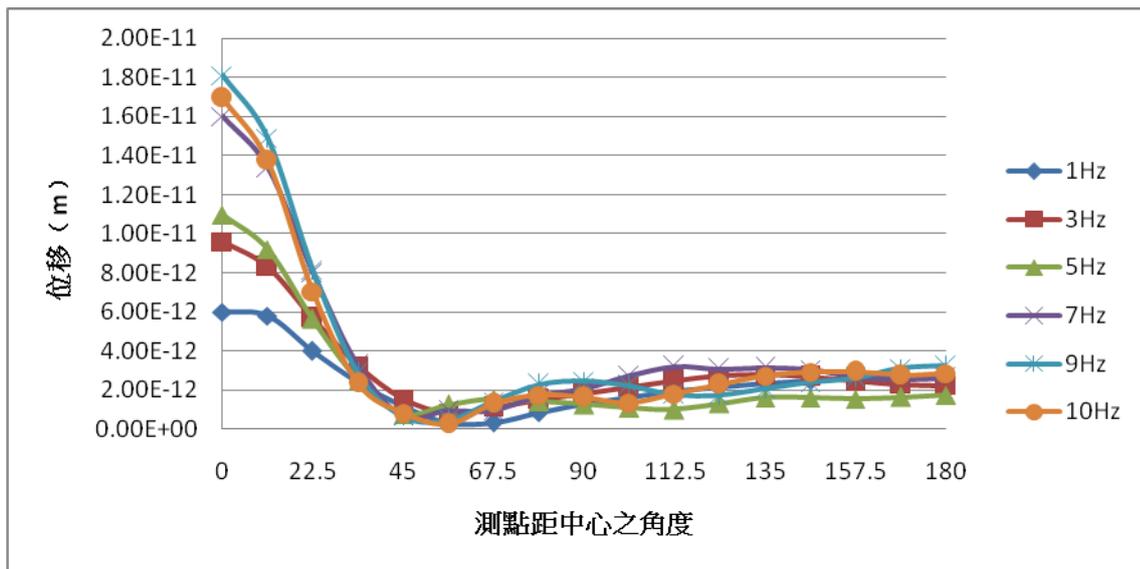


(a) 無放置屏蔽隧道區

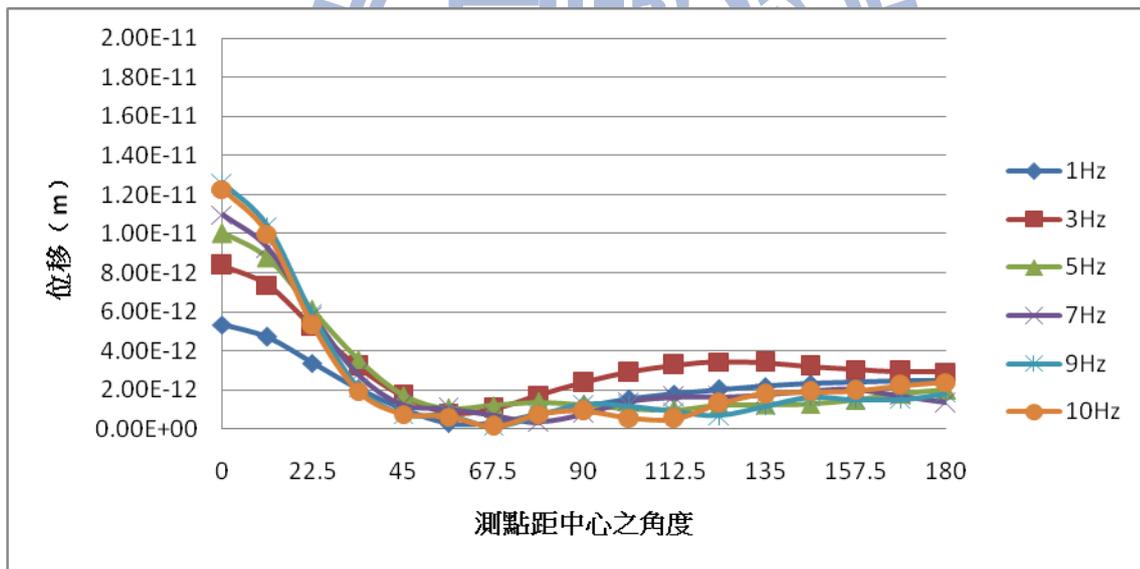


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.77 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 55m 之 U_r)

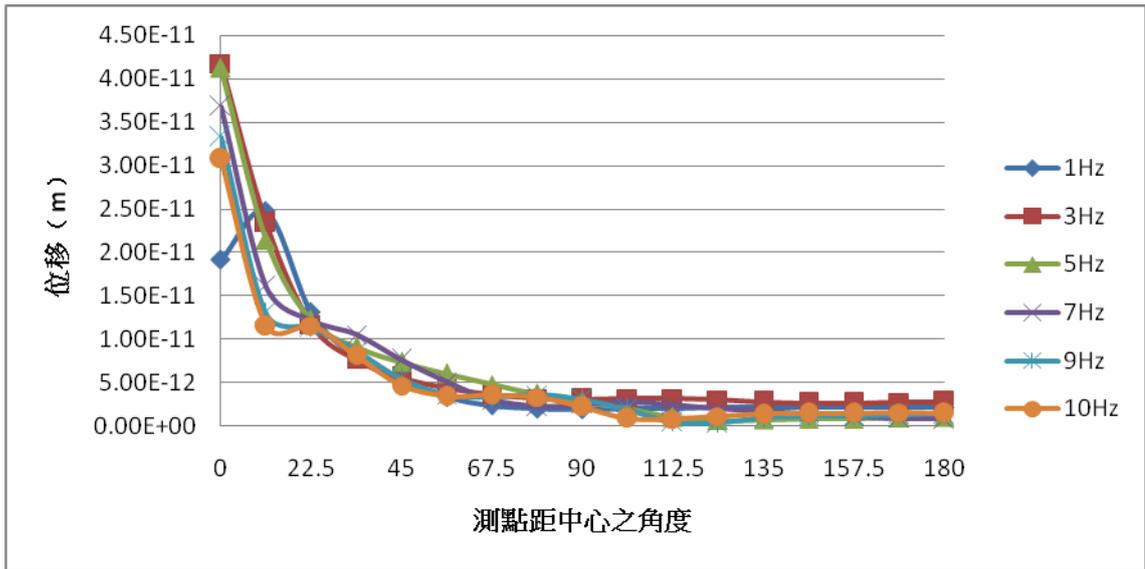


(a) 無放置屏蔽隧道區

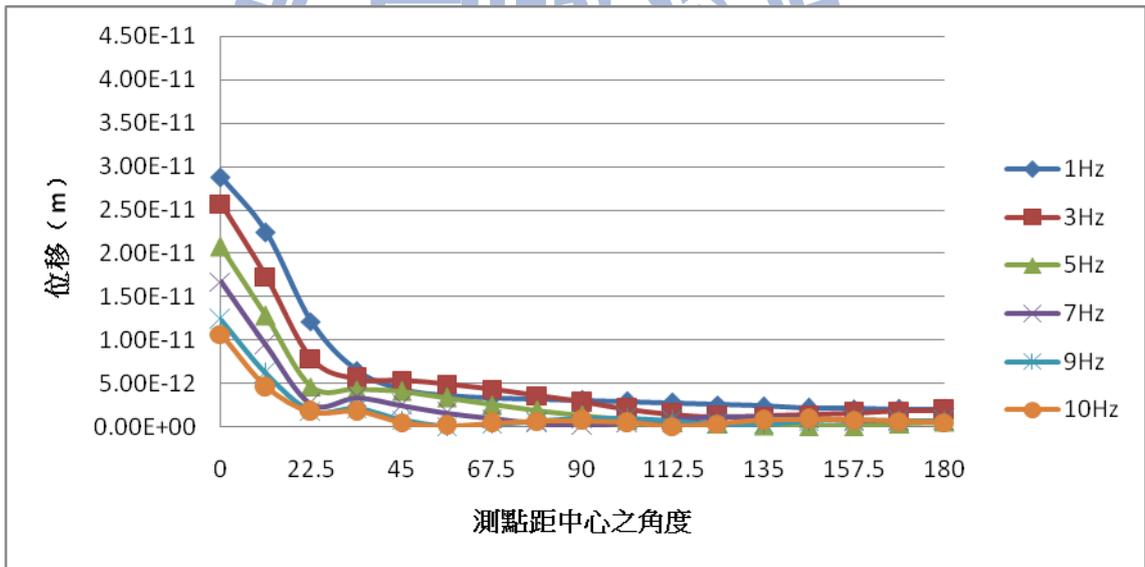


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.78 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 55m 之 U_z)

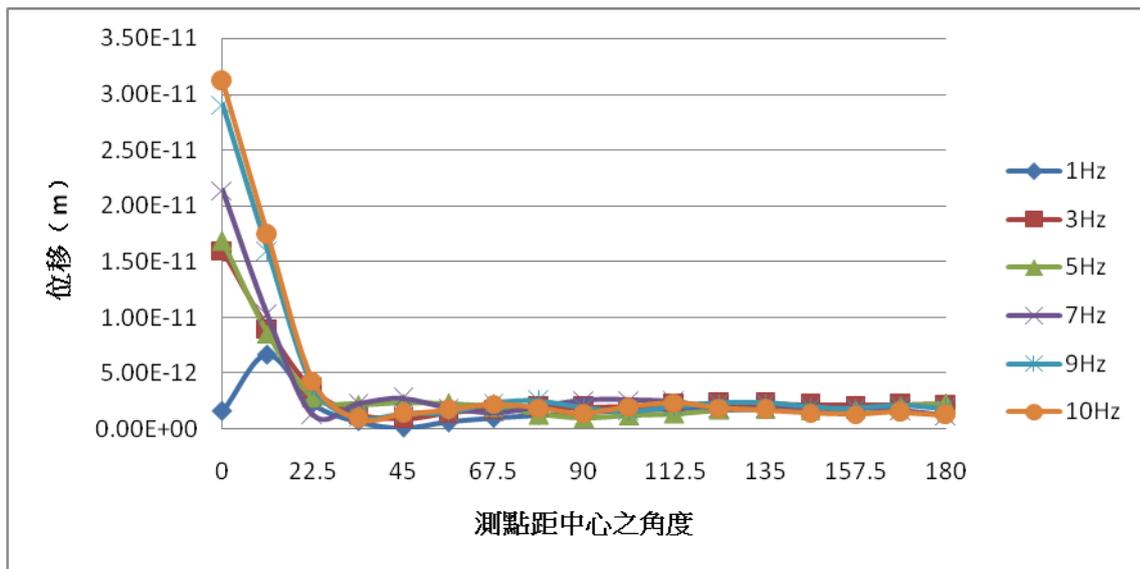


(a) 無放置屏蔽隧道區

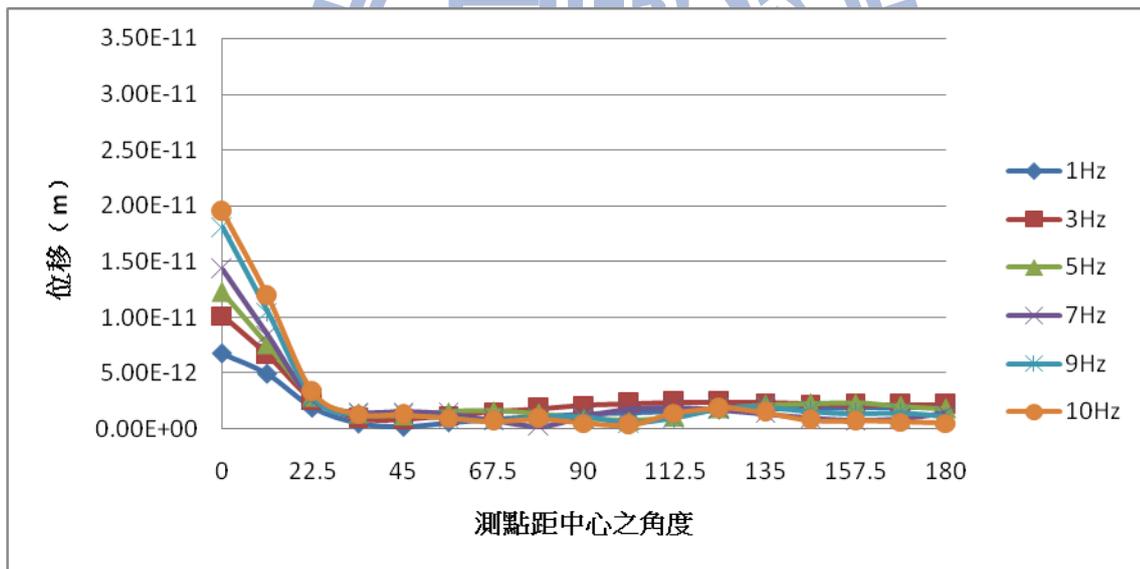


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.79 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 77m 之 U_r)

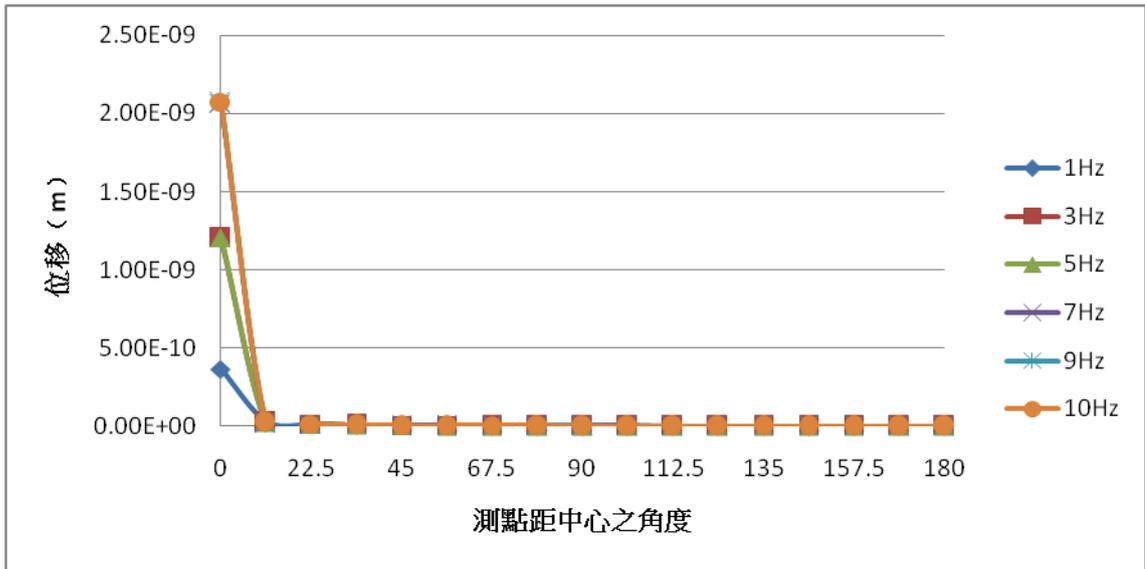


(a) 無放置屏蔽隧道區

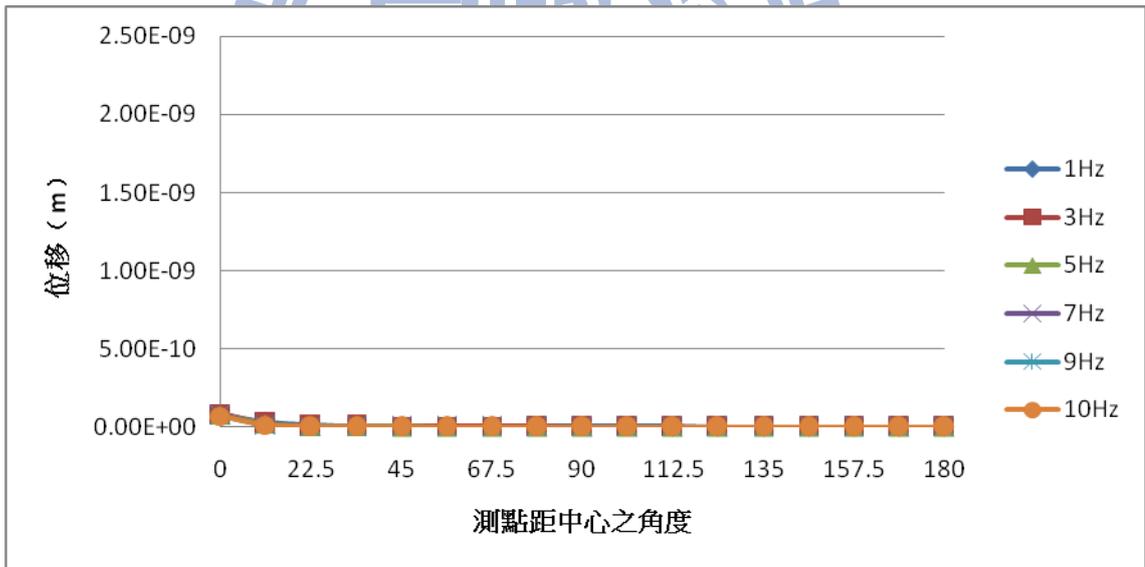


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.80 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 77m 之 U_z)

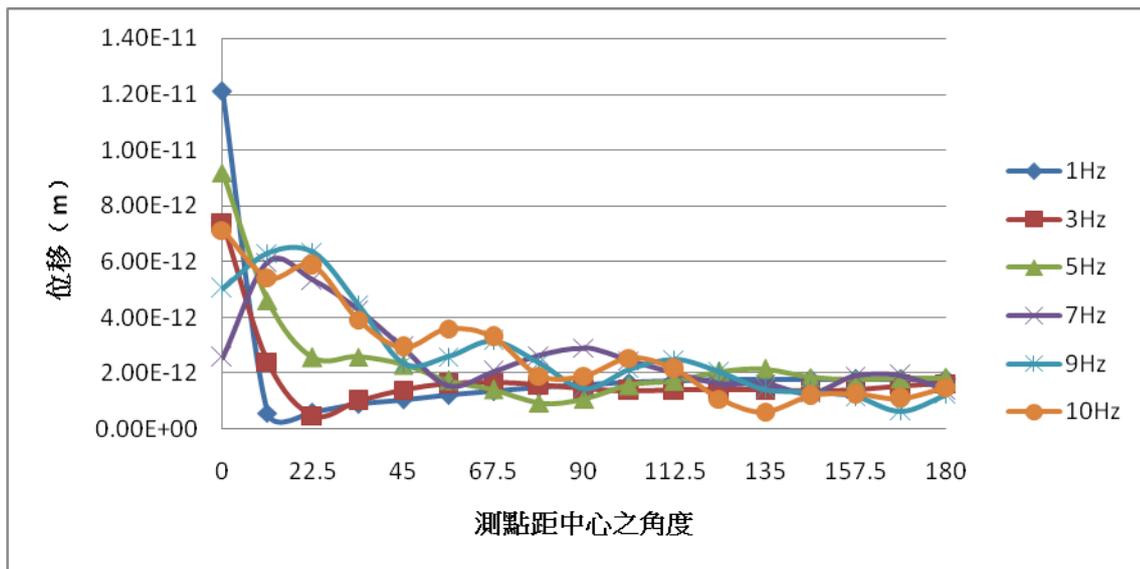


(a) 無放置屏蔽隧道區

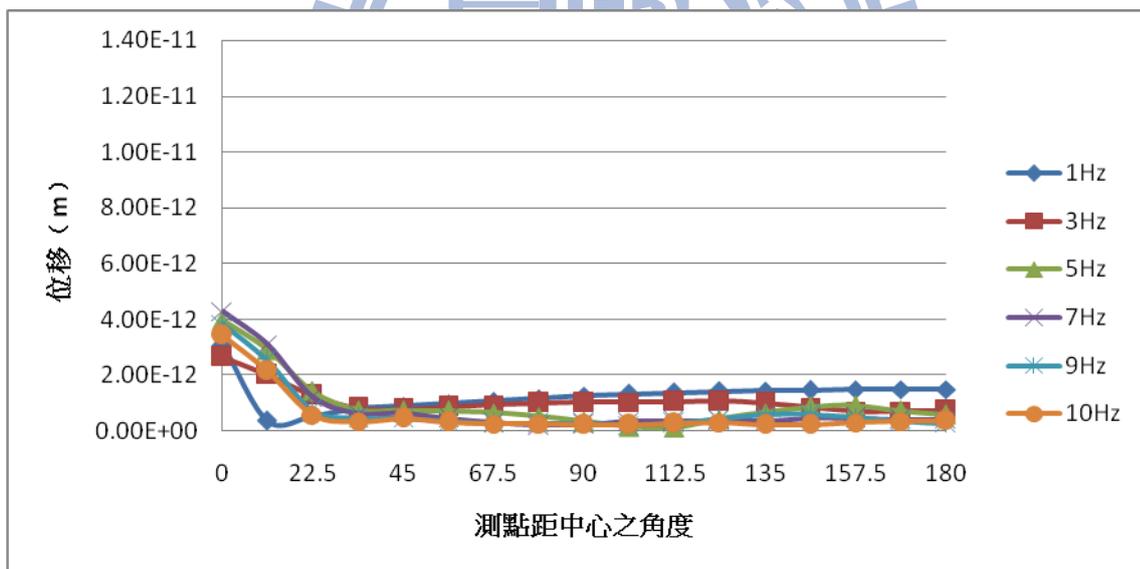


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.81 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_r)

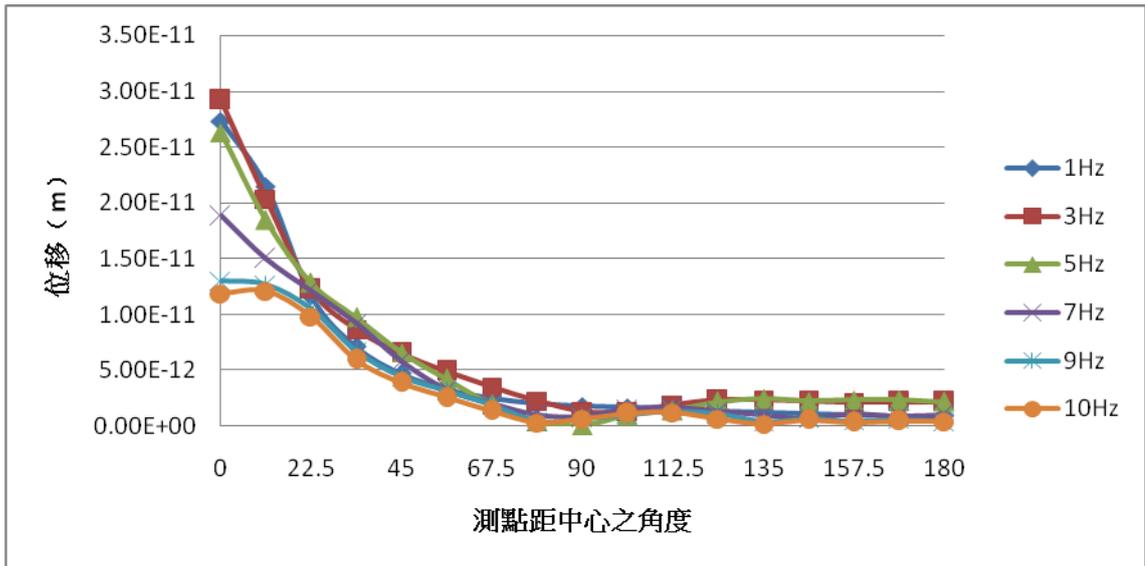


(a) 無放置屏蔽隧道區

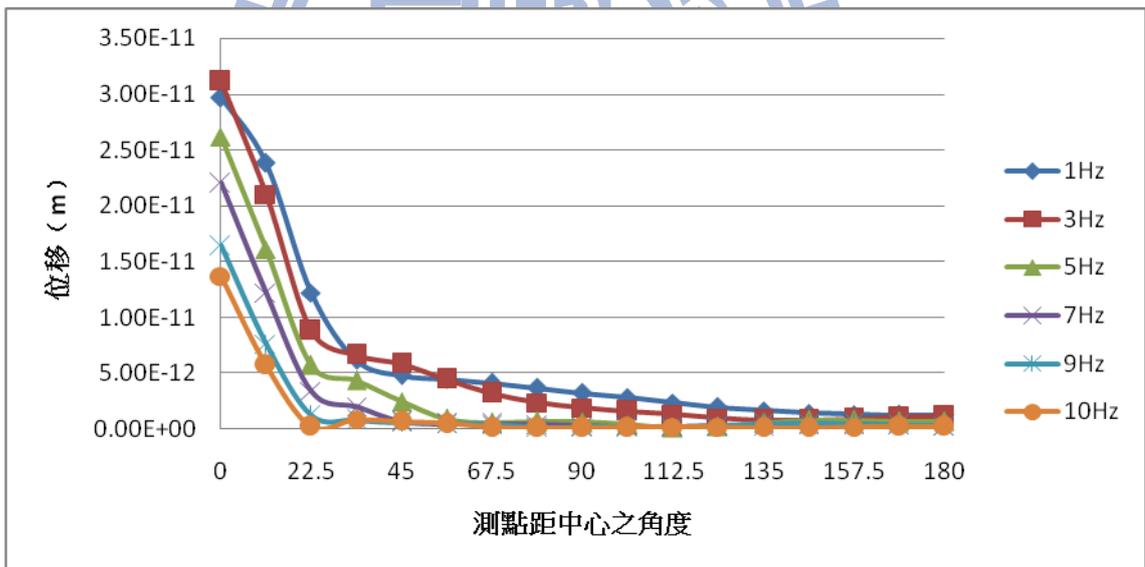


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.82 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 93.5m 之 U_z)

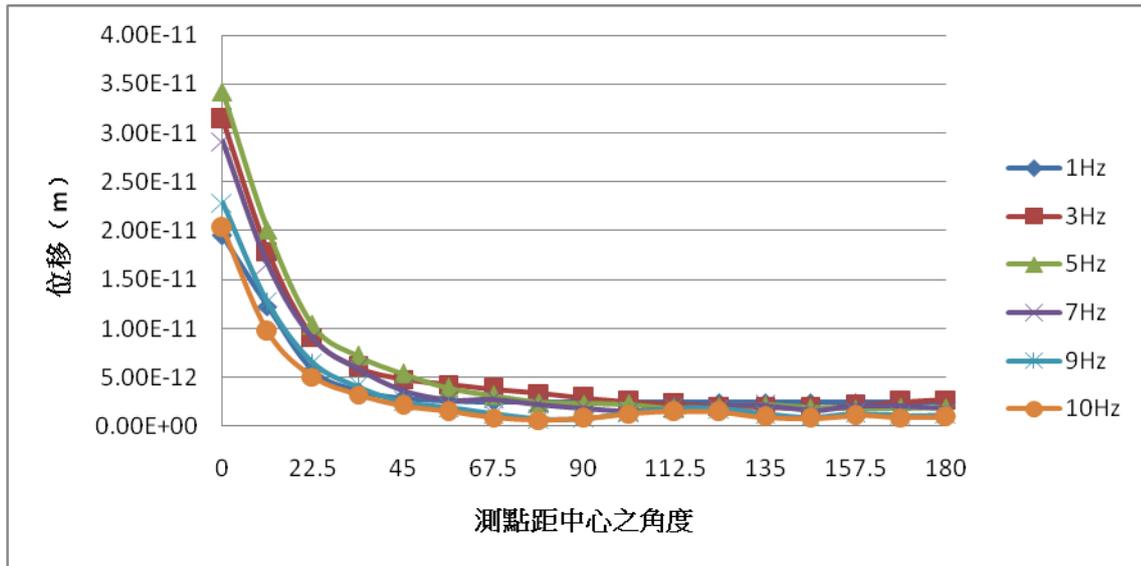


(a) 無放置屏蔽隧道區

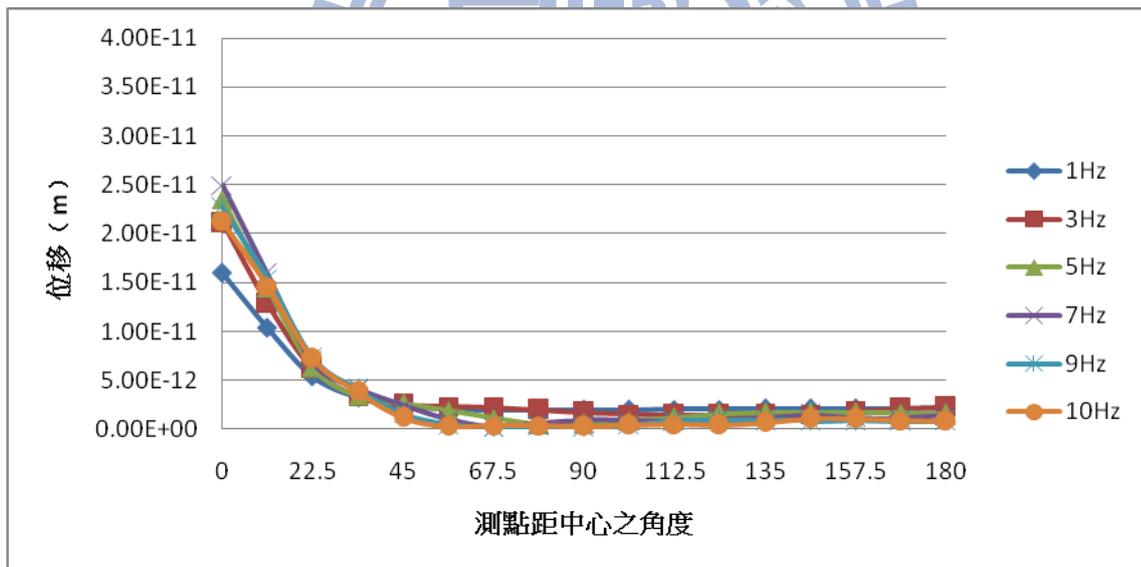


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.83 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 110m 之 U_r)

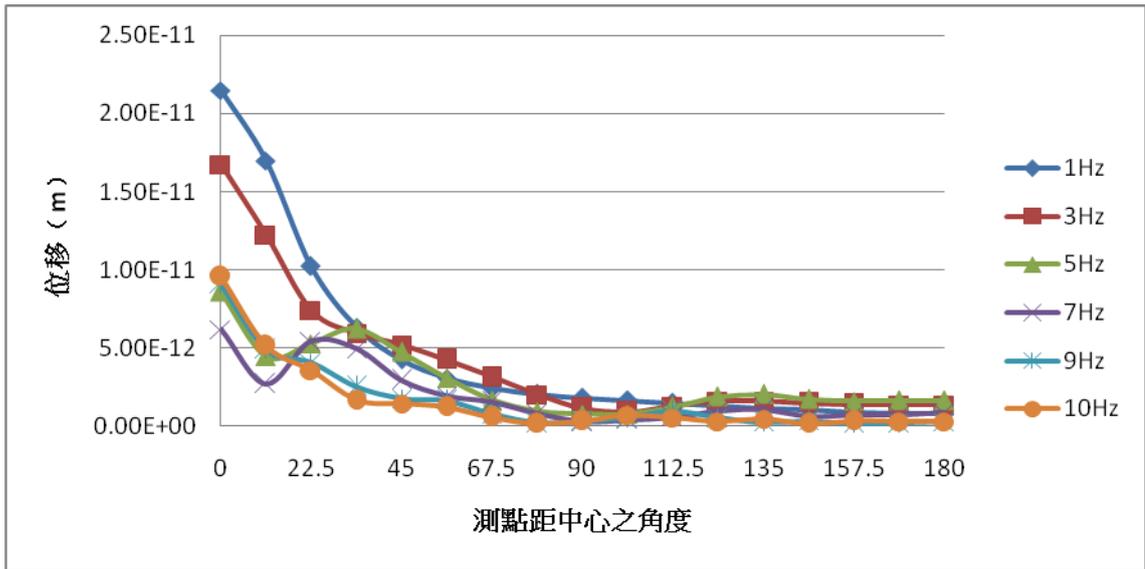


(a) 無放置屏蔽隧道區

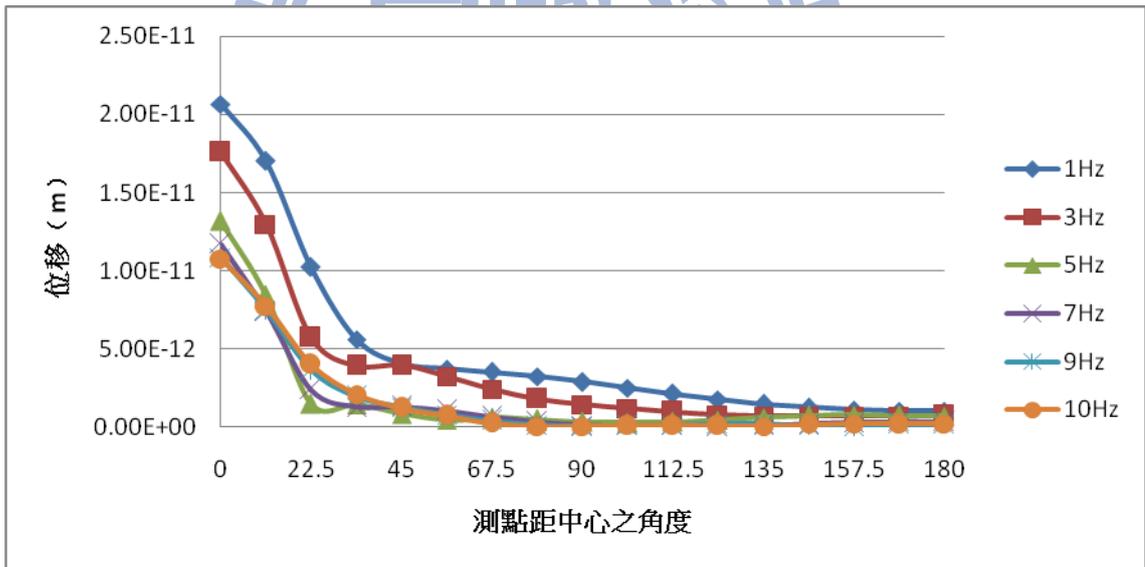


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.84 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 110m 之 U_z)

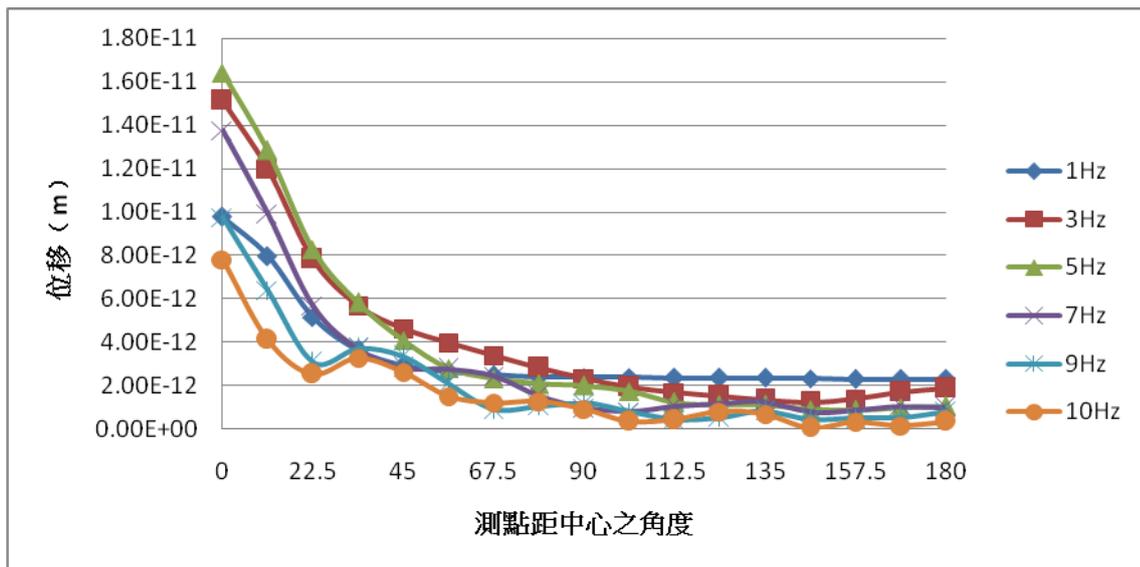


(a) 無放置屏蔽隧道區

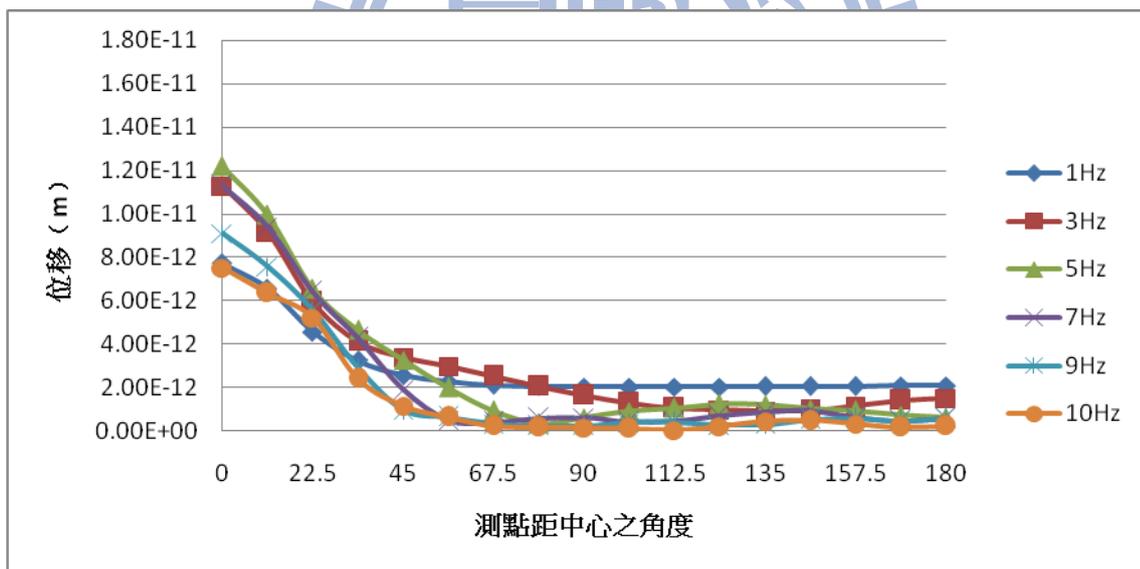


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.85 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 132m 之 U_r)

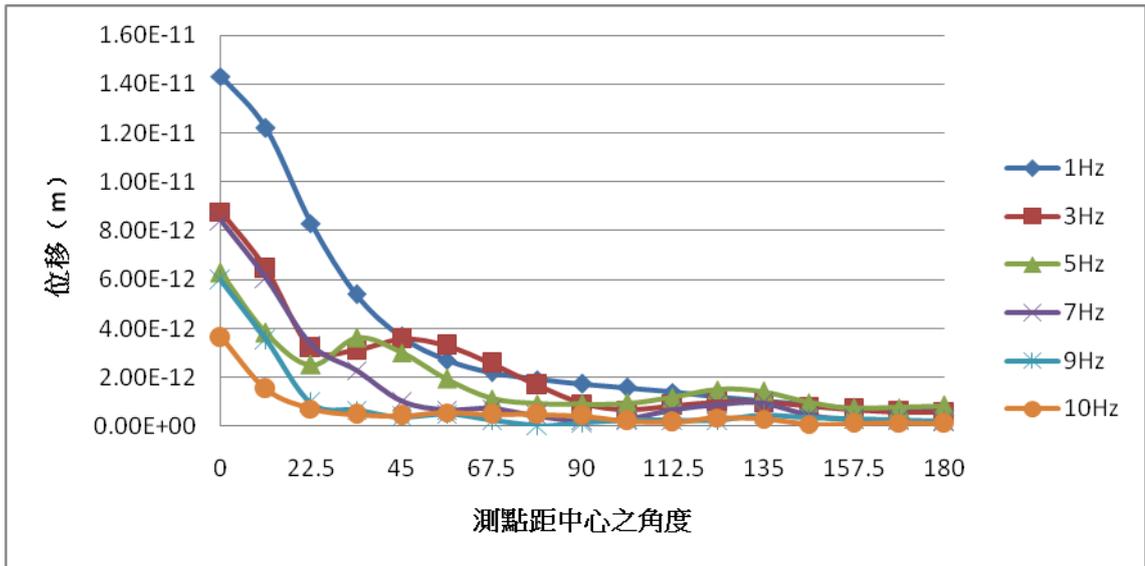


(a) 無放置屏蔽隧道區

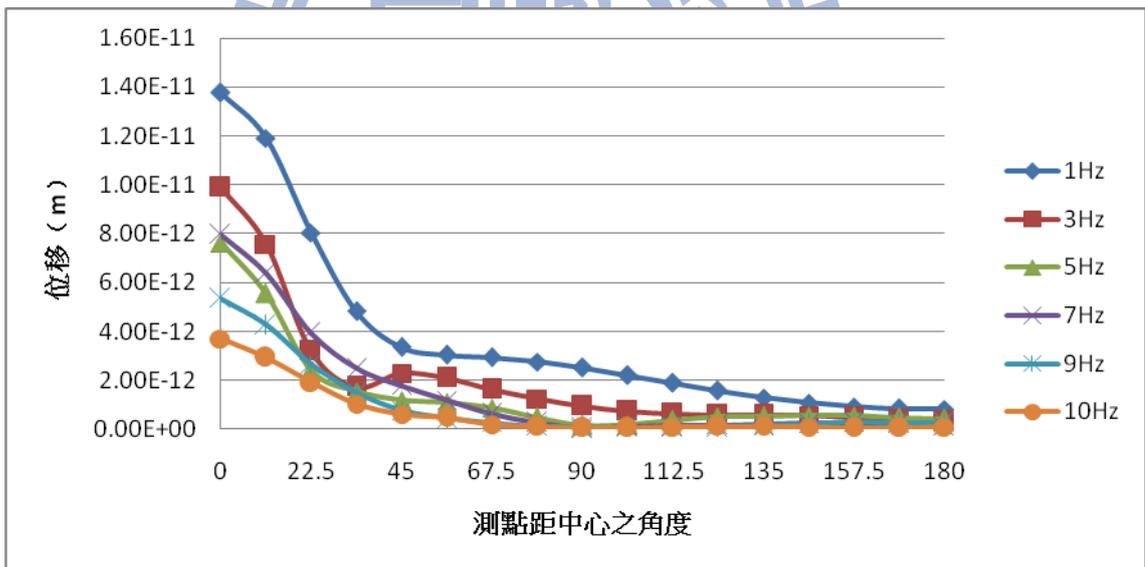


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.86 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 132m 之 U_z)

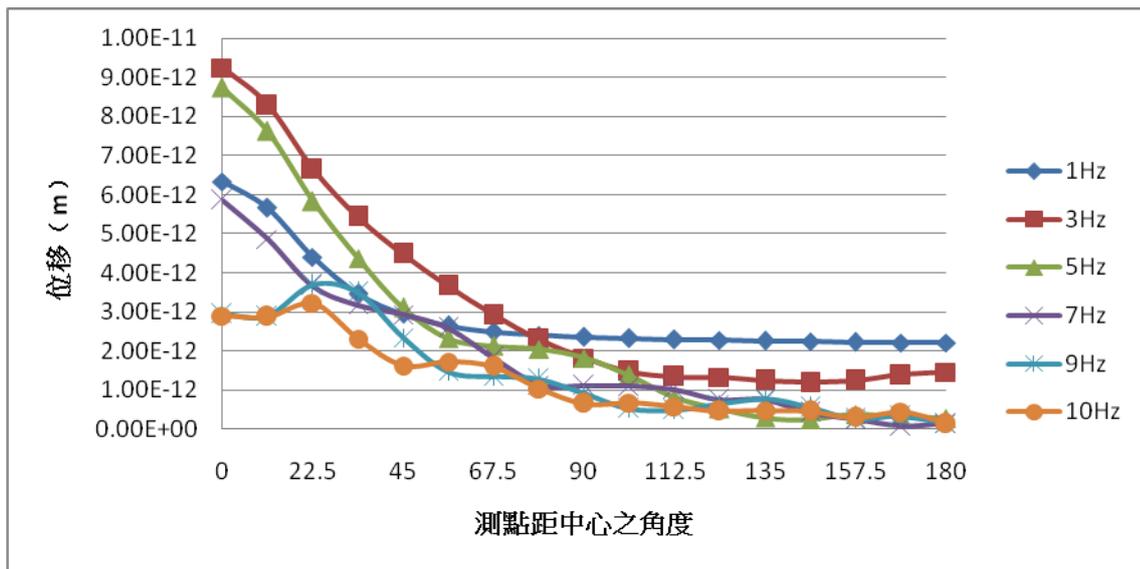


(a) 無放置屏蔽隧道區

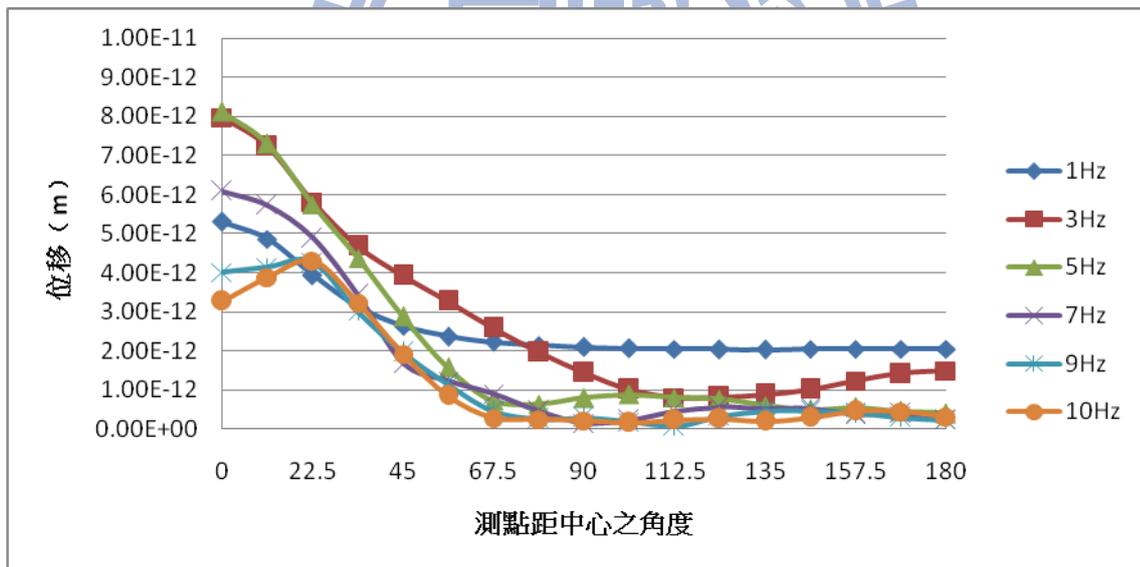


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.87 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 154m 之 U_r)

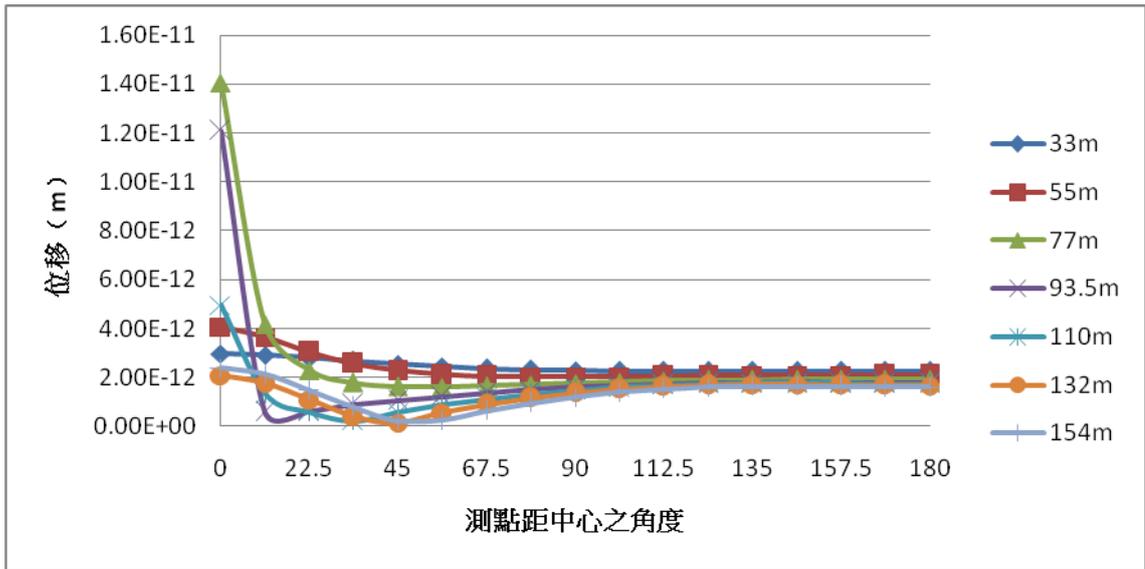


(a) 無放置屏蔽隧道區

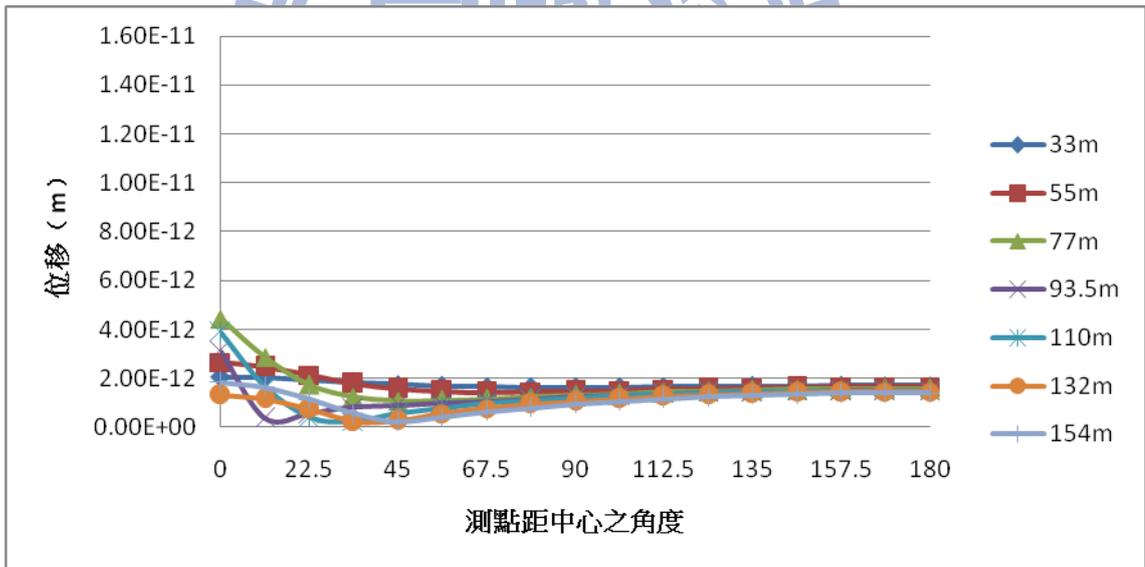


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.88 土壤全開挖之分析 (水平方向施力點距中心 154m 之 U_z)

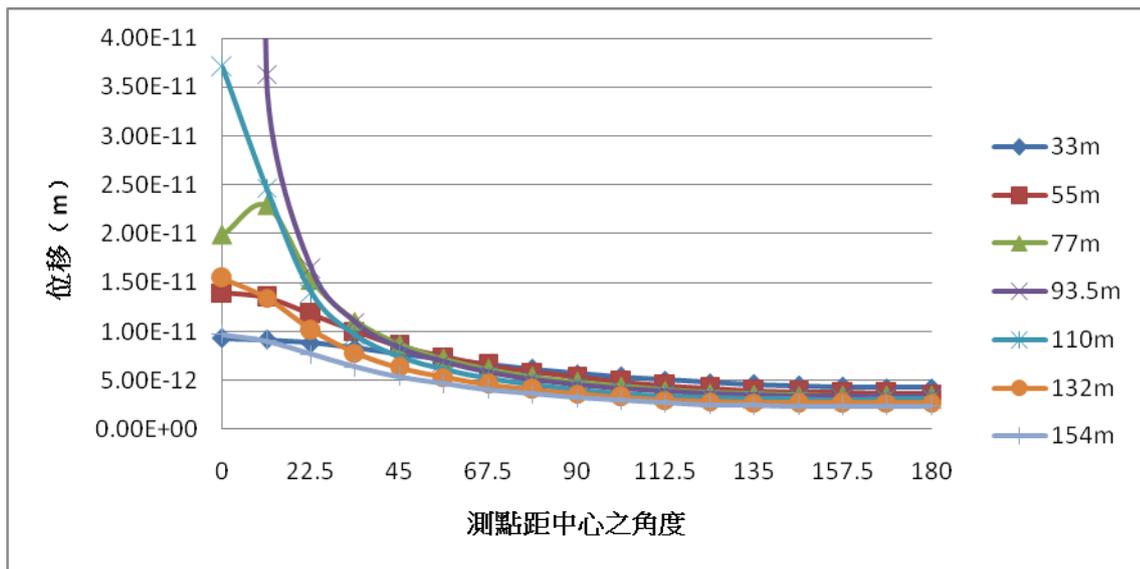


(a) 無放置屏蔽隧道區

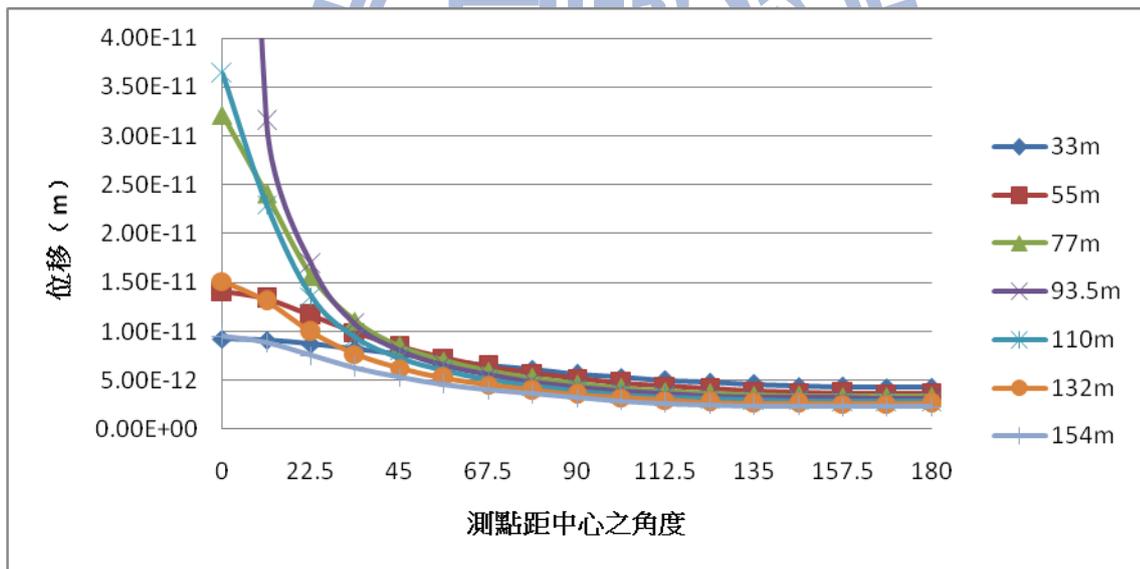


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.89 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

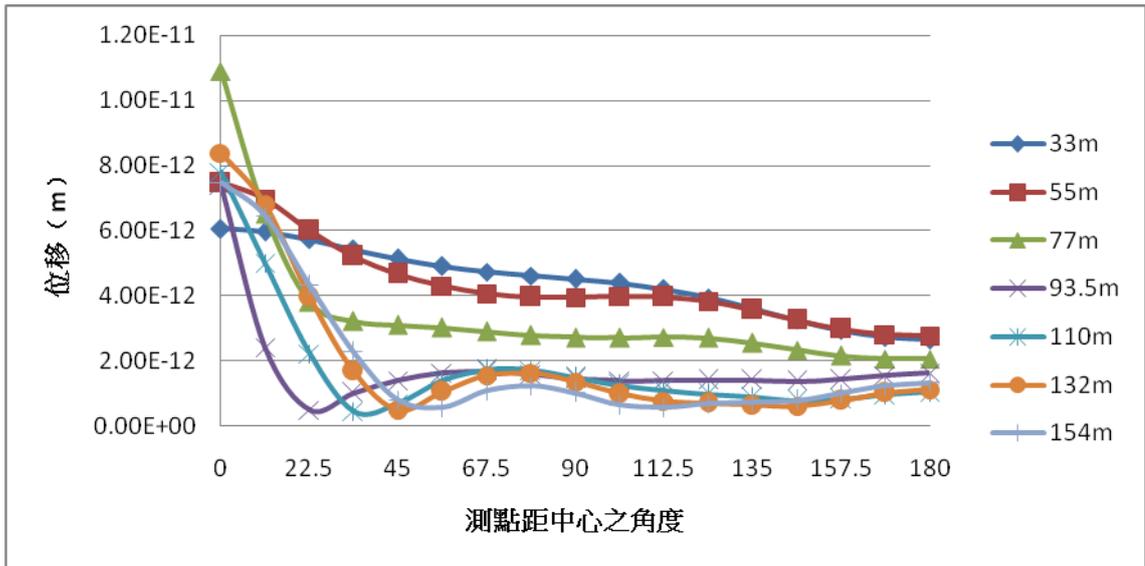


(a) 無放置屏蔽隧道區

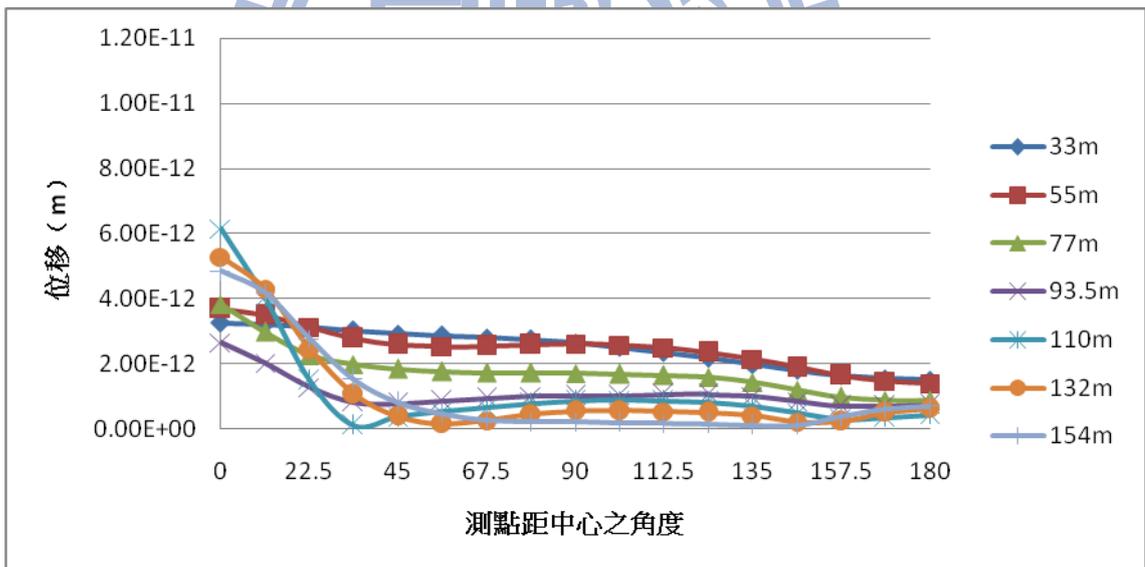


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.90 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

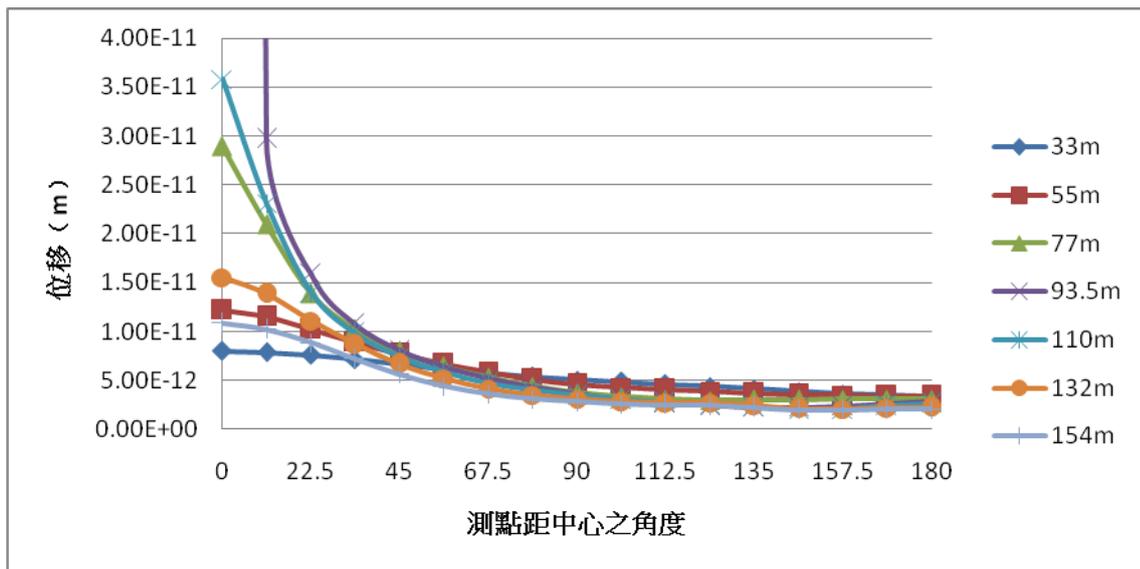


(a) 無放置屏蔽隧道區

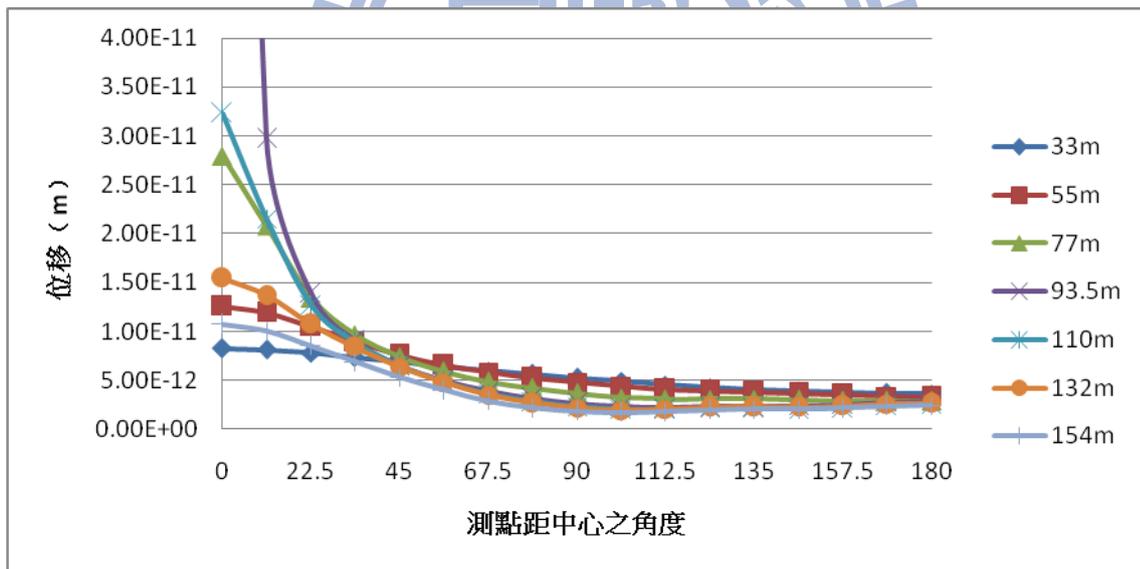


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.91 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

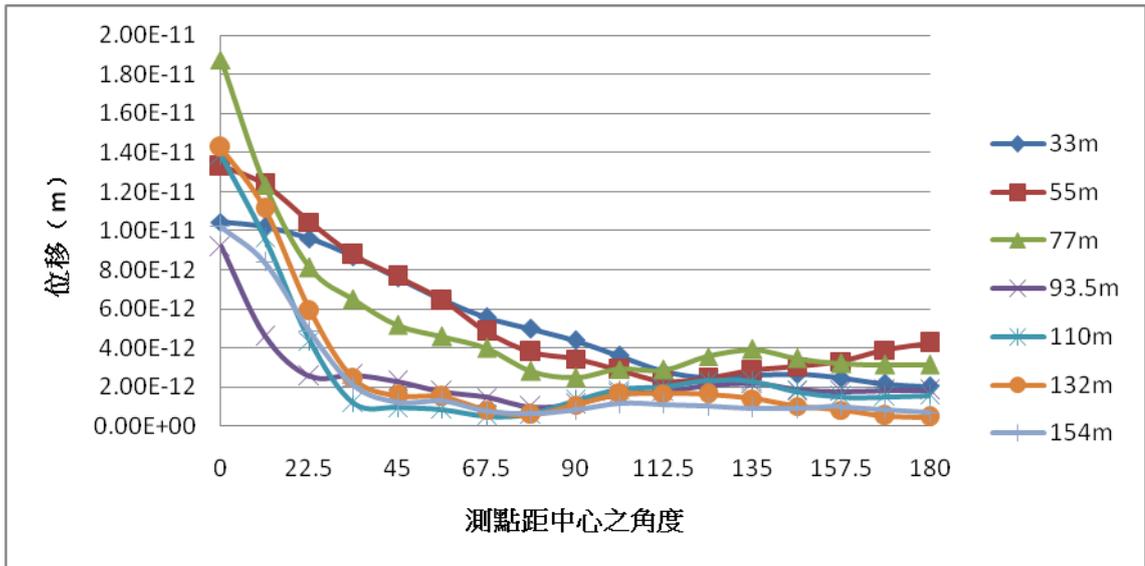


(a) 無放置屏蔽隧道區

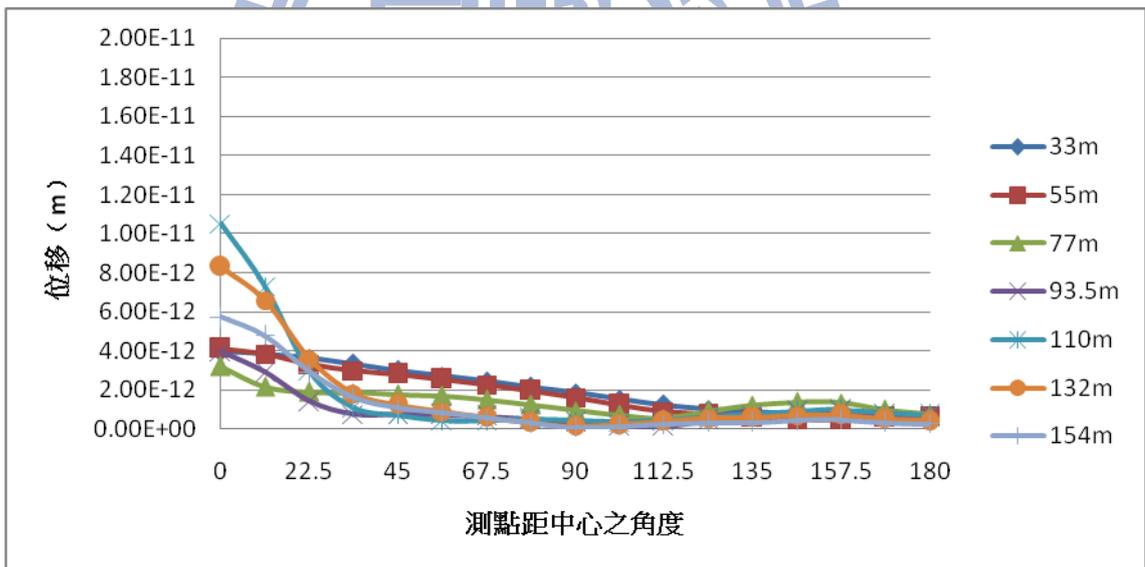


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.92 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

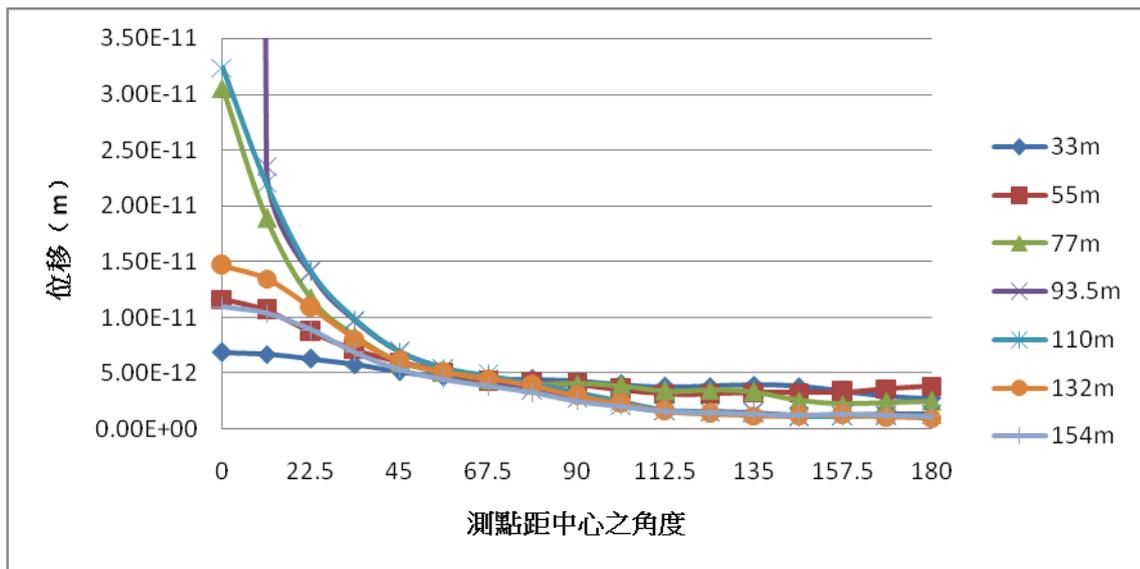


(a) 無放置屏蔽隧道區

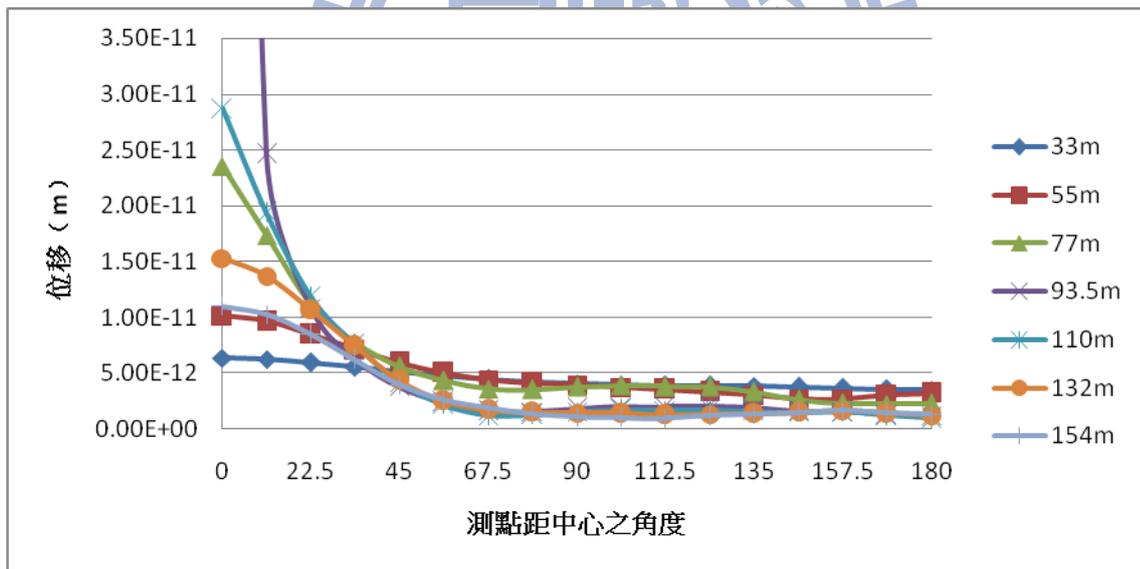


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.93 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

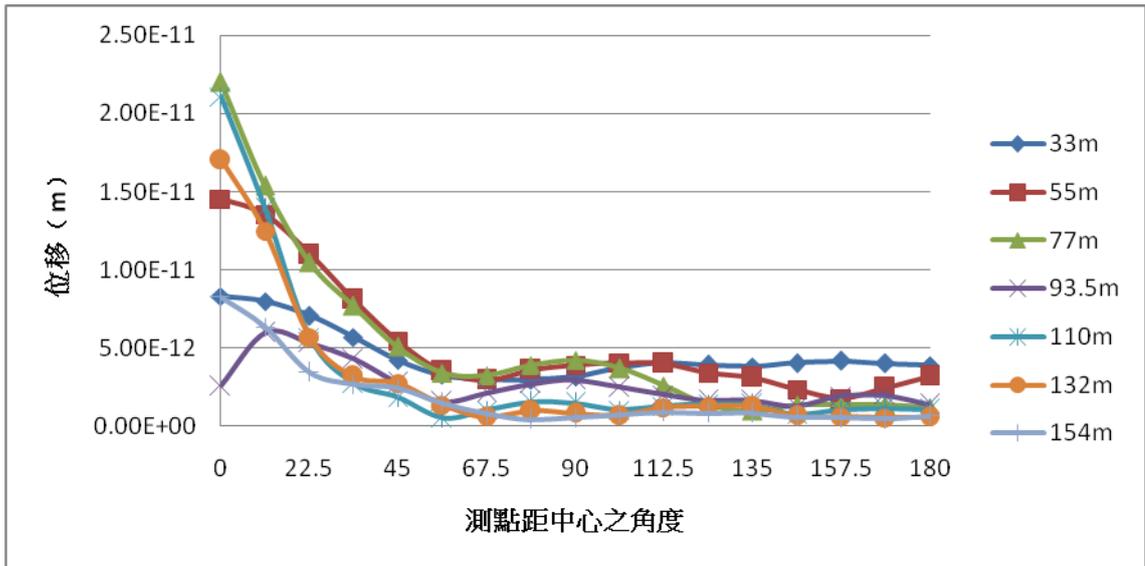


(a) 無放置屏蔽隧道區

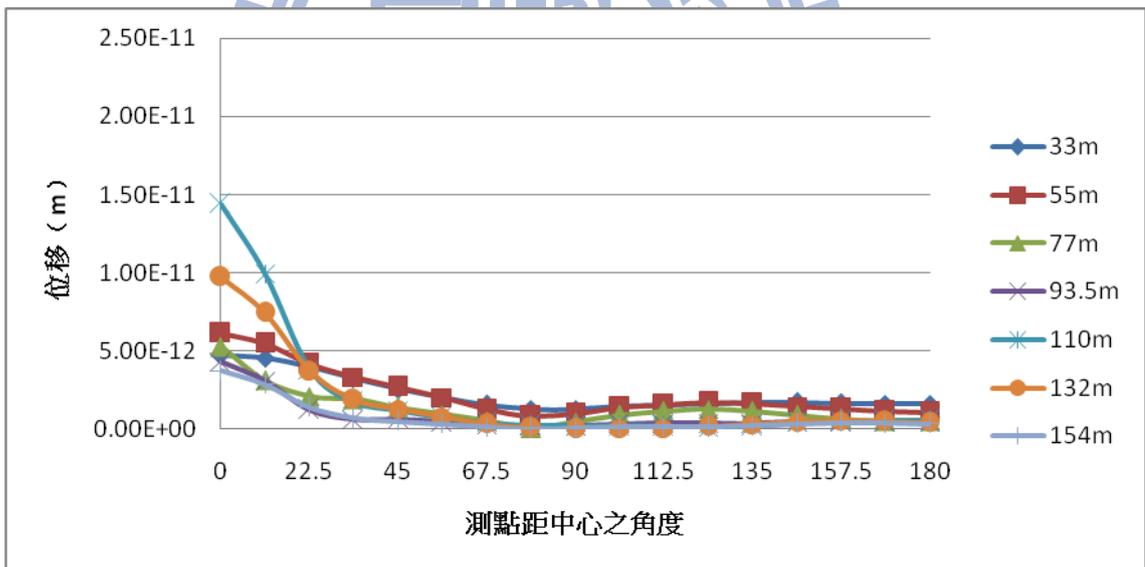


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.94 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 5Hz 之 U_z)

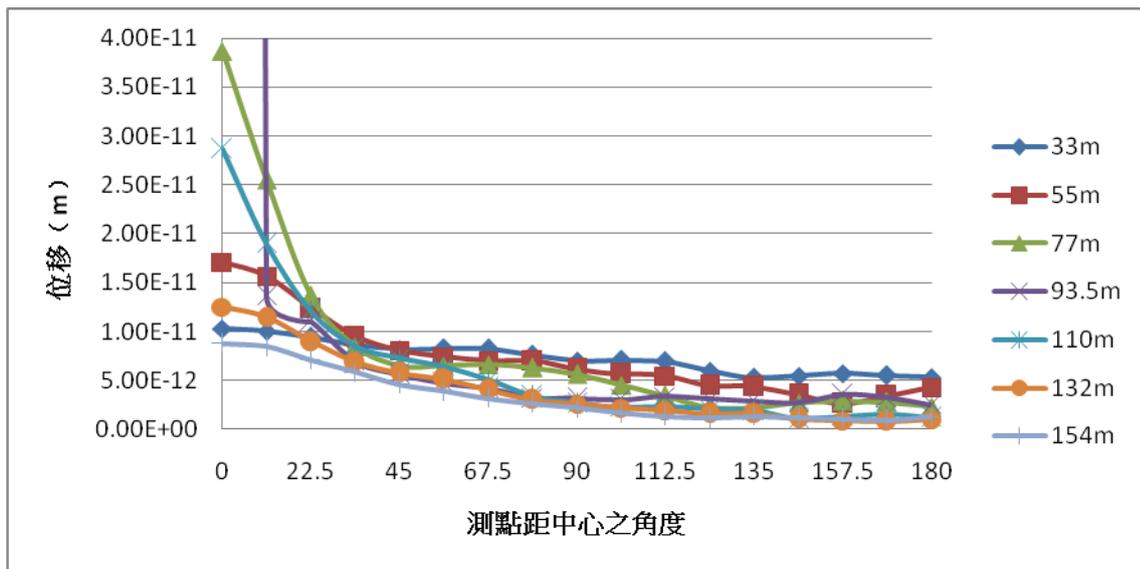


(a) 無放置屏蔽隧道區

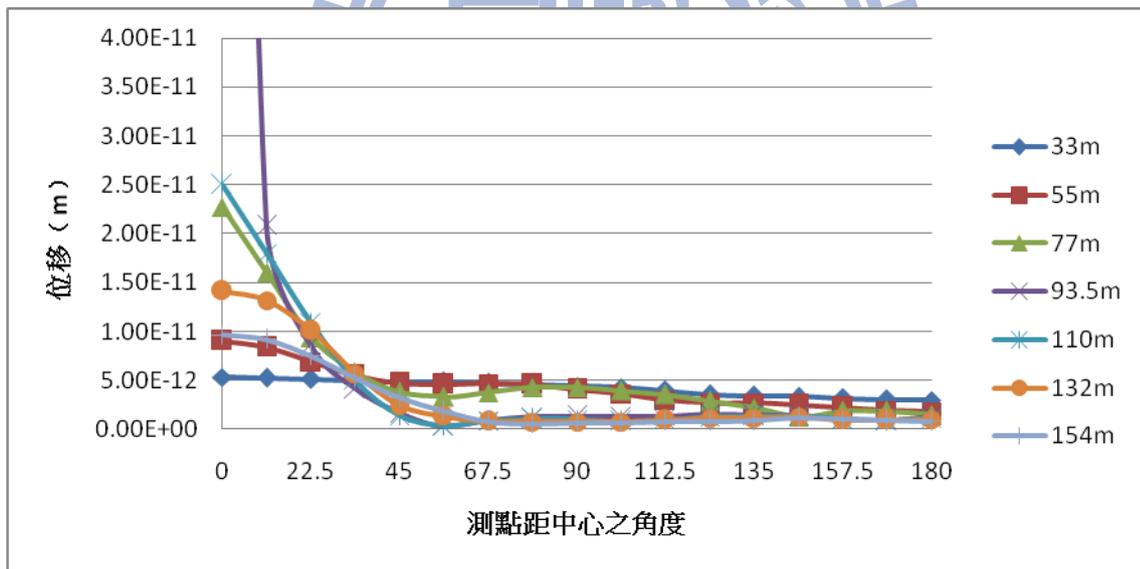


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.95 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

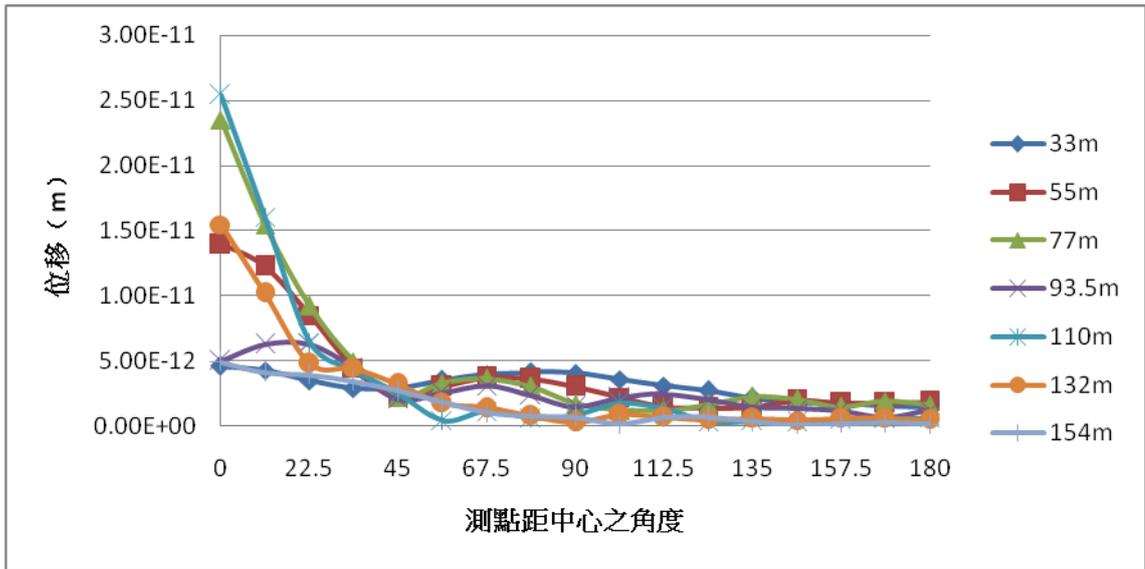


(a) 無放置屏蔽隧道區

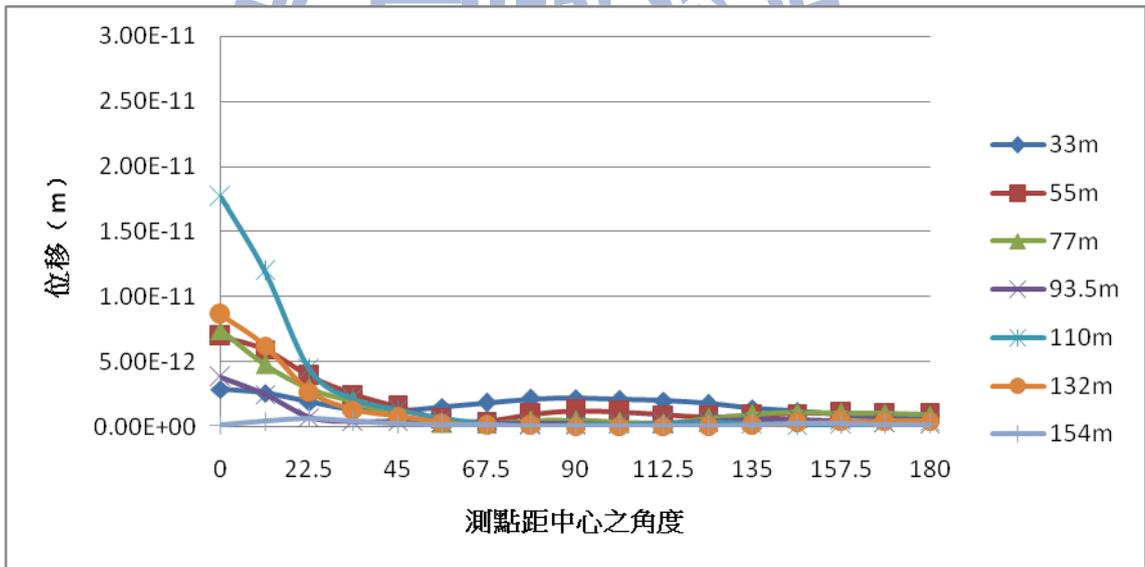


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.96 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

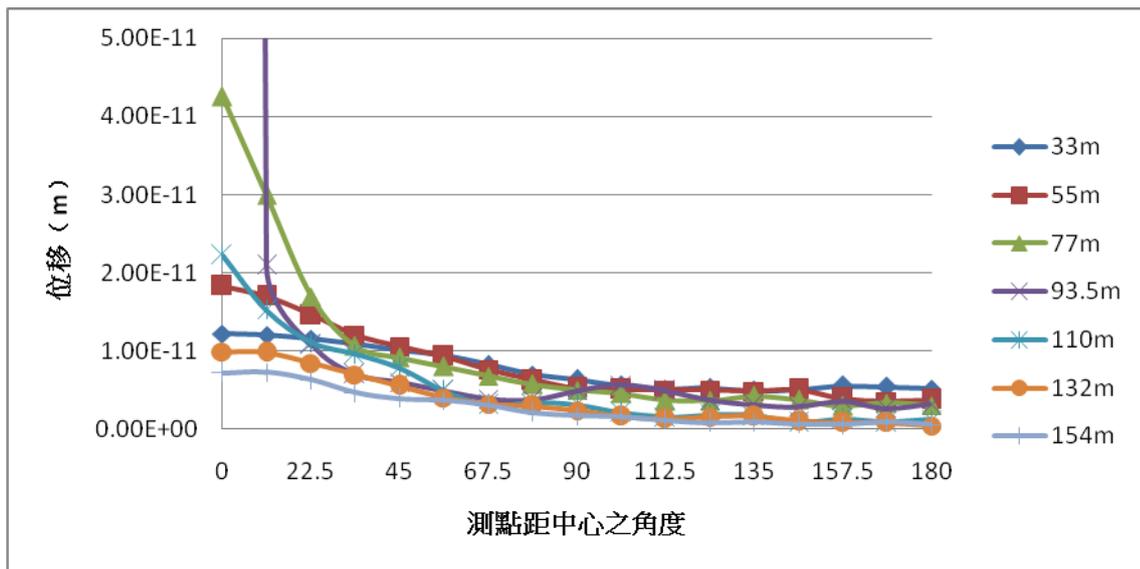


(a) 無放置屏蔽隧道區

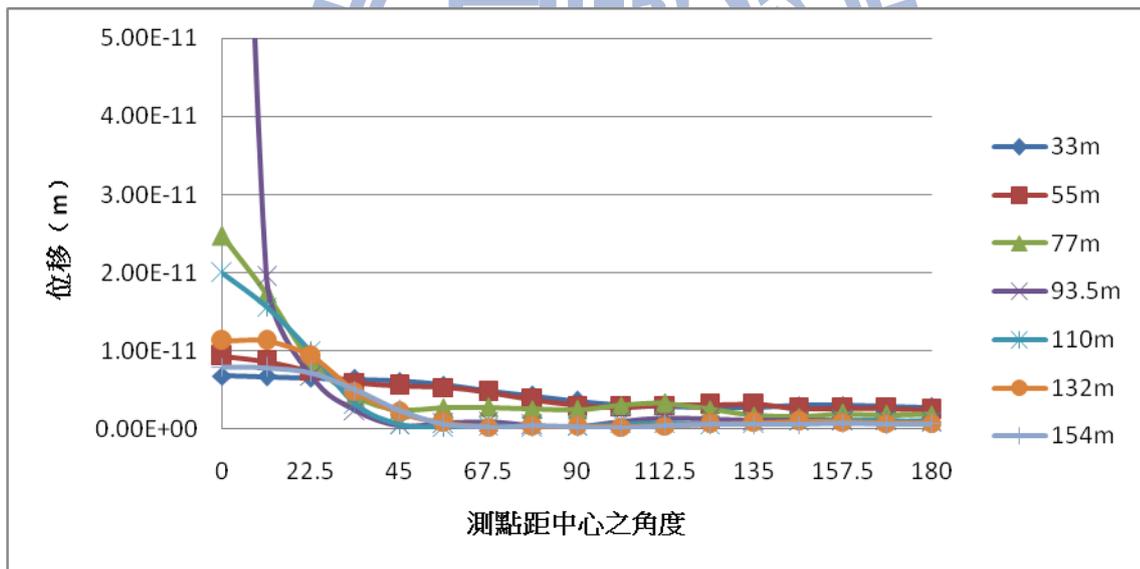


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.97 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

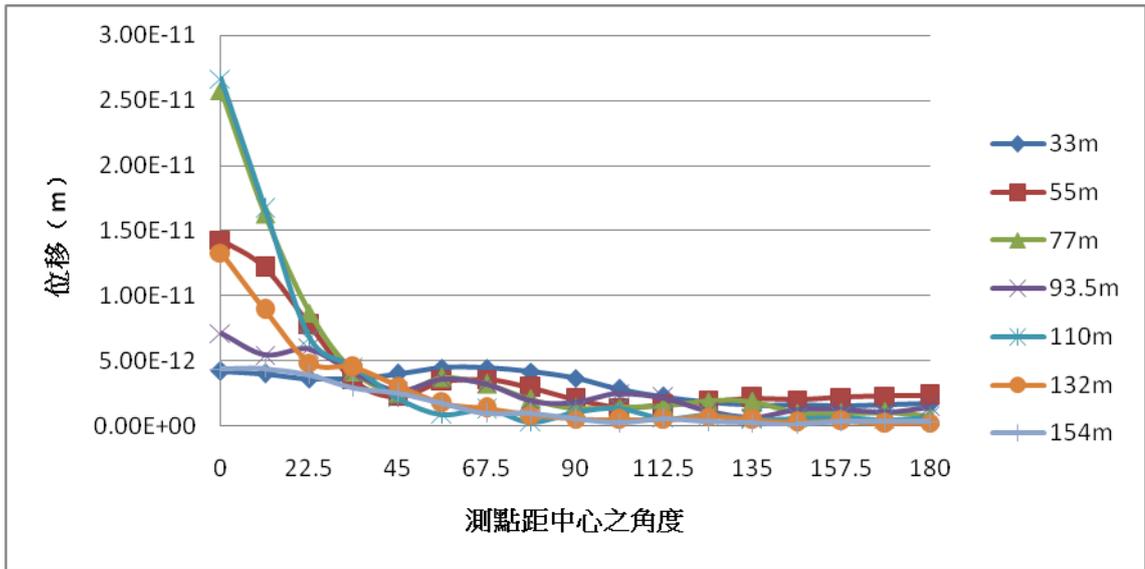


(a) 無放置屏蔽隧道區

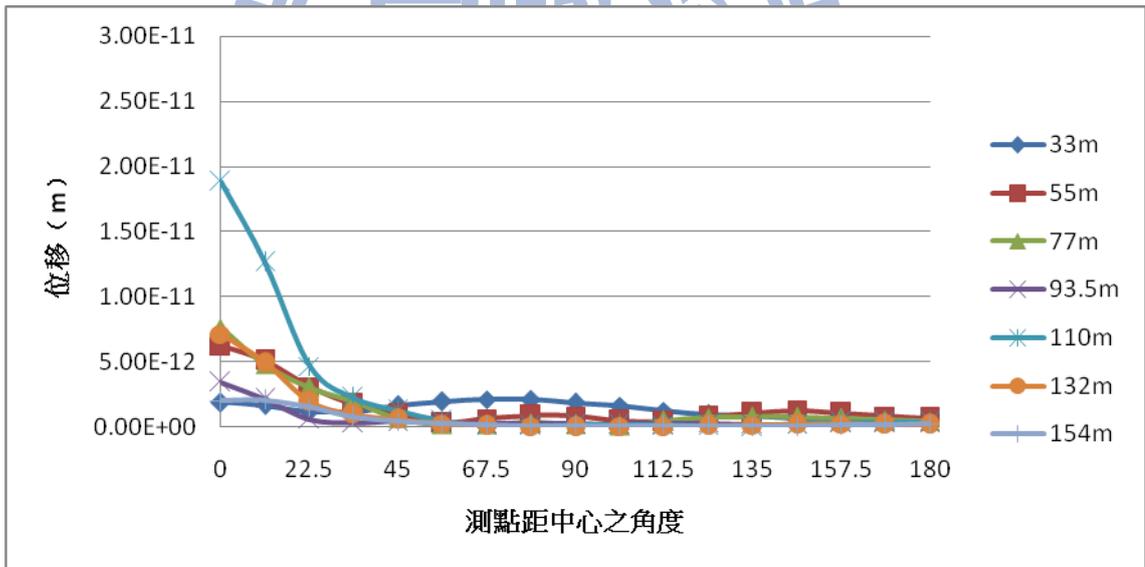


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.98 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

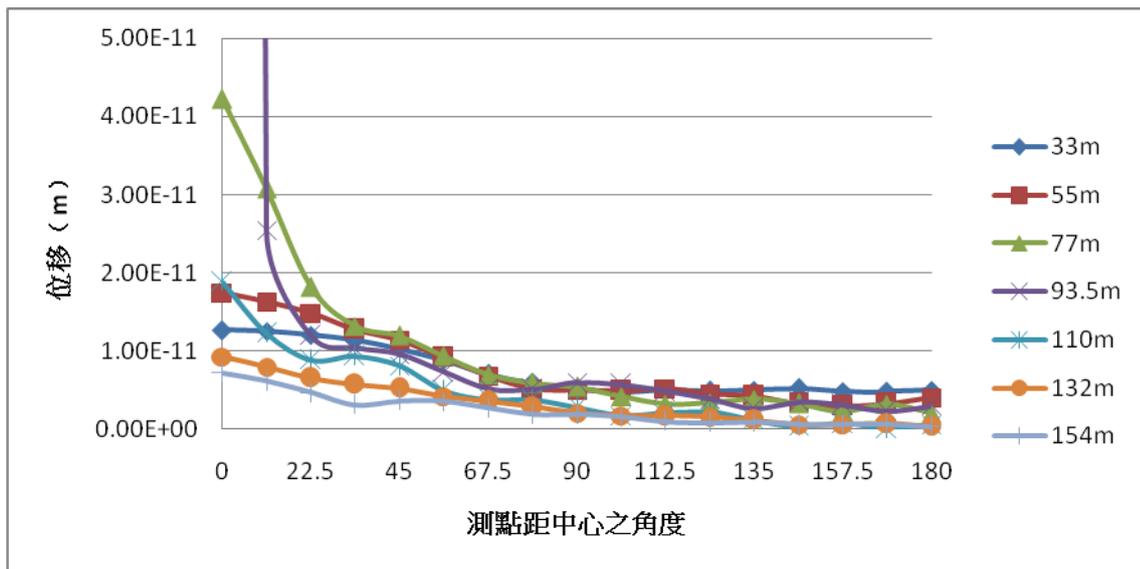


(a) 無放置屏蔽隧道區

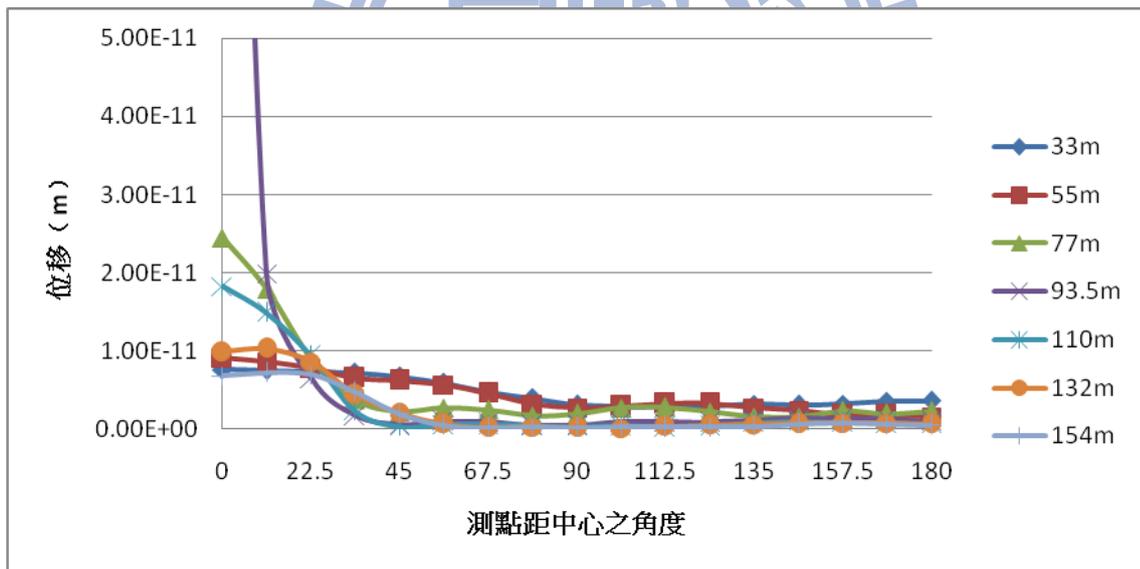


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.99 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_r)

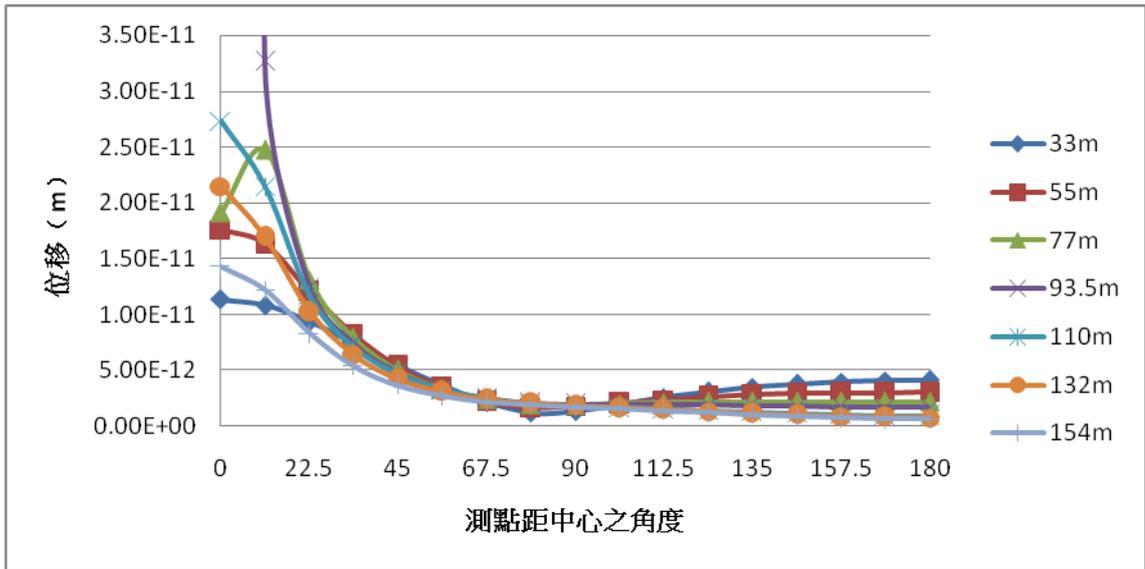


(a) 無放置屏蔽隧道區

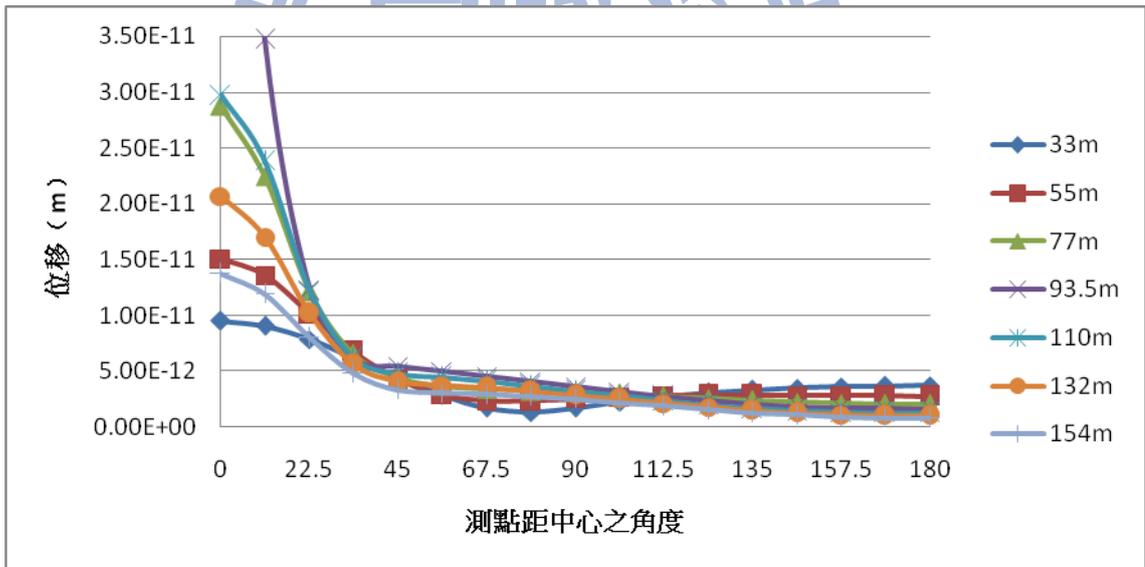


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.100 土壤全開挖之分析 (鉛垂方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

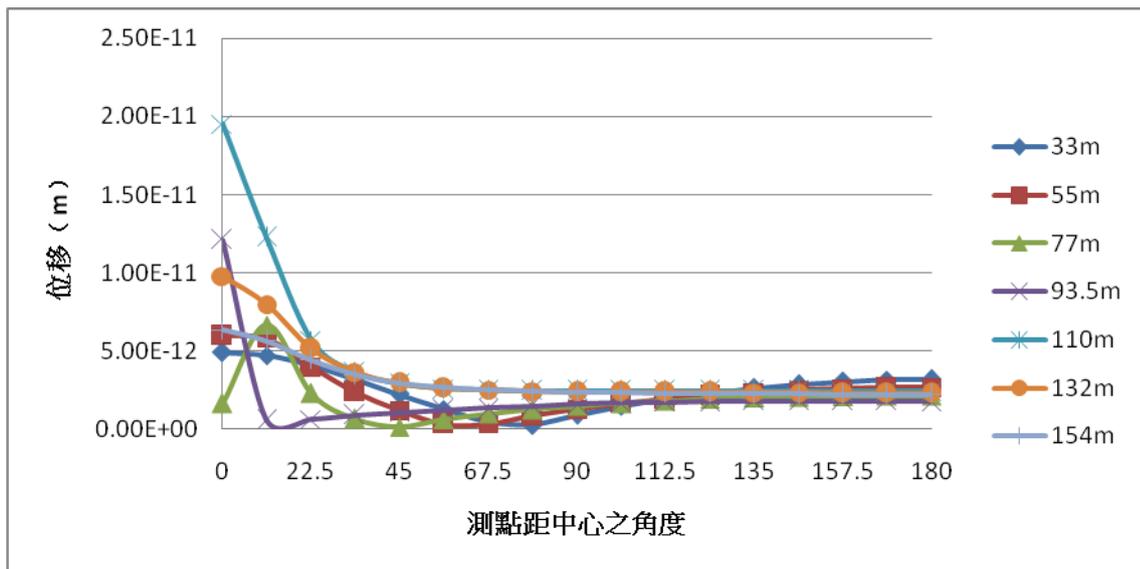


(a) 無放置屏蔽隧道區

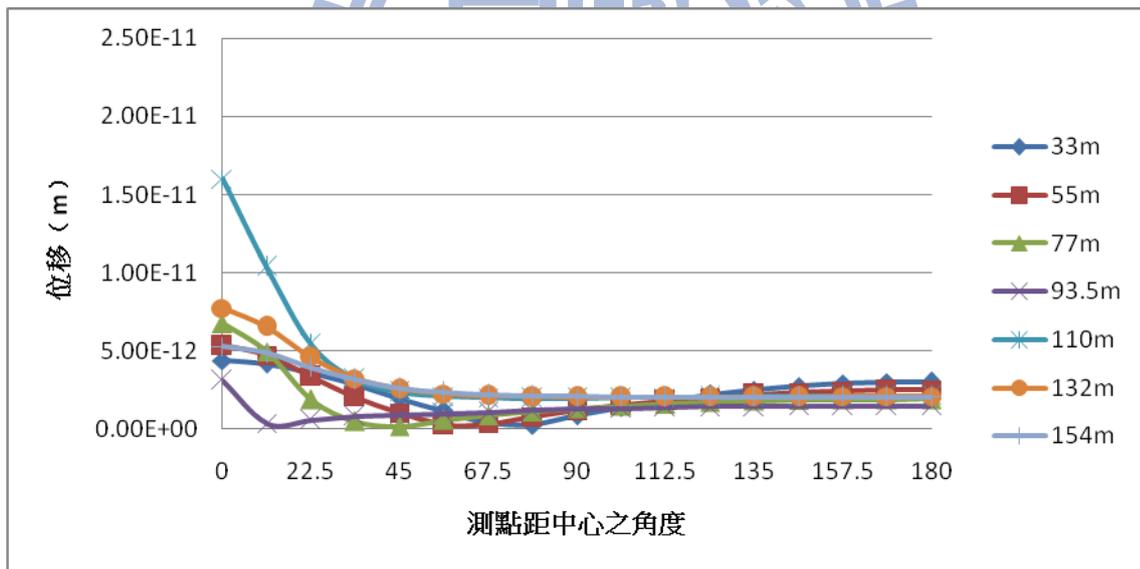


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.101 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_r)

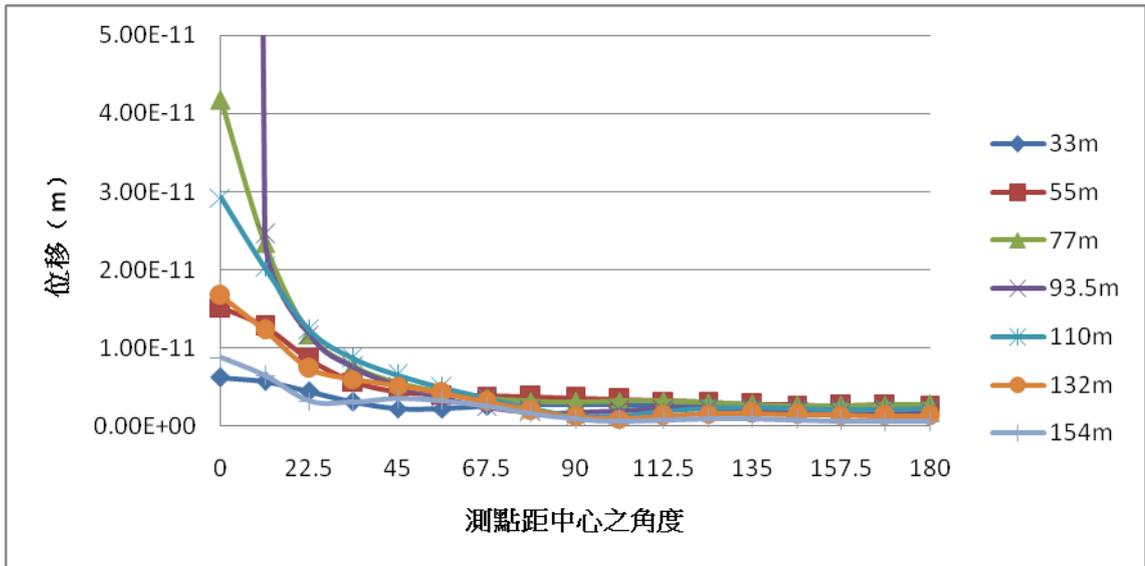


(a) 無放置屏蔽隧道區

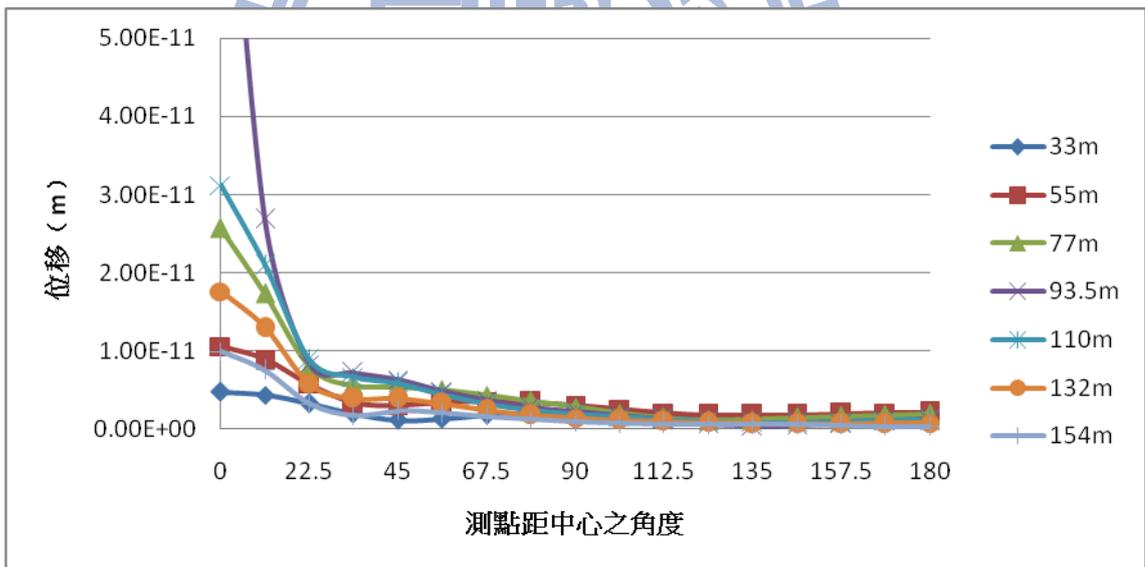


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.102 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 1Hz 之 U_z)

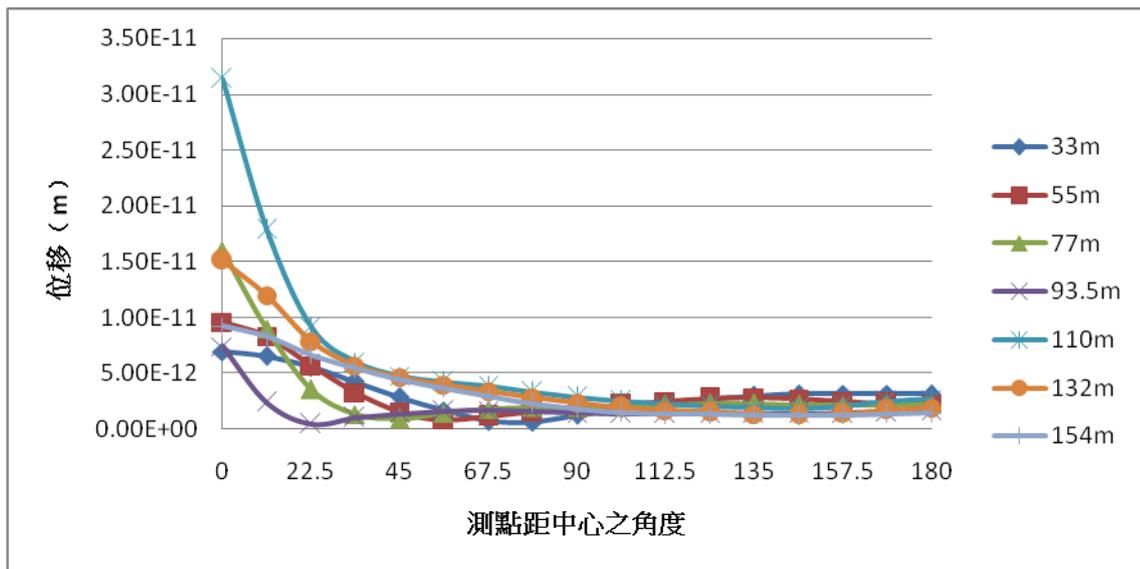


(a) 無放置屏蔽隧道區

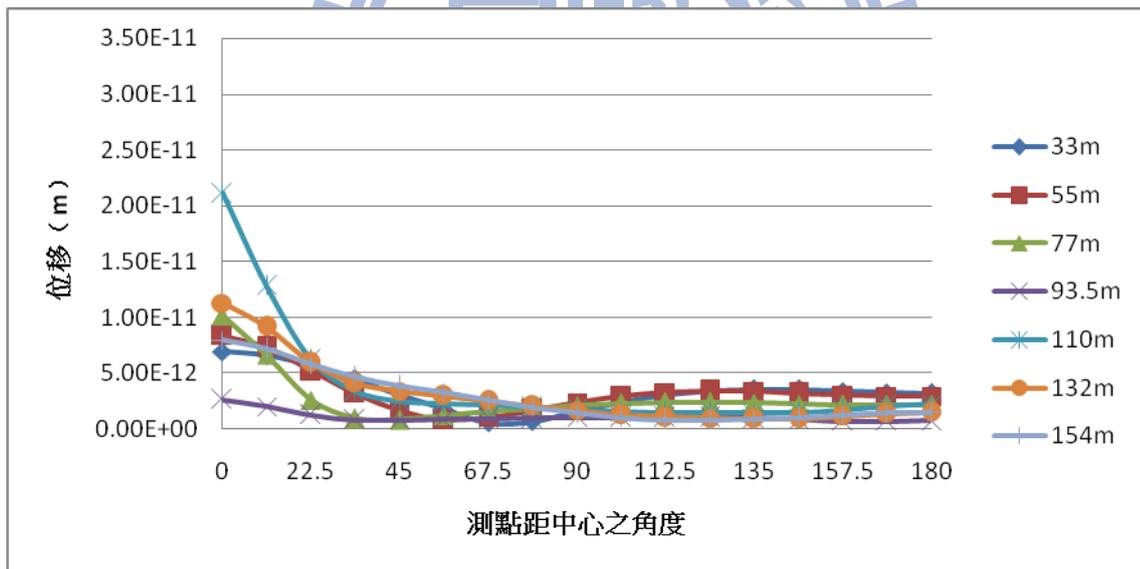


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.103 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_r)

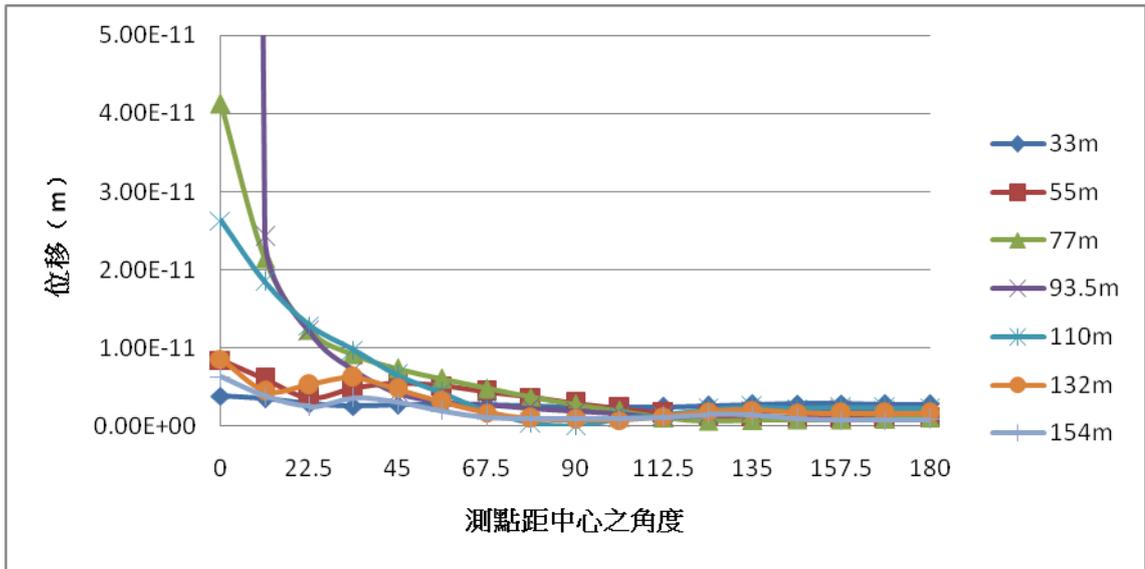


(a) 無放置屏蔽隧道區

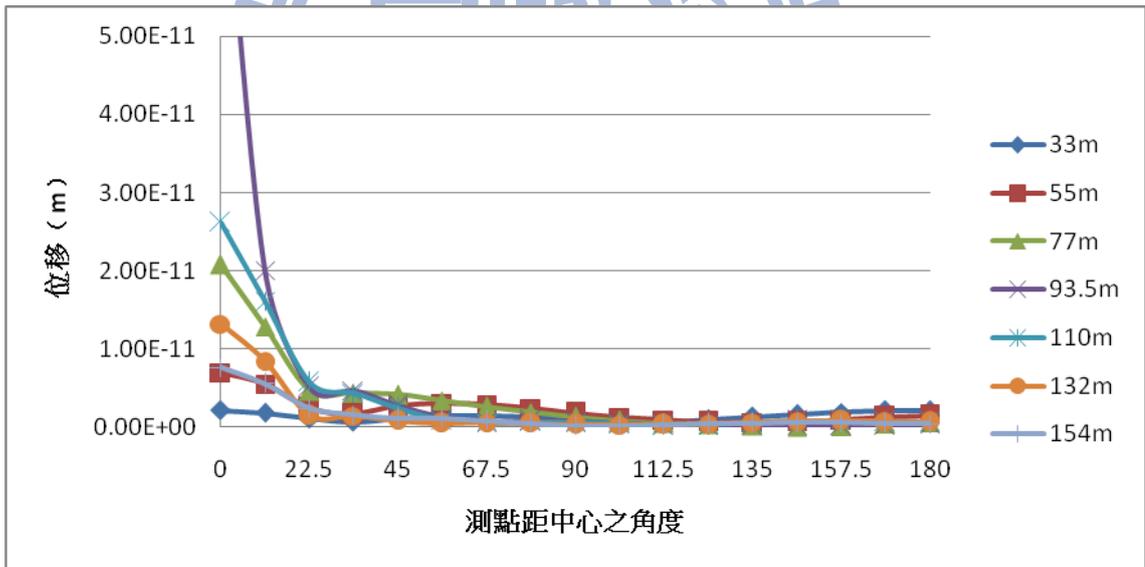


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.104 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 3Hz 之 U_z)

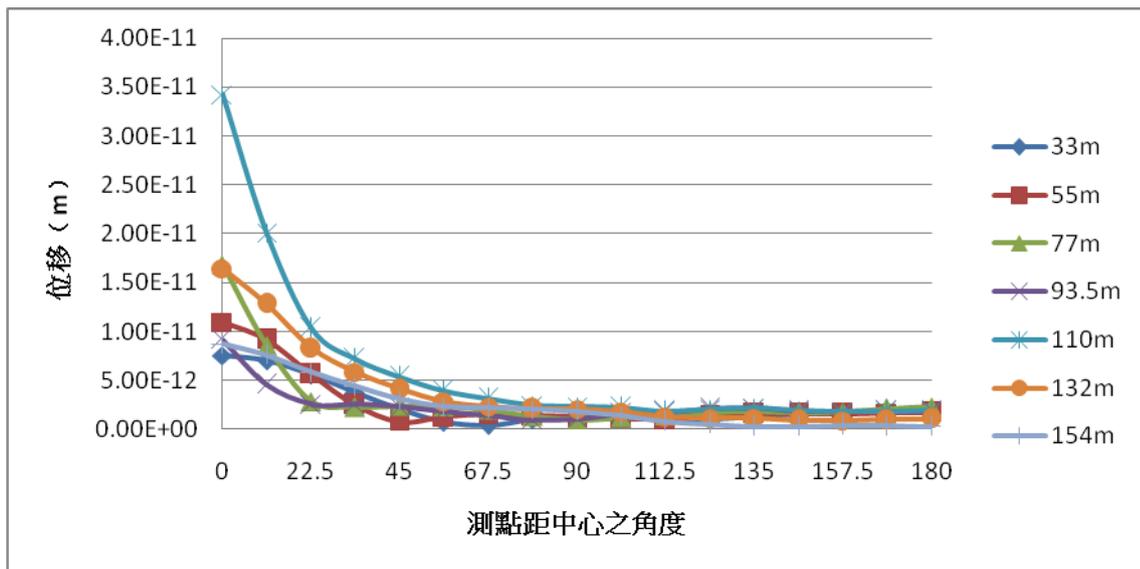


(a) 無放置屏蔽隧道區

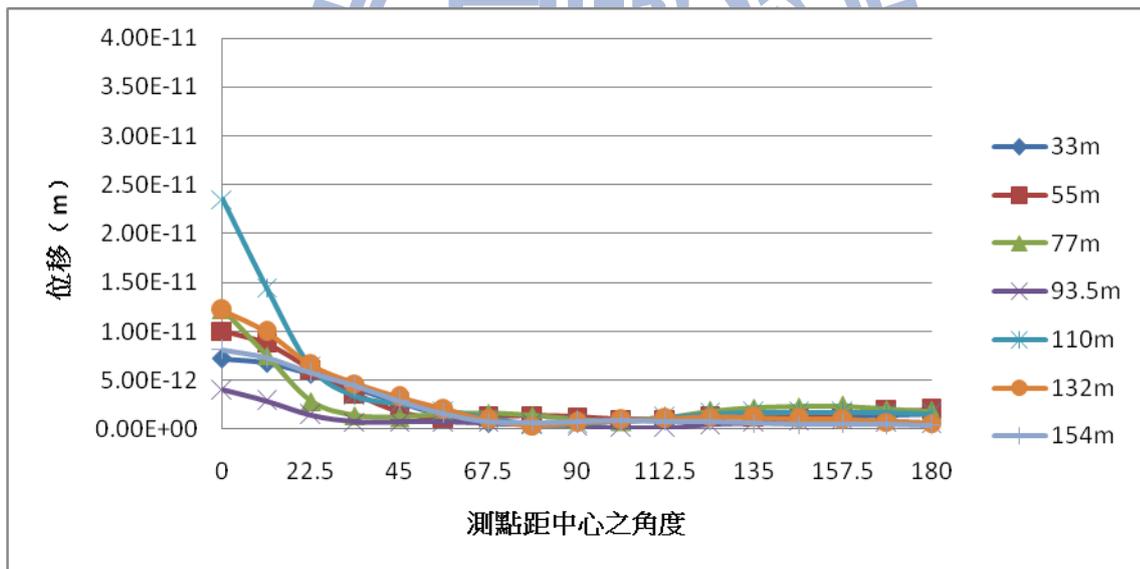


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.105 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_r)

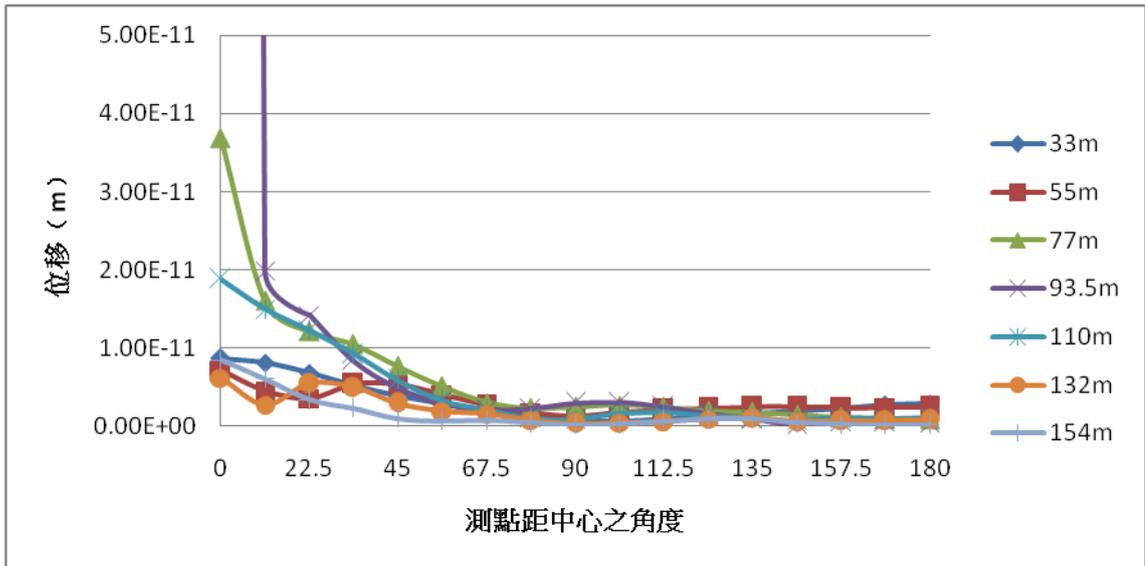


(a) 無放置屏蔽隧道區

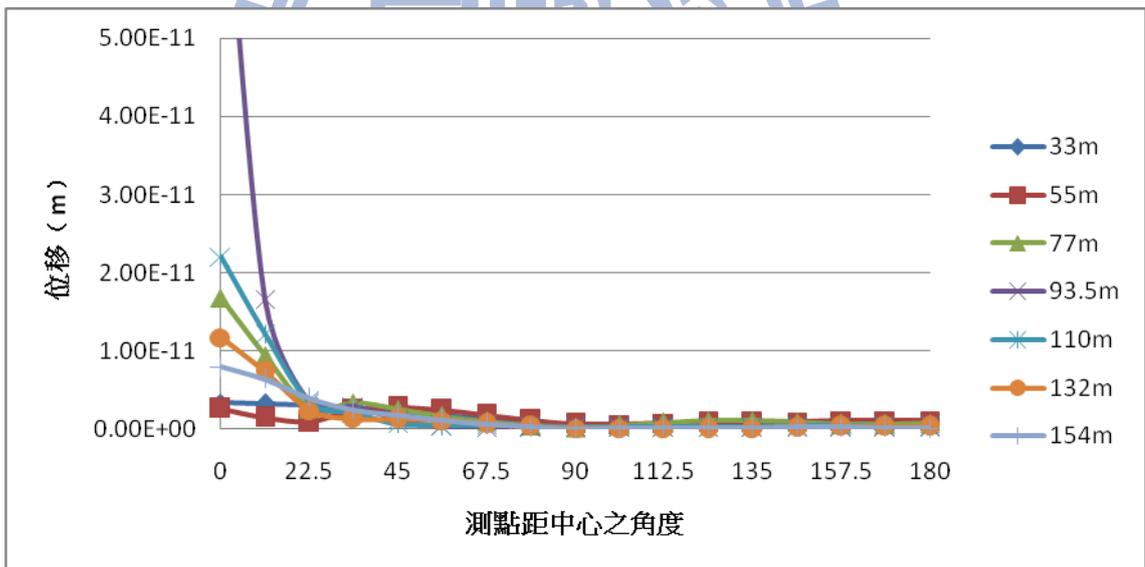


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.106 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 5Hz 之 U_z)

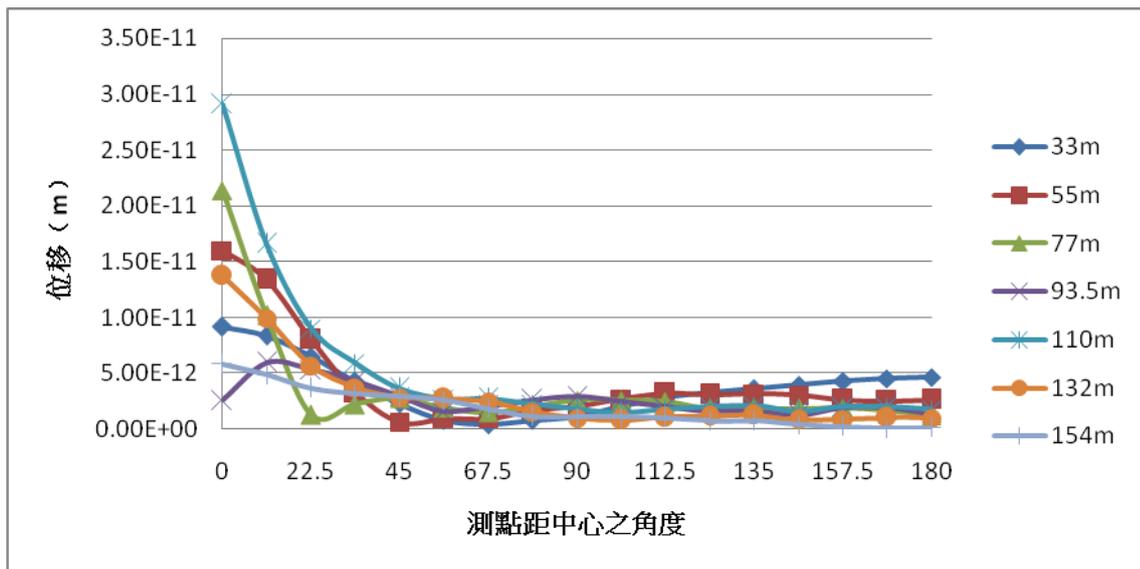


(a) 無放置屏蔽隧道區

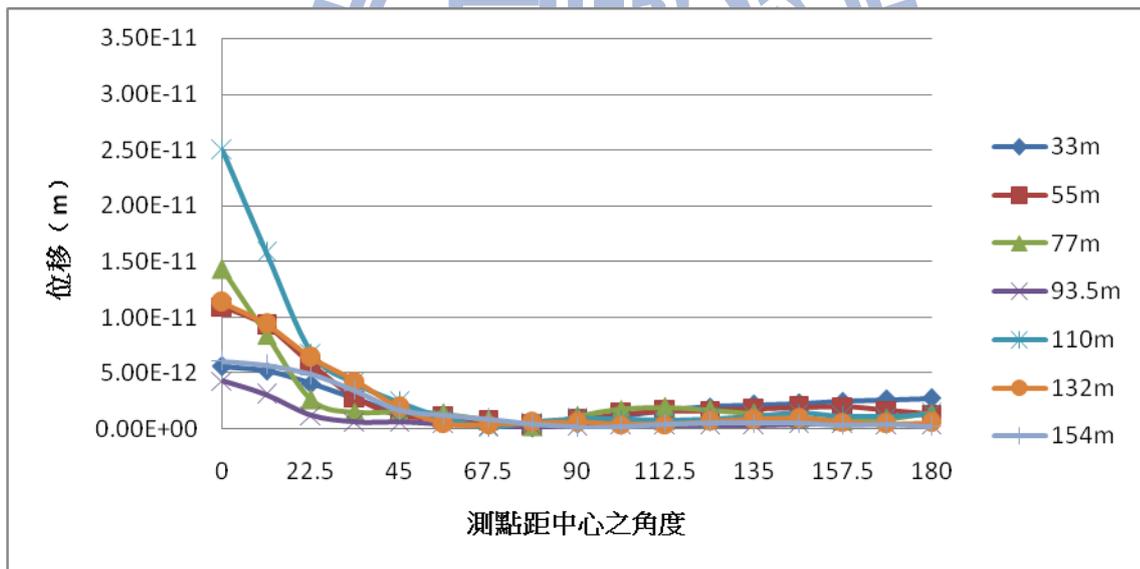


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.107 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_r)

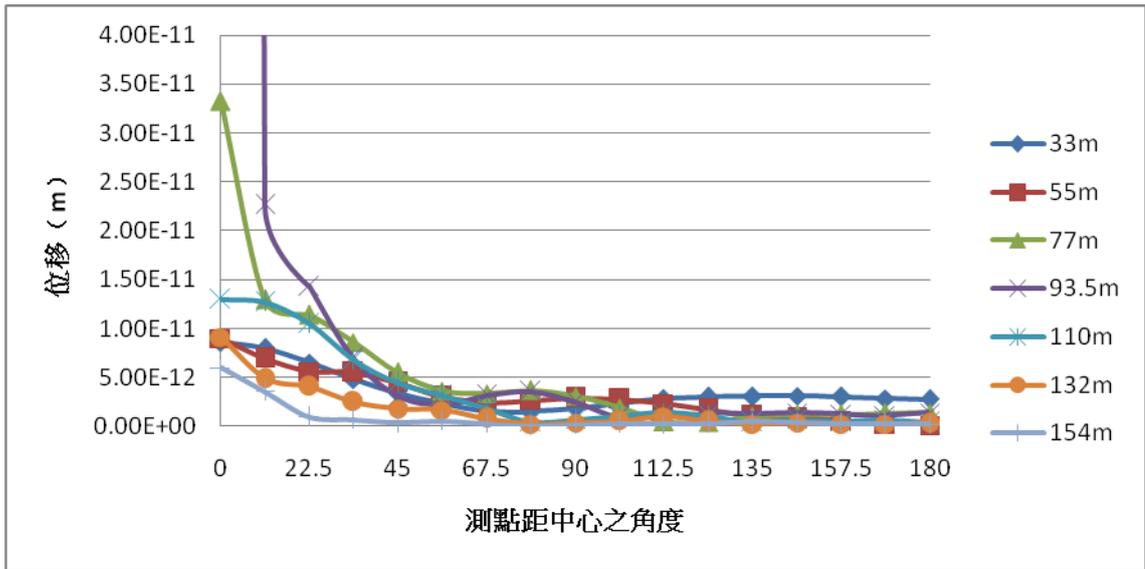


(a) 無放置屏蔽隧道區

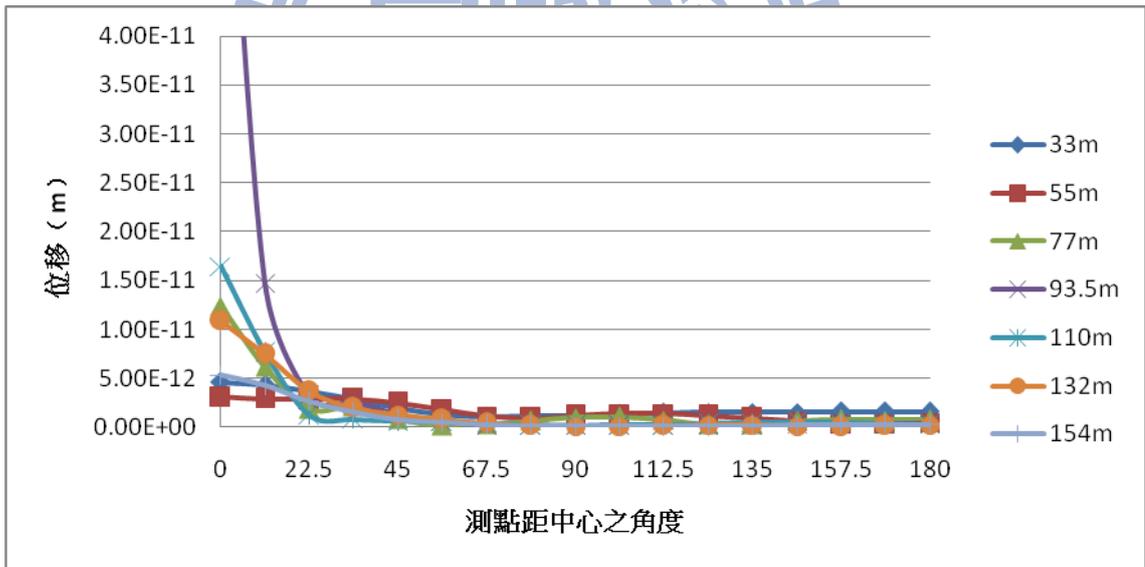


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.108 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 7Hz 之 U_z)

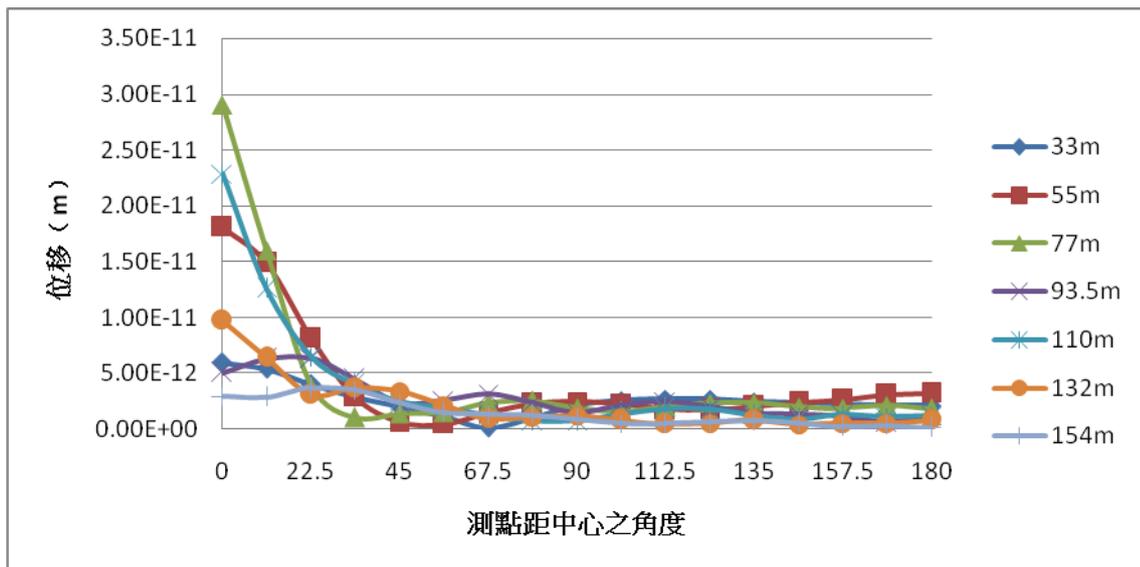


(a) 無放置屏蔽隧道區

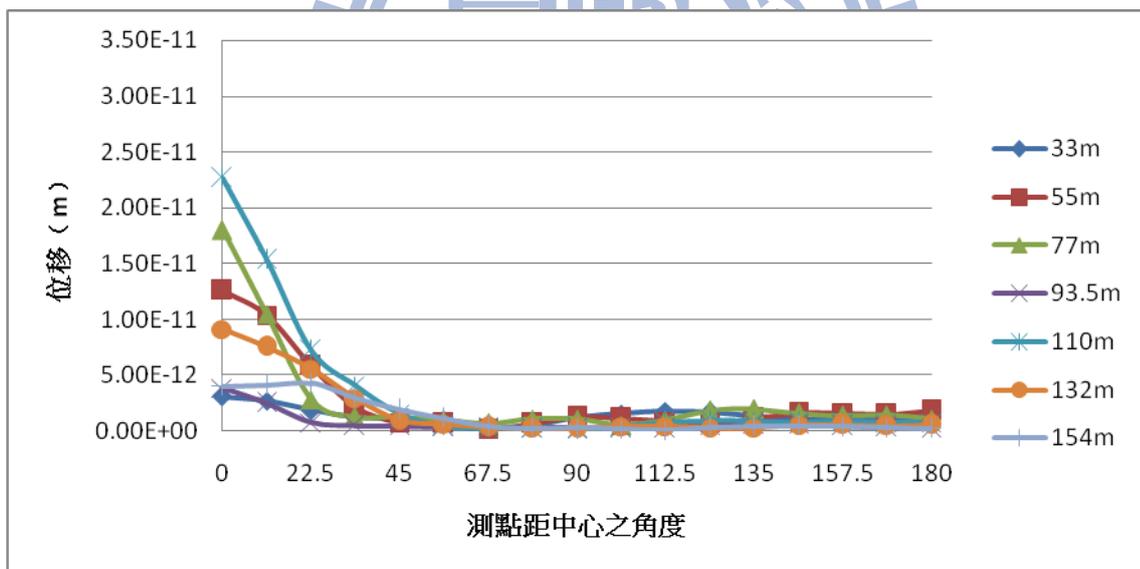


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.109 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_r)

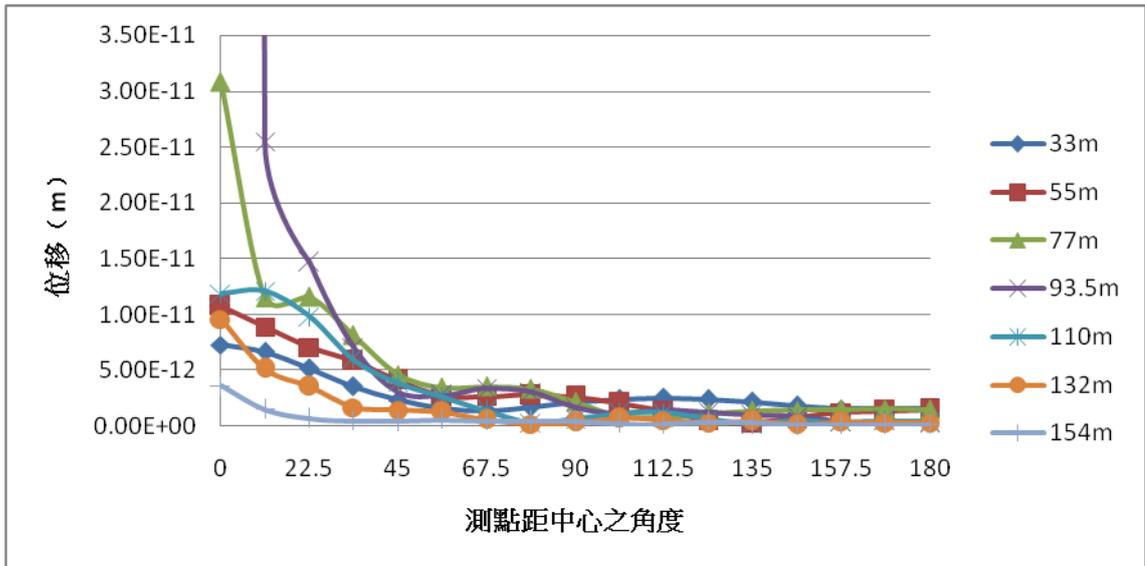


(a) 無放置屏蔽隧道區

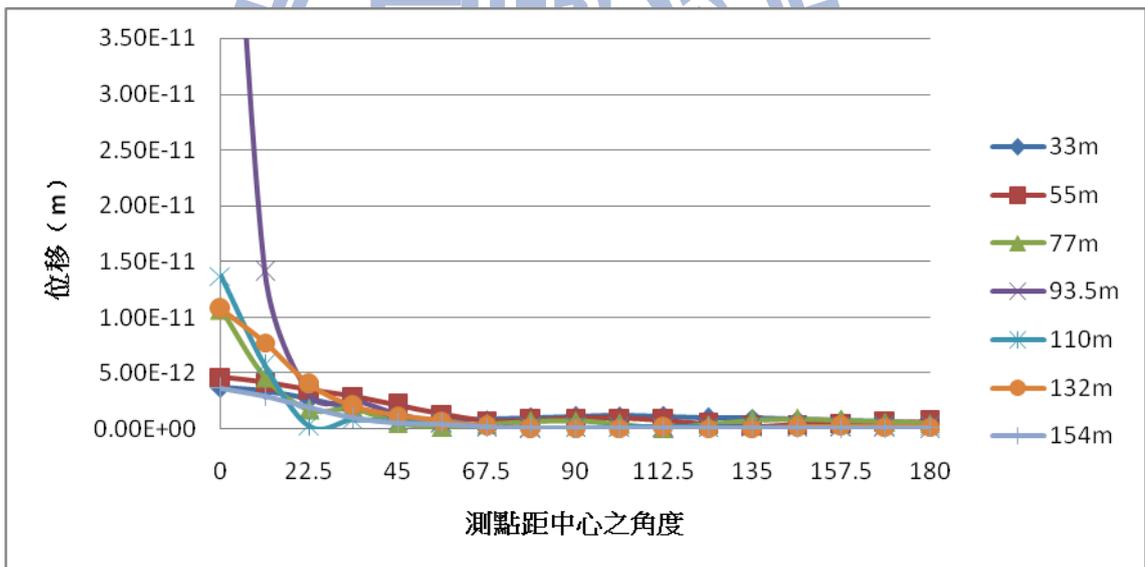


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.110 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 9Hz 之 U_z)

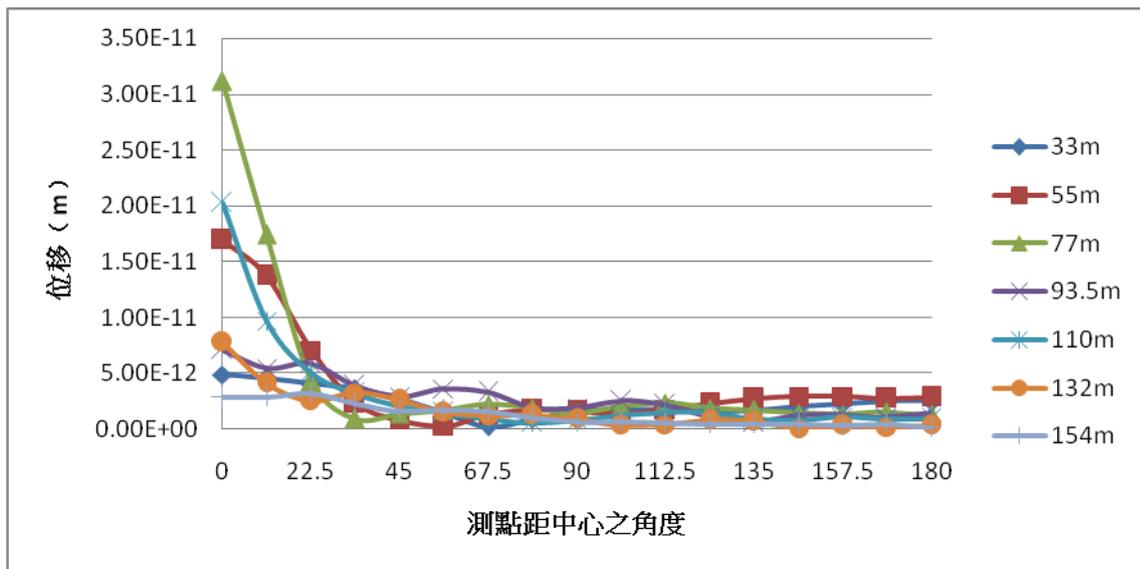


(a) 無放置屏蔽隧道區

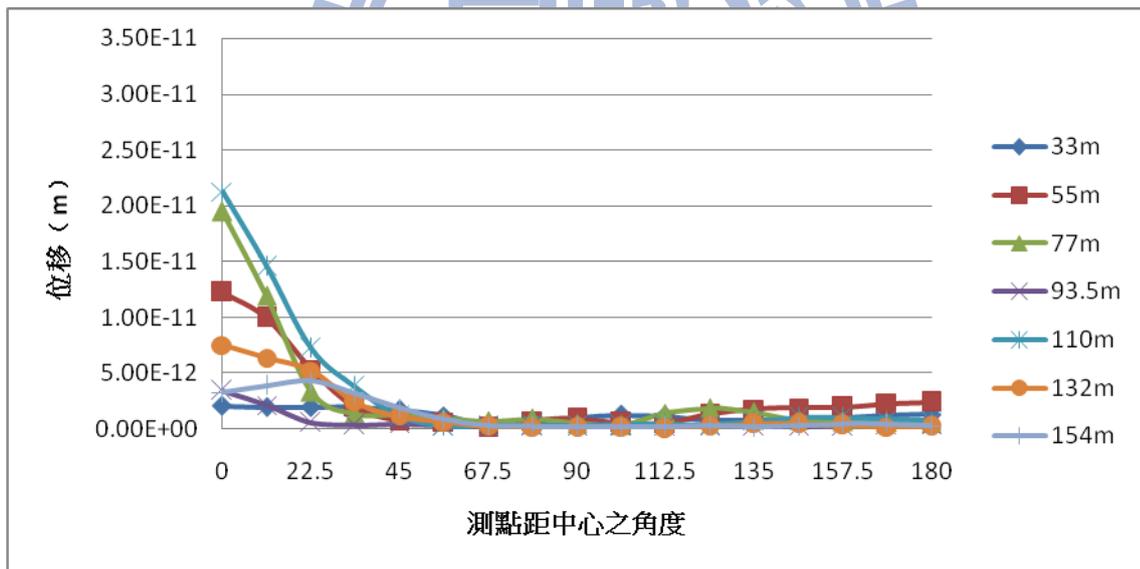


(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.111 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_r)



(a) 無放置屏蔽隧道區



(b) 有放置屏蔽隧道區

Fig. 4.112 土壤全開挖之分析 (水平方向振動頻率 10Hz 之 U_z)

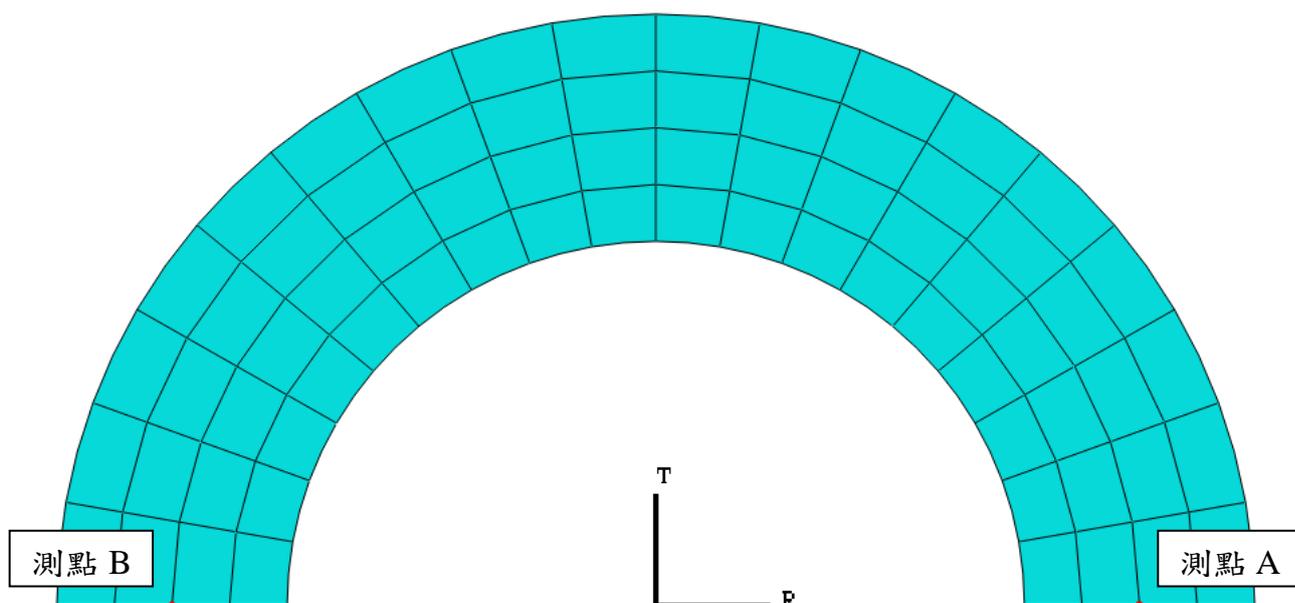


Fig. 5.1 加速器環館測點之設置

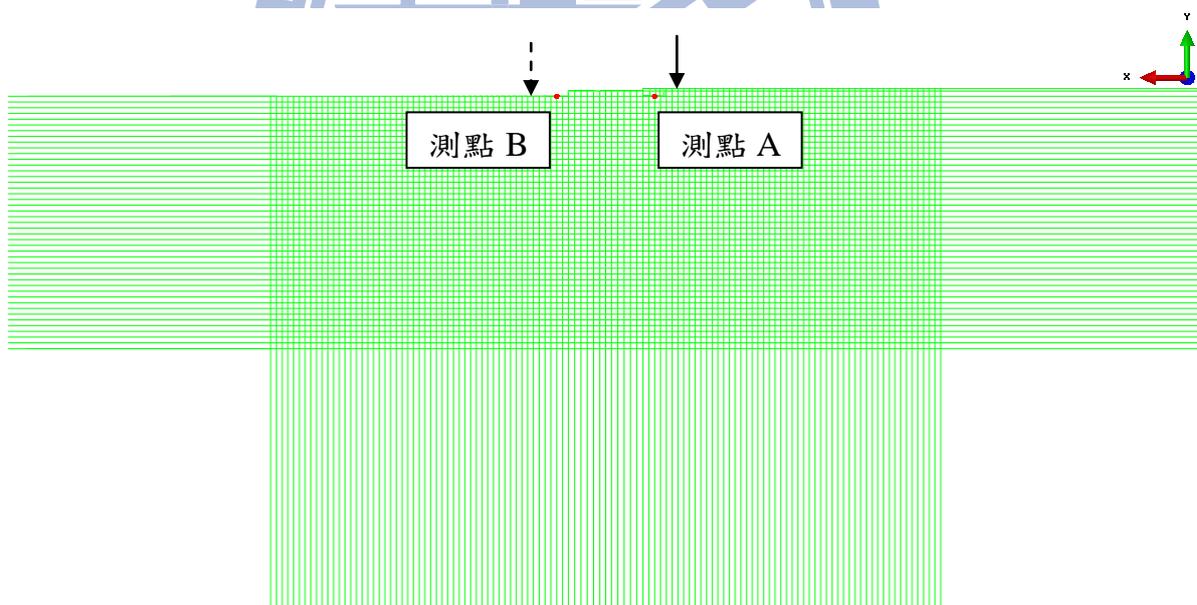
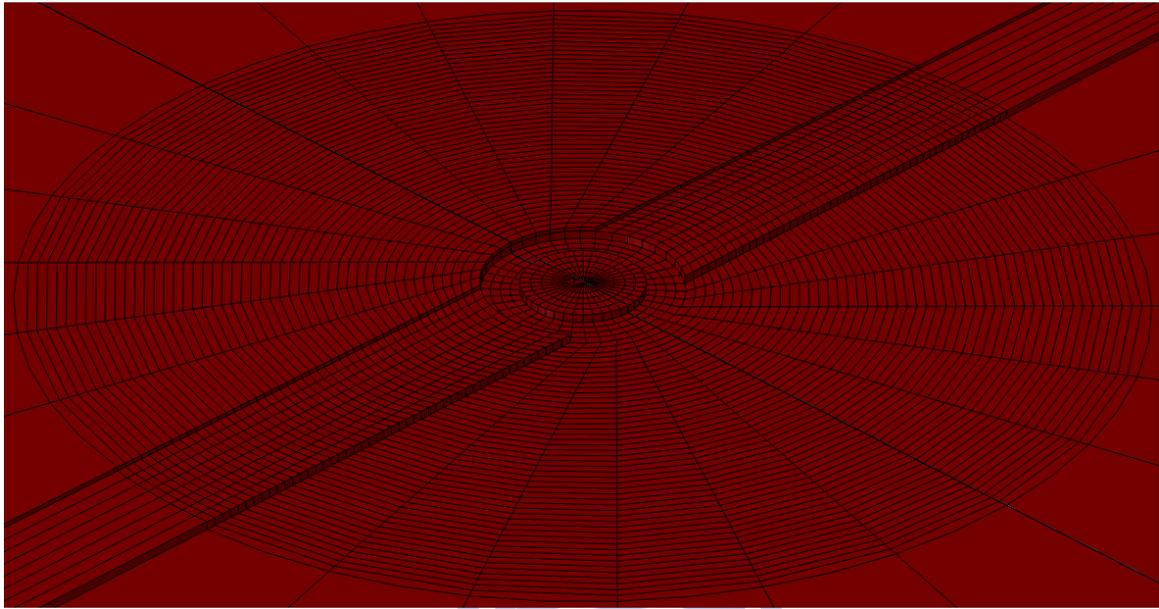
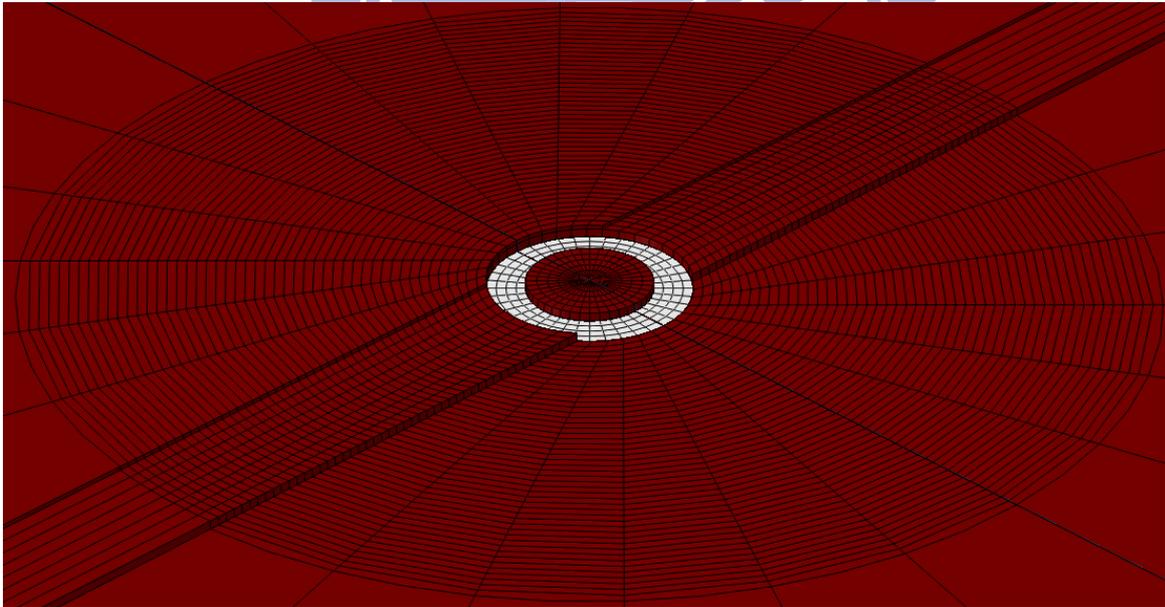


Fig. 5.2 施力點位置示意圖



(a) 無放置加速器環館



(b) 有放置加速器環館

Fig. 5.3 土壤半開挖分析之示意圖