

# 國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

不同砂土之阻尼比關係應用於減振箱之初步研究

A Study on the Relationship of Damping Ratio with different  
sands of Vibration Reduction Box

研究生： 呂銘浩

指導教授： 劉俊秀 博士

王端正 博士

中華民國 九十七年 九月

# 不同砂土之阻尼比關係應用於減振箱之初步研究

研究生：呂銘浩

指導教授：劉俊秀 博士

王端正 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

影響砂土阻尼比的因素包括砂土的緊密度、飽和度、細料含量等許多不同的因素。本研究首先利用幾個影響砂土阻尼比的因素，包括相對密度、飽和度、細料含量、頻率等，來探討該因素與阻尼比之間的關係，再利用外力敲擊試驗裝置，使其自由振動後，進而量測加速度值，而取得阻尼比。本研究利用砂土便宜且容易取得的特性，作為精密儀器的抗振阻尼材料，並利用本研究的結果，朝減振砂箱的研究方向前進。



關鍵字：阻尼比、微振、砂箱

# **A Study on the Relationship of Damping Ratio with different sands of Vibration Reduction Box**

**Student: MING HAO LYU**

**Advisor: Dr .GIN-SHOW LIOU**

**Dr . DUAN-JEN WANG**

**Institute of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University**

## **Abstract**

**The factors influencing damping ratio of sand in vibration reduction box are density, saturation, and fines content. The thesis is designed to study the damping ratio of vibration reduction sand box affected by the above mentioned factors. To do this, the impact loading is applied to the box and the time domain acceleration can be measured. Then one can attain damping ratio of the sand box . Based on the above results, the study could be useful to the further studies on vibration reduction sand box.**

**Key Words: Damping Ratio, Micro-Vibration, Sand Box**

## 致謝

感謝吾師 劉俊秀教授的悉心指導，在我遇到困境時能適時給予方向和協助，並於觀念上之諸多啟發，能完成本論文，還是要深深感謝老師二年來的教誨。同時感謝國家同步輻射中心 王端正博士這段時間的耐心指導，解答我許多困惑，並教導我在做人處事方面要用適當的態度去面對。另外感謝管建銑先生、賴惟揚先生，有你們的幫忙才能使本論文順利完成。

論文口試期間，感謝口試委員 洪士林教授、黃炯憲教授、鄭復平教授給予我指導與寶貴的意見，讓這本論文能夠更加完整。並感謝鍾瑜隆學長在論文上的指導與協助，解決我許多問題。以及同門的各位在研究上的互相幫忙，能讓我在撰寫論文期間更加順利。最後感謝人生中最好的朋友宗穎和羅開，使得這段期間多采多姿，也期盼友誼能夠長久。

最後感謝我的父母及家人，以及陪伴我的女友，謝謝你們在我遇到挫折時不斷的鼓勵我，使我能夠順利的完成學業。



# 目錄

摘要 .....	i
Abstract.....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	v
圖目錄 .....	vi
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機與方法 .....	1
1.2 本文架構 .....	1
1.3 研究方法與流程 .....	2
第二章 文獻回顧 .....	3
2.1 前言 .....	3
2.2 求取土壤動力性質方法 .....	3
2.3 影響阻尼比原因 .....	4
2.4 求取阻尼比理論公式 .....	5
第三章 儀器設備介紹 .....	10
3.1 試驗內容 .....	10
3.1.1 引言 .....	10
3.2 試驗土樣 .....	10
3.2.1 新竹海岸砂 .....	10
3.2.2 標準渥太華砂 .....	10
3.3 實驗設備與儀器 .....	11
3.1.1 PCB 加速規，如圖(3.6)所示 .....	11
3.1.2 PCB 電子式敲擊錘，如圖 (3-10) 所示 .....	12
3.1.3 LDS 訊號接收器，如圖 (3-11) 所示:.....	12
3.1.4 小型振動台，如圖 (3-12) 所示:.....	13
3.1.5 振動台訊號主機，如圖 (3-13) 所示:.....	13
3.1.6 垂直振動試驗盒，如圖 (3-14) 所示:.....	13
3.4 振動測量設定 .....	13
3.5 基本物理性質試驗 .....	14
3.5.1 比重 (比重瓶試驗) .....	14
3.5.2 粒徑分析試驗 .....	14
3.5.3 相對密度試驗 .....	15
3.5.4 細料含量試驗 .....	16
3.5.5 飽和度試驗 .....	16
第四章 試驗方法與分析 .....	18
4.1 試驗方法 .....	18
4.2 試驗結果與分析 .....	19
第五章 結論與建議 .....	26
5.1 結論 .....	26
5.2 建議 .....	27
參考文獻 .....	28

## 表目錄

表 3-1 新竹海岸砂 比重、最大乾密度、最小乾密度.....	29
表 3-2 渥太華標準砂比重、最大乾密度、最小乾密度.....	29
表 3-3 PVC 的材料特性.....	30
表 3-4 相對密度與土壤緊密度.....	30
表 4-1 新竹海岸砂.....	31
表 4-2 渥太華標準砂阻尼比.....	32
表 4-3 新竹砂阻尼比與施力大小.....	33
表 4-4 渥太華砂阻尼比與施力大小.....	33
表 4-5 振動試驗盒新竹砂之加速度值.....	34
表 4-6 振動試驗盒渥太華砂之加速度值.....	34
表 4-7 試驗振動結果整理.....	35



## 圖目錄

圖 1-1 材料之阻尼比.....	36
圖 2-1 臨界阻尼系統.....	36
圖 2-2 過阻尼系統.....	37
圖 2-3 不足阻尼系統.....	37
圖 2-4 阻尼比與對數衰減量關係圖.....	38
圖 2-5 諧和外力作用於單自由度系統.....	38
圖 2-6 頻譜圖.....	39
圖 3-1 新竹砂粒徑分佈曲線.....	39
圖 3-2 新竹砂放大 50 倍.....	40
圖 3-3 渥太華標準砂之包裝外觀.....	40
圖 3-4 渥太華標準砂粒徑分佈曲線.....	41
圖 3-5 渥太華標準砂放大 50 倍.....	41
圖 3-6 PCB 加速規.....	42
圖 3-7 加速規內部元件.....	42
圖 3-8 加速規固定方式.....	43
圖 3-9 加速規電阻原理.....	43
圖 3-10 PCB 電子式敲擊錘.....	44
圖 3-11 LDS 訊號接收器.....	44
圖 3-12 小型振動台.....	45
圖 3-13 振動台訊號主機.....	45
圖 3-14 垂直振動試驗盒.....	46
圖 3-15 系統單位設定.....	46
圖 3-16 本實驗監測功能.....	47
圖 3-17 施力大小監測.....	47
圖 3-18 加速度訊號擷取.....	48
圖 3-19 比重瓶實驗圖.....	48
圖 3-20 篩分析圖片.....	49
圖 3-21 篩分析設備.....	49
圖 4-1 新竹砂相對密度 30%、飽和度 0%、細料含量 0%時加速度.....	50
圖 4-2 新竹砂相對密度 30%、飽和度 0%、細料含量 5%時加速度.....	50
圖 4-3 新竹砂相對密度 30%、飽和度 0%、細料含量 10%時加速度.....	51
圖 4-4 新竹砂相對密度 30%、飽和度 25%、細料含量 0%時加速度.....	51
圖 4-5 新竹砂相對密度 30%、飽和度 25%、細料含量 5%時加速度.....	52
圖 4-6 新竹砂相對密度 30%、飽和度 25%、細料含量 10%時加速度.....	52
圖 4-7 新竹砂相對密度 30%、飽和度 50%、細料含量 0%時加速度.....	53
圖 4-8 新竹砂相對密度 30%、飽和度 50%、細料含量 5%時加速度.....	53
圖 4-9 新竹砂相對密度 30%、飽和度 50%、細料含量 10%時加速度.....	54
圖 4-10 新竹砂相對密度 30%、飽和度 100%、細料含量 0%時加速度.....	54
圖 4-11 新竹砂相對密度 30%、飽和度 100%、細料含量 5%時加速度.....	55
圖 4-12 新竹砂相對密度 30%、飽和度 100%、細料含量 10%時加速度.....	55
圖 4-13 新竹砂相對密度 50%、飽和度 0%、細料含量 0%時加速度.....	56
圖 4-14 新竹砂相對密度 50%、飽和度 0%、細料含量 5%時加速度.....	56

圖 4-15 新竹砂相對密度 50%、飽和度 0%、細料含量 10%時加速度.....	57
圖 4-16 新竹砂相對密度 50%、飽和度 25%、細料含量 0%時加速度.....	57
圖 4-17 新竹砂相對密度 50%、飽和度 25%、細料含量 5%時加速度.....	58
圖 4-18 新竹砂相對密度 50%、飽和度 25%、細料含量 10%時加速度.....	58
圖 4-19 新竹砂相對密度 50%、飽和度 50%、細料含量 0%時加速度.....	59
圖 4-20 新竹砂相對密度 50%、飽和度 50%、細料含量 5%時加速度.....	59
圖 4-21 新竹砂相對密度 50%、飽和度 50%、細料含量 10%時加速度.....	60
圖 4-22 新竹砂相對密度 50%、飽和度 100%、細料含量 0%時加速度.....	60
圖 4-23 新竹砂相對密度 50%、飽和度 100%、細料含量 5%時加速度.....	61
圖 4-24 新竹砂相對密度 50%、飽和度 100%、細料含量 10%時加速度.....	61
圖 4-25 新竹砂相對密度 70%、飽和度 0%、細料含量 0%時加速度.....	62
圖 4-26 新竹砂相對密度 70%、飽和度 0%、細料含量 5%時加速度.....	62
圖 4-27 新竹砂相對密度 70%、飽和度 0%、細料含量 10%時加速度.....	63
圖 4-28 新竹砂相對密度 70%、飽和度 25%、細料含量 0%時加速度.....	63
圖 4-29 新竹砂相對密度 70%、飽和度 25%、細料含量 5%時加速度.....	64
圖 4-30 新竹砂相對密度 70%、飽和度 25%、細料含量 10%時加速度.....	64
圖 4-31 新竹砂相對密度 70%、飽和度 50%、細料含量 0%時加速度.....	65
圖 4-32 新竹砂相對密度 70%、飽和度 50%、細料含量 5%時加速度.....	65
圖 4-33 新竹砂相對密度 70%、飽和度 50%、細料含量 10%時加速度.....	66
圖 4-34 新竹砂相對密度 70%、飽和度 100%、細料含量 0%時加速度.....	66
圖 4-35 新竹砂相對密度 70%、飽和度 100%、細料含量 5%時加速度.....	67
圖 4-36 新竹砂相對密度 70%、飽和度 100%、細料含量 10%時加速度.....	67
圖 4-37 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 0%.....	68
圖 4-38 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 25%.....	68
圖 4-39 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 50%.....	69
圖 4-40 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 100%.....	69
圖 4-41 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 0%.....	70
圖 4-42 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 25%.....	70
圖 4-43 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 50%.....	71
圖 4-44 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 100%.....	71
圖 4-45 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 0%.....	72
圖 4-46 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 25%.....	72
圖 4-47 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 50%.....	73
圖 4-48 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 100%.....	73
圖 4-49 新竹海岸砂在飽和度 0%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係.....	74
圖 4-50 新竹海岸砂在飽和度 25%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係.....	74
圖 4-51 新竹海岸砂在飽和度 50%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係.....	75
圖 4-52 新竹海岸砂在飽和度 100%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係.....	75
圖 4-53 新竹海岸砂在相對密度 30%、相同細料含量下，不同的飽和度與其阻尼比關係.....	76

圖 4-54	新竹海岸砂在相對密度 50%、相同細料含量下，不同的飽和度與其阻尼比關係	76
圖 4-55	新竹海岸砂在相對密度 70%、相同細料含量下，不同的飽和度與其阻尼比關係	77
圖 4-56	新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 0% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	77
圖 4-57	新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 25% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	78
圖 4-58	新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 50% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	78
圖 4-59	新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 100% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	79
圖 4-60	新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 0% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	79
圖 4-61	新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 25% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	80
圖 4-62	新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 50% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	80
圖 4-63	新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 100% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	81
圖 4-64	新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 0% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	81
圖 4-65	新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 25% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	82
圖 4-66	新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 50% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	82
圖 4-67	新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 100% 時，不同的細料含量與其阻尼比的關係	83
圖 4-68	渥太華標準砂在飽和度 0% 時，不同相對密度所對應的阻尼比	83
圖 4-69	渥太華標準砂在飽和度 25% 時，不同相對密度所對應的阻尼比	84
圖 4-70	渥太華標準砂在飽和度 50% 時，不同相對密度所對應的阻尼比	84
圖 4-71	渥太華標準砂在飽和度 100% 時，不同相對密度所對應的阻尼比	85
圖 4-72	渥太華標準砂在相對密度 30% 時，不同飽和度所對應的阻尼比	85
圖 4-73	渥太華標準砂在相對密度 50% 時，不同飽和度所對應的阻尼比	86
圖 4-74	渥太華標準砂在相對密度 70% 時，不同飽和度所對應的阻尼比	86
圖 4-75	新竹砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 50N	87
圖 4-76	新竹砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 100N	87
圖 4-77	新竹砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 150N	88
圖 4-78	新竹砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 50N	88
圖 4-79	新竹砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 100N	89
圖 4-80	新竹砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 150N	89
圖 4-81	新竹砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 50N	90
圖 4-82	新竹砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 100N	90
圖 4-83	新竹砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 150N	91

圖 4-84	渥太華砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 50N .....	91
圖 4-85	渥太華砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 100N .....	92
圖 4-86	渥太華砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 150N .....	92
圖 4-87	渥太華砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 50N .....	93
圖 4-88	渥太華砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 100N .....	93
圖 4-89	渥太華砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 150N .....	94
圖 4-90	渥太華砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 50N .....	94
圖 4-91	渥太華砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 100N .....	95
圖 4-92	渥太華砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 150N .....	95
圖 4-93	試驗盒加速規裝置圖 .....	96
圖 4-94	二個加速規在鐵片上不同處量測其加速度值証明鐵片無擾動 .....	96
圖 4-95	加速規在裝置底部、5HZ 時之加速度歷時 .....	97
圖 4-96	加速規在裝置底部、10HZ 時之加速度歷時 .....	97
圖 4-97	加速規在裝置底部、20HZ 時之加速度歷時 .....	98
圖 4-98	加速規在裝置底部、30HZ 時之加速度歷時 .....	98
圖 4-99	加速規在裝置底部、40HZ 時之加速度歷時 .....	99
圖 4-100	加速規在裝置底部、50HZ 時之加速度歷時 .....	99
圖 4-101	加速規在裝置底部、60HZ 時之加速度歷時 .....	100
圖 4-102	新竹海岸砂，5HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	100
圖 4-103	新竹海岸砂，5HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	101
圖 4-104	新竹海岸砂，10HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	101
圖 4-105	新竹海岸砂 10HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	102
圖 4-106	新竹海岸砂，20HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	102
圖 4-107	新竹海岸砂 20HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	103
圖 4-108	新竹海岸砂 30HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	103
圖 4-109	新竹海岸砂 30HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	104
圖 4-110	新竹海岸砂 40HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	104
圖 4-111	新竹海岸砂 40HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	105
圖 4-112	新竹海岸砂 50HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	105
圖 4-113	新竹海岸砂 50HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	106
圖 4-114	新竹海岸砂 60HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	106
圖 4-115	新竹海岸砂 60HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	107
圖 4-116	渥太華標準砂 5HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	107
圖 4-117	渥太華標準砂 5HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	108
圖 4-118	渥太華標準砂 10HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	108
圖 4-119	渥太華標準砂 10HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	109
圖 4-120	渥太華標準砂 20HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	109
圖 4-121	渥太華標準砂 20HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	110
圖 4-122	渥太華標準砂 30HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	110
圖 4-123	渥太華標準砂 30HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	111
圖 4-124	渥太華標準砂 40HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	111
圖 4-125	渥太華標準砂 40HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	112
圖 4-126	渥太華標準砂 50HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 .....	112
圖 4-127	渥太華標準砂 50HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 .....	113

圖 4-128 渥太華標準砂 60HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時 ..... 113  
圖 4-129 渥太華標準砂 60HZ、飽和度 100% 垂直振動之加速度歷時 ..... 114



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與方法

隨著科技的進步，高科技所使用的精密儀器也隨之發展出來，而這些精密儀器運作時如果受到外部振動干擾時容易對儀器量測產生誤差值因而影響到測量結果的判讀。此規劃設計減振砂箱裝置來降低外在環境所產生的微小振動，由圖(1-1)[1]可知，砂的阻尼比與鋁、鐵、玻璃等許多材料較為高，同時兼顧便宜的條件下，選用砂箱作為減振的材料。本研究為此計劃的初步研究，主要是討論不同砂土在不同相對密度、飽和度、細料含量、施力大小所對應的阻尼比對於減振砂箱的減振效果，希望藉由上述不同之特性找到砂土減振的最佳化。求取阻尼比的試驗主要為外力敲擊作用而得到土壤或砂石的自由衰減曲線。本研究以敲擊外力作用為主，並控制不同的影響因素，包括不同的相對密度、飽和度、細料含量、施力大小來討論其試驗砂樣的阻尼比關係。並探討試驗土樣在不同的外力頻率作用下之減振效果。

## 1.2 本文架構

第一章為研究的動機與方法，說明研究的目的，與本文的架構。第二章為文獻回顧，敘述前人的一些研究結論。第三章為試驗儀器、軟體介紹，以及介紹試驗土樣的基本物理性質、物理試驗步驟。第四章為介紹試驗的步驟，並根據試驗的結果作分析。第五章為試驗的結論及建議。

### 1.3 研究方法與流程

本研究的試驗包括三個部份：

#### 1. 試驗砂物理試驗：

物理試驗包括比重試驗、粒徑分析、相對密度、細料含量以及飽和度試驗，以作為試驗砂樣的基本判別。

#### 2. 外力敲擊作用試驗：

外力敲擊主要是利用固定外力敲擊不同試驗因素的砂樣，藉此求得阻尼比，並討論在何種情況下的阻尼比較好。

#### 3. 頻率外力振動試驗：

利用振動台控制不同的頻率，並在試驗盒的底部與試驗砂樣的上方同時放置二個加速規，藉此量測裝置在不同控制因素下有砂與沒砂其加速度的差異值大小，而探討其減振效果。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 前言

土壤或砂土受振動來源可以分成地震與人為作用，地震有時候造成的振動小，但有時候卻挾帶強大的能量，造成劇烈的搖晃使得地面上的結構損毀倒塌，而造成許多嚴重的傷亡和財務的損失。人為作用造成的振動有許多，例如機械工廠機器產生的振動，大部分都是週期性的振動，鑽地鋪路的振動，車輛駕駛路面也會造成輕微振動，造橋蓋房子也會造成振動等等。但人為振動較地震的振動量小，不管人為振動或地震，都是現在主要研究的題目。

### 2.2 求取土壤動力性質方法



王金山[2]文中提到，求取土壤動力性質的方法分為二大類，一種是在現場直接量測，另外一種則是在室內試驗求得，下面就介紹上述二大類的求取方法：

#### 一、 室內試驗：

將現場取樣的土壤或者是在實驗室作試體，經由振動後求取土壤的動力參數，以下有六種方法

1. 振動單剪試驗
2. 振動扭剪試驗
3. 振動三軸試驗
4. 超音波振動試驗

5. 共振柱試驗

6. 振動台試驗

## 二、 現地試驗

利用震波來測量土壤不同土層的波傳性質，求得土壤的縱波與橫波，藉以求得動力參數，但是唯一的缺點是沒有辦法得到土壤的阻尼比，以下就是現地試驗所使用的五種方法；

1. 折射震測法

2. 單孔震測法(上孔與下孔震測法)

3. 跨孔震測法

4. 地表震測法

5. 共振基礎震測法

### 2.3 影響阻尼比原因



主要影響原因包括有效圍壓、孔隙比、細料含量、飽和度、荷重作用頻率與作用次數等、以下就是影響阻尼比因素的一些說明：

#### 1. 細料含量

Iwasaki 與 Tatsuoka [3]針對細料含量(1%-14%)對砂土阻尼比影響的研究結果指出，阻尼比隨細料含量之增加而輕微增加，但此項關係還相當分散。葉國樑的研究[4]指出，針對雲林外海砂樣，細料含量對阻尼比的影響並不明顯。簡連貴對雲林工業區的砂樣所做的研究[5]指出，細料含量與阻尼比沒有明顯的關係。林中平研究[6]指出細料含量在 2%-5%之間的福隆砂，其阻尼比隨著細料含量的增加而呈線性增加。陳昱憲之研究[7]說明阻尼比隨著細料含量之增加所呈現的變化趨勢不明顯。

## 2. 孔隙比

Silver 和 Seed (1971) 的研究[8]指出，孔隙比與砂土阻尼比的並沒有明顯的關係可判斷。Hardin 及 Drnevich (1972) [9]認為孔隙比對阻尼比沒有明顯的影響，但是對於不擾動原來土壤，阻尼比則隨孔隙比的增加而減小。Hall 與 Richart [10]的研究內容顯示，孔隙比的變化對阻尼比並沒有明顯的影響。陳昱憲 (1999) [7]之研究指出阻尼比隨著孔隙比的增加所呈現的變化趨勢並不明顯。

### 2.4 求取阻尼比理論公式

林永盛的結構動力學[11]中提到，求阻尼比的公式有二種，一種是自由振動衰減曲線法 (free vibration decay method)，另一種是半功率頻寬法 (half power bandwidth method)。以下將簡述此二種方法：

#### 1. 自由振動衰減曲線法

在許多的事實顯示，任何結構系統之自由振動終必停止，此表明在振動過程中多少具有能量的耗損。但能量耗損的機構頗為複雜，為了數學上之解析方便，所以取為黏滯性阻尼，使得 SDOF 系統之運動方程式具有下列形式：

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.1)$$

其中：m 為質量

c 為阻尼係數

k 為彈簧彈性係數

u(t) 為位移

上式 u(t) 之解為指數形式，即

$$u(t) = Ge^{\lambda t} \quad (2.2)$$

將 (2.2) 式帶入 (2.1) 式中，可得其特徵方程式為：

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad (2.3)$$

(2.3)式依照阻尼振動方式可以分成下列三種情形：

### (1) 臨界阻尼系統

系統阻尼係數  $c$  等於臨界阻尼係數  $C_c$ ，此時阻尼比  $\xi = 1$ ，稱做臨界阻尼系統 (critical damped)，如圖 (2-1)所示，此時(2.3)式所表示之二根為相等實根，即  $\lambda_1 = \lambda_2 = -\omega$

### (2) 過阻尼系統

當系統之阻尼係數  $c$  大於臨界阻尼係數  $C_c$ ，即阻尼比  $\xi > 1$  時，稱為過阻尼系統 (overdamped system)，如圖 (2-2)所示，此時(2.3)式所表示的二根為相異二實根，即  $\lambda_1 = (-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega$ ，  
 $\lambda_2 = (-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega$

### (3) 低阻尼系統

土壤的自由振動屬於低阻尼系統行為，幾乎所有結構振動系統均屬於此種狀況。當系統之阻尼係數  $c$  小於臨界阻尼係數  $C_c$ ，即阻尼比  $\xi < 1$  時，稱為低阻尼系統 (underdamped system)，如圖 (2-3)所示，此時 (2.3)式之二根為共軛複數，即

$$\lambda_1, \lambda_2 = -\xi\omega \pm i\omega\sqrt{1 - \xi^2} = -\xi\omega \pm i\omega_d$$

其中， $\omega_d = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$   $\omega_d$  稱為阻尼自然頻率 (damped natural frequency)。而低阻尼系統之自由振動，其位移之幅值隨著時間呈指數衰減，衰減率 (rate of decay) 則與阻尼比  $\xi$  有關係，在低阻尼之範

圍 (即  $0 < \xi < 1$ )，顯然  $\xi$  越大位移衰減越迅速。

在圖 (2-3) 中，因任意二時刻所對應的位移與時間  $t$  無關，所以對該比值取自然對數，稱為對數遞減量 (logarithmic decrement)，以  $\delta$  表示，即

$$\delta = \ln \frac{u_1}{u_2} = 2\pi\xi \frac{\omega}{\omega_d} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.4)$$

當土壤阻尼比小於 0.2 時，(2.4) 式可簡化成

$$\delta = 2\pi\xi \quad (2.5)$$

可由 (2.4) 式求得阻尼比  $\xi$  為，並求得對數衰減量與阻尼比的關係如圖(2-4)

$$\xi = \frac{\delta/2\pi}{\sqrt{1 + (\delta/2\pi)^2}} \quad (2.6)$$

若  $\delta$  很小 (即  $\xi$  很小)，則 (2.6) 式得近似為

$$\xi \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (2.7)$$

## 2. 半功率頻寬法

若以某簡單施力設備對結構系統施加諧和激振力  $p_0 \sin \omega t$ ，如圖(2-5) 所示使其激振頻率  $\omega$  在系統自然頻率  $\omega$  之左右附近操作，並利用記錄儀器測量每次操作之對應位移振幅  $A$ ，然後將  $A$  繪成  $\omega$  之函數圖形，如圖 (2-6) 所示，當結構於共振時，即  $\beta = 1$ ，

可由  $D_{\max} = \frac{1}{2\xi} = D_{\beta=1}$  式得知

$$\xi = \frac{1}{2D_{\beta=1}} = \frac{u_{st}}{2A_{\beta=1}} \quad (2.8)$$

(2.8) 式中  $u_{st}$  為靜力位移，而  $A_{\beta=1}$  則為共振時之振幅。雖然利用 (2.8) 式可得  $\xi$ ，實際上試驗時，要正好調到共振頻率是有困難的，一般則利用略低於共振頻率時之最大反應振幅  $A_{\max}$ ，由

$$D_{\max} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad \text{可得下列式子：}$$

$$\xi = \frac{1}{2D_{\max}} \frac{\omega}{\omega_d} \approx \frac{u_{st}}{2A_{\max}} \quad (2.9)$$

利用 (2.9) 式來估算系統組尼比  $\xi$ ，基本上仍存在一個問題，即如何施加近乎於靜態之載重到結構系統上，以便求得所需之靜立位移  $u_{st} = P_0/k$ ，因許多施力設備都無法在  $\omega = 0$  之情況下操作。

但觀察圖 (2-6) 之反應曲線，可發現系統阻尼之大小很明顯地影響曲線形狀之變化，因此，一曲線上二個具有相同反映振幅之不同二頻率間之差異，稱為帶寬 (bandwidth)，於圖 (2-6) 試驗所得之代表 A- $\beta$  反應曲線上，若取最大振幅之  $1/\sqrt{2}$  處之帶寬所對應之二個頻率比為  $\beta_1$  與  $\beta_2$ ，則對  $\beta_1$  而言

$$\frac{1}{\sqrt{2}} A_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{u_{st}}{2\xi} = \frac{u_{st}}{[(1-\beta_1^2)^2 + (2\xi\beta_1)^2]^{1/2}}$$

二邊平方，消去  $u_{st}$  得

$$\frac{1}{8\xi^2} = \frac{1}{(1-\beta_1^2) + (2\xi\beta_1)^2}$$

解出  $\beta_1^2$  為(根式前取負號)

$$\beta_1^2 = 1 - 2\xi^2 - 2\xi\sqrt{1 + \xi^2}$$

解出  $\beta_2^2$  為(根式前取負號)

$$\beta_2^2 = 1 - 2\xi^2 + 2\xi\sqrt{1 + \xi^2}$$

所以阻尼比  $\xi$  為

$$\xi = \frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1) = \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega}\right) \quad (2.10)$$

由 (2.10) 式評估系統阻尼的方法稱為半功率頻寬法。



## 第三章 儀器設備介紹

### 3.1 試驗內容

#### 3.1.1 引言

本研究分別使用新竹海岸砂以及渥太華標準砂(Ottawa)在不同的施力大小、不同的相對密度(30%、50%、70%)、不同的飽和度(0%、25%、50%、100%)，以及不同的細料含量(0%、5%、10%)下，觀察其二種砂在不同情況下所對應的阻尼比，並儘可能找到相對密度、飽和度、以及細料含量與阻尼比之間的關係。此外，本研究分為二種試驗，一為垂直單自由度外力試驗，二為垂直單自由度振動台試驗。



### 3.2 試驗土樣

#### 3.2.1 新竹海岸砂

本研究試驗用砂為新竹新月海灘附近的海岸砂，其細料含量大約為2-4%之間。其分別做出比重、最大及最小乾密度、如表 (3-1) 所示，含水率、粒徑分佈區線，如圖 (3-1) 所示，等基本物理性質，圖 (3-2) 為顯微鏡放大 50 倍照片。

#### 3.2.2 標準渥太華砂

本研究考慮以 ASTM 標準砂作為比較用的砂，其來源來自加拿大渥太華出產的石英砂 (Ottawa silica sand)，因渥太華砂有分二種，一種是細料含量為 0%、比重 2.65，另外一種為細料含量為 18%、比重 2.62，本研究採用細料含量為 0%、比重 2.65 的標準渥太華砂為比較用砂，其外觀包裝如圖 (3-3) 所示，而基本物理性質如表 (3-2) 所示，粒徑分佈曲線如圖 (3-4) 所示，圖 (3-5) 為顯微鏡放大 50 倍照片。

### 3.3 實驗設備與儀器

#### 3.1.1 PCB 加速規，如圖(3.6)所示

##### 1. PCB 加速規介紹說明，如下所示：

加速規是一種電機式感測器，可輸出與振動加速度力成比例的電子信號，加速規由一個或數個盤形或條狀壓電元件組成，使用一個或數個耐震物質置放壓電元件上方或側邊，所以彈簧保持在適當的位置如圖(3.7)所示，當振動外力加入時，加速規耐震物質會施加一變化的力量於壓電元件上，此壓電元件因壓電效應產生對應的電荷。

當加速規頻率增加到大約加速規共振頻率的三分之一時，耐震物質的加速度等於整個感應器的加速度。因此，壓電元件產生的電荷與施加到感應器的加速度成比例，由感應器的輸出端測量電荷量，可精確的測定振動的振幅，頻率與波形。

##### 2. PCB 加速規之安裝：

測試時加速規必須固定在待測物上，特別是在高頻狀況下，可以得到可靠的測試結果，加速規之高頻性能的穩定程度，幾乎完全取決於被牢固的程度，同理亦知加速規之安裝與頻率響應有密切關係，即當加速規被固定在其他設備上的時候，通常諧振頻率會降低，圖(3-8)為幾種固定加速規之方法、本試驗使用加速規的規格如下：

1000 mV/g(同時為本次試驗加速規設定之靈敏度)

100 mV/(m/s<sup>2</sup>)

0.3~4000 Hz

10μg resolution

##### 3. PCB 加速規原理

通常整個信號處理系統之主要功能為：

(1) 將加速規之高輸出阻抗轉變為較低之阻抗

(2) 將加速規之微弱輸出信號加以放大，以提供做下一級電路處理。

信號處理電路有二種主要的形式：電壓放大器 (voltage amplifier) 即電荷放大器 (charge amplifier)，其中電壓放大器可提供相當高的阻抗給加速規，並且可維持在低輸入電容狀態下以避免靈敏度損失。另外在電荷放大器中卻是提供高輸入電容值及阻抗給加速規，如圖 (3-9) 所示即為使用電荷放大器，它允許與加速規以非常長的導線連接著(甚至可能達到 500 公尺以上)，而不會對整個加速規或前置放大器的系統靈敏度有所影響。有時為了達到處理靈敏度問題的目的，也可將信號處理電路採用其他方式的設計，如組合式網路或是低通濾波器，高通濾波器等電路，這類的電路可直接調整參數以達到典型的加速規靈敏度，也會使得測量系統之標準化逐漸可行，本設備是將信號處理電路合併在加速規之內部以利測量。

### 3.1.2 PCB 電子式敲擊錘，如圖 (3-10) 所示

電子式敲擊錘使用方法為連接 LDS 的訊號接收器(下麵介紹)，而施力於受測試體後，LDS 訊號接收器會接收到一電阻，並透過軟體轉換成施力大小，此時就可以判別力量作用於試體為多大。其這次使用的 PCB 電子式敲擊錘規格如下：

10 mv/lb (2.2mv/n) sensitivity

8000 hz frequency range

0.34 lb (0.16kg) hammer mass

(以上規格來源於譜威科技)

### 3.1.3 LDS 訊號接收器，如圖 (3-11) 所示:

LDS 訊號接收器可使任何筆記型電腦與平板電腦成為一台可攜式、多通道，且高品質的分析設備，採 usb 介面供電，2-4 個輸入通道、1 個輸出、24-bit 解析度。

### 3.1.4 小型振動台，如圖 (3-12) 所示：

以振動台的主機控制，可輸出頻率從 0-150Hz，方向為單一自由度，其運動模式，由加速度規濾定之，為近似簡諧運動 (Simple Harmonic motion)，固可藉由控制其頻率與振幅來達到試驗所需的最大加速度。

### 3.1.5 振動台訊號主機，如圖 (3-13) 所示：

訊號主機接上 220V 的電源後，調整頻率以及振幅值即可使振動台輸出試驗所需的最大加速度。

### 3.1.6 垂直振動試驗盒，如圖 (3-14) 所示：

因為加速規的底部為強力磁鐵，為了使加速規容易吸附在試驗盒底部，所以在試驗盒的最底下設計了材料為鐵的材質，接下來，若要使最底部的受力狀況完全傳遞到最頂部，則材料方面就選擇了 PVC，PVC 的材料特性如表 (3-3)，PVC 材質能傳遞力的大小而幾乎不減少能量



## 3.4 振動測量設定

本試驗所使用的軟體為 RT Pro user guide 6.0 的監測軟體，主要的設定如下：

Frequency range : 1Hz-60Hz

Sensor sensitivity : 10 V/G

Linear average

Hanning window

Analysis points : 2048

Frame number : 5

測量單位設定為  $Gn = Gal = cm / s^2$

獲得 data 後可連接轉換成其他軟體所需的格式，如 matlab、excel 等可供方便利用。

接下來是這款軟體的操作介面，一開始進去後會有清單選項、系統單位設定，如圖 (3-15)，可供選擇其所需的功能，接下來選取本實驗所需功能，如圖 (3-16) 所示，其功能有施力大小圖 (3-17)、加速度訊號擷取，如圖 (3-18)，經過接收實驗數據後，即可得到實驗所需的阻尼比。

## 3.5 基本物理性質試驗

### 3.5.1 比重 (比重瓶試驗)

利用比重瓶試驗測定土壤顆粒之比重，以分析土壤重量與體積之關係及其他相關計算。在圖 (3-19) 中， $W_1$  或  $W_3$  加土粒時多少在土粒間會有氣泡存在，影響土粒體積之測定，因此試驗時應以煮沸法排除氣泡。試驗時，先將土樣烘乾 24 小時，再把土糰敲碎過 4 號篩，倒入比重瓶，加蒸餾水淹過土樣，再將比重瓶加熱煮沸 10-15 分鐘，以排除氣泡，待冷卻後再加蒸餾水至某一刻劃，將瓶外表面擦乾，秤重，之後將瓶內土及水倒出，清洗乾淨，加同溫度之蒸餾水至同一刻劃，將瓶外表面水擦乾，再秤重，並計算 土粒淨重 / 同體積  $4^{\circ}\text{C}$  蒸餾水量，即可求得土壤比重  $G_s$ 。

### 3.5.2 粒徑分析試驗

將試驗土樣烘乾後土樣通過細網由大而小之不同篩號，分別計算停留各篩上之重量百分比，再以土壤粒徑為橫座標，累積通過重量百分比為縱座標。繪於半對數座標紙上，求取粒徑分部曲線。試驗時應將大顆粒表面的細料以毛刷刷下才過篩。本實驗用篩號為 #4、#8、#20、#40、#60、#100、#200 等，實驗篩的圖片如圖 (3-20)、(3-21) 所示。在粒徑分部曲線上可求得下列三個特徵值，作為土壤分類及工程性質之判斷。

#### 1. 有效粒徑 (Effective size) $D_{10}$ :

為粒徑分部曲線上累積通過百分比為 10% 所對應之粒徑。

## 2. 均勻係數 (Coefficient of Uniformity) $C_u$ :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{均勻細數可研判土壤是否為均勻級配。}$$

## 3. 曲率係數 (Coefficient of Curvature) $C_d$ :

$$C_d = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

式中  $D_{30}$  : 為粒徑分部曲線上，累積通過百分比為 30% 所對應之粒徑。

$D_{60}$  : 為粒徑分部曲線上，累積通過百分比為 60% 所對應之粒徑。

曲率細數可研判土壤是否為殘缺級配。

### 3.5.3 相對密度試驗

評估粒狀土壤緊密度的指標，通常以相對密度 (Relative Density) 或稱密度指數 (Density Index) 表示。相對密度定義如下：


$$DR = \frac{r_{d,\max}(r_d - r_{d,\min})}{r_d(r_{d,\max} - r_{d,\min})} \quad (3.1)$$

式中  $r_{d,\max}$  : 最大乾土單位重

$r_{d,\min}$  : 最小乾土單位重

$r_d$  : 現場土壤乾土單位重

土壤的相對密度是由 (3.1) 式求得，其中的最大乾密度  $r_{d,\max}$  與最小乾密度  $r_{d,\min}$  的求法如下：

#### 1. 最大乾密度 $r_{d,\max}$ 之求法

首先將待試驗的土樣烘乾，並把土粒全部打散，接著於振動臺上以 8

分鐘振動後，使試驗的土樣變緊密後，拿掉套筒以及加重塊，計算緊密土樣的體積，即可求得最大乾密度  $\rho_{d,max}$ 。

## 2. 最小乾密度 $\rho_{d,min}$ 之求法：

也是先將試驗的土樣烘乾，並把土粒全部打散，並以 2.5cm 之固定落下高度，使土樣自由落體至鐵模內，直到填滿為止，刮平土樣後，秤鐵模加上土樣的重量為  $W_1$ ，秤鐵模重為  $W_2$ ，疏鬆土樣重即為  $W_{min} = W_1 - W_2$ ，在計算土樣體積  $V = \frac{1}{4}(\pi D^2 H)$ ，D 為鐵模內的半徑、H 為鐵模高度。

知道  $W_{min}$  及土樣體積 V 後即可求得最小乾密度  $\rho_{d,min}$ 。而相對密度通常應用在判斷土壤的緊密度，通常以表(3-4)來做為研判。

### 3.5.4 細料含量試驗

將試驗土樣放入烘箱內烘乾，烘乾後再把試驗土樣做篩分析，搖篩二十分鐘後，通過 200 號篩(0.075mm)的土樣，即定義為細料，再依據試驗所需的細料含量，而加入所需的細料於試驗土樣內即可得到本次實驗所需的 0%、5%、10%。

### 3.5.5 飽和度試驗

飽和度的定義為水在土壤或砂空隙中所佔的體積百分比，飽和度的試驗步驟為先將土樣放在烘箱內烘乾 (恆溫 105 度)，烘乾後即為乾燥砂土。接著秤出適當的乾燥土樣，加上不同飽和度所需預定含水量添加的水量，分批加入實驗裝砂容器中均勻混合，即可達到本次實驗所需的飽和度 0%、25%、50%、100%。

以下為飽和度的公式：

$$S = \frac{G_s \times w}{e} \times 100\% \quad (3.3)$$

$$e = \frac{G_s \times r_w}{r_d} - 1 \quad (3.4)$$

其中： S： 飽和度

G<sub>s</sub>： 比重

w： 含水量

e： 孔隙比

r<sub>d</sub>： 天然乾密度



## 第四章 試驗方法與分析

### 4.1 試驗方法

#### 1. 垂直單自由度外力試驗：

將新竹海岸砂分別規劃以相對密度 30%、50%、70%，飽和度 0%、25%、50%、100%，細料含量 0%、5%、10%，等總共 36 種試體情況填入振動試驗盒中圖(3-14)，其次是渥太華標準砂也是分別以相對密度 30%、50%、70%，飽和度 0%、25%、50%、100%總共 12 種試體情況，分別分三次夯實填入振動試驗盒中圖(3-14)，接著利用 PCB 加速規圖(3-8)吸附在鐵片(60mm\*60mm\*20mm)後，將鐵片埋入砂內加速規則露出，放置在試驗土樣的上方測量其加速度歷時，之後安裝好電腦以及監測軟體 Pro user guide 6.0 (第三章介紹)後，利用 LDS 電子式敲擊錘圖(3-10)垂直敲擊振動試驗盒的底部鐵片(施力大小控制在  $100\text{N} \pm 5\text{N}$ )，即可求得上述不同情況下(相對密度、飽和度、細料含量)的加速度歷時，進而求出其不同狀況下所對應的阻尼比。

#### 2. 施力大小試驗：

將新竹海岸砂以及渥太華標準砂分別裝入振動試驗盒中，利用 50N、100N、150N 的外力作用敲擊試驗盒的底部鐵片，而二種土樣砂狀況分別控制為(相對密度 30%、飽和度 0%)、(相對密度 50%、飽和度 0%)、(相對密度 70%、飽和度 0%)，以求取阻尼比，目的為看施力大小與阻尼比之間有無任何明顯關係。

#### 3. 垂直單自由度振動台試驗：

本試驗使用振動台圖(3-12)及振動台訊號控制器圖(3-13)產生垂直單自由度振動，並控制試驗所需的頻率值，接著將振動試驗盒圖(3-14)用螺絲鎖住固定在振動臺上，接著在振動試驗盒中放入新竹海岸砂(相對密度 70%、

細料含量 2.1%、飽和度 0%)、(相對密度 70%、細料含量 2.1%、飽和度 100%) 二種情況以及渥太華標準砂(相對密度 70%、細料含量 0%、飽和度 0%)、(相對密度 70%、細料含量 0%、飽和度 100%)二種情況，土樣砂放入試驗盒後，設置二個加速規分別固定在試驗盒底部以及土樣砂上方，利用二個加速規的好處為可同時監測沒砂和裝砂後的加速度值，以利探討其裝砂後的減振效果。接著分別以 5Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz、60 Hz 作垂直振動，觀察其二種砂在不同頻率振動下所對應的不同加速度，再以結果來作探討。

## 4.2 試驗結果與分析

### 1. 垂直單自由度外力試驗結果與分析

新竹海岸砂的部分在相對密度 30%、飽和度 0%、細料含量為 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時如圖(4-1)~圖(4-3)，量測到加速度值為 0.24 gal，在相對密度 30%、飽和度 25%、細料含量為 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-4)~圖(4-6)，在相對密度 30%、飽和度 50%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-7)~圖(4-9)，與圖(4-1)~圖(4-6)比較，加速度值為 0.24 gal，與之前量測差異不大，阻尼比也無明顯變化，在相對密度 30%、飽和度 100%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-10)~圖(4-12)，而圖(4-10)~圖(4-12)的整體阻尼比大約為 0.0387 相較於圖(4-1)~圖(4-9)略為提升。

在相對密度 50%、飽和度 0%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-13)~圖(4-15)，所對應阻尼比為 0.0377，在相對密度 50%、飽和度 25%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-16)~圖(4-18)，至目前來看，細料含量所對應的阻尼比並無明顯關係，在相對密度 50%、飽和度 50%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加

速度歷時圖如圖(4-19)~圖(4-21)，加速度值約為 0.22-0.24 gal 之間，在相對密度 50%、飽和度 100%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-22)~圖(4-24)，加速度值大約為 0.24 gal，圖(4-13)-圖(4-24)與圖(4-1)-圖(4-12)比較可發現，相同的飽和度下，相對密度 50%所對應的阻尼比都比相對密度 30%時候的阻尼比來的高一點。

在相對密度 70%、飽和度 0%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-25)~圖(4-27)，所對應阻尼比為 0.0386，與圖(4-1)-(4-3)、圖(4-13)-(4-15)比較，阻尼比為最好，在相對密度 70%、飽和度 25%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-28)~圖(4-30)，在相對密度 70%、飽和度 50%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-31)~(4-33)，在相對密度 70%、飽和度 100%、細料含量 0%、5%、10%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-34)~圖(4-36)，在圖(4-25)-圖(4-36)中，阻尼比約略都為 0.039 左右，最高則在 0.0425，由此可知相同情況下相對密度 70%時整體阻尼比為最高，而在相對密度 70%時，又以飽和度 100%時的阻尼比為最高。

渥太華標準砂方面，在相對密度 30%、飽和度 0%、25%、50%、100%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-37)~圖(4-40)，這四張圖說明當飽和度不同時，以飽和度 100%時的阻尼比最大，結果顯示與新竹海岸砂相同。

在相對密度 50%、飽和度 0%、25%、50%、100%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-41)~圖(4-44)，圖(4-41)~圖(4-44)的加速度值大約為 0.24 gal-0.28 gal，比新竹海岸砂約大 0.2 gal，而減振曲線也較新竹砂來的稍慢，圖(4-41)-圖(4-44)與圖(4-37)-圖(4-40)相比，可知相對密度 50%整體阻尼比約為 0.034，較相對密度 30%時的阻尼比 0.032 高。

在相對密度 70%、飽和度 0%、25%、50%、100%時，所得到的加速度歷時圖如圖(4-45)~圖(4-48)，此四張圖與前面圖(4-37)-圖(4-44)比較，整

體阻尼比更為提高一些，大約在 0.036，顯示了在相對密度 70%時的整體阻尼比最佳，而在相對密度 70%時，飽和度 100%的阻尼比 0.0365 為最高。

#### 試驗分析:

阻尼比方面，新竹海岸砂在不同情況下(相對密度、飽和度、細料含量)利用上述的加速度歷時圖對時間積分轉換成位移歷時圖後，即可利用第二章介紹的自由衰減曲線法求得不同情況所對應的阻尼比，其中表(4-1)為新竹海岸砂在不同情況所對應的阻尼比，表(4-2)為渥太華標準砂在不同情況所對應的阻尼比。

在上述不同的控制因素下所對應的阻尼比之間的關係歸納如下: 新竹海岸砂在相同飽和度、相同細料含量下，不同的相對密度與其阻尼比關係由圖(4-1)~圖(4-36)的加速度歷時的結果歸納成圖(4-49)~圖(4-52)，上面四張圖說明，在相同飽和度、相同細料含量下，相對密度越大所對應的阻尼比也就輕微增大。其結論推測為當相對密度增加時，砂土與砂土之間的孔隙變小，造成砂土間的顆粒接觸面積變大，在受到外力作用的時候，磨擦所產生的能量增大，因而造成能量消散也越大，所以在相對密度越大的情況之下，其所對應的阻尼比也隨之增加。

在相同的相對密度、相同細料含量下，不同的飽和度與其阻尼比關係由圖(4-37)~圖(4-48)的加速度歷時的結果歸納成圖(4-53)~圖(4-55)、上面三張圖說明在相同的相對密度、相同細料含量下，其飽和度 100%的阻尼比大於其飽和度未達 100%的阻尼比，但阻尼比隨著飽和度的增加並無明顯關係。當土壤孔隙中有水的時候，有外力作用下，水充當著潤滑的角色，所以能量消耗較小，此為飽和度 25%以及飽和度 50%之阻尼比，較飽和度 0%的阻尼比小的原因。飽和度 100%的阻尼比大於其飽和度未達 100%的阻尼比其原因推測為，當水多到充滿土壤孔隙時，此時外力作用下，能量須經水消散後再傳遞至土壤消散，阻尼比相對於未飽和砂土會較大。

在相同的相對密度、相同飽和度下，不同的細料含量與其阻尼比關係如圖(4-56)~圖(4-67)，上面十二張圖說明在相同的相對密度、相同飽和度下、不同細料含量與其阻尼比並無明顯的關係。

渥太華標準砂方面，在相同飽和度，不同的相對密度與其阻尼比關係如圖(4-68)~圖(4-71)，四張圖說明阻尼比隨著相對密度增加而漸增。

在相同相對密度，不同飽和度的時候，其不同飽和度與其阻尼比關係如圖(4-72)~圖(4-74)，上述三張圖說明當飽和度 100%的時候其阻尼比大於飽和度未達 100%之阻尼比，其結果與新竹砂相同。

在施力大小方面，新竹海岸砂在相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小分別為 50N、100N、150N 時的加速度歷時圖如圖(4-75)~圖(4-77)，圖(4-75)加速度值為 0.13 gal，阻尼比為 0.0341，圖(4-76) 加速度值為 0.24 gal，阻尼比為 0.0363，圖(4-77)加速度值為 0.36 gal，阻尼比為 0.0382，施力大小不同會影響加速度值。

在相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小分別為 50N、100N、150N 時的加速度歷時圖如圖(4-78)~圖(4-80)，其加速度值分別為 0.12gal、0.28gal、0.36gal。

在相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小分別為 50N、100N、150N 時的加速度歷時圖如圖(4-81)~圖(4-83)，此三張圖所對應阻尼比為 0.0388、0.0386、0.0392，相較於圖(4-75)~圖(4-80)，整體阻尼比也較為提高。新竹海岸砂在施力大小不同的情況下所對應的阻尼比整理為表(4-3)。

渥太華標準砂在相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小分別為 50N、100N、150N 時的加速度歷時圖如圖(4-84)~圖(4-86)，在相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小分別為 50N、100N、150N 時的加速度歷時圖如圖(4-87)~圖(4-89)，在相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小分別為 50N、100N、150N 時的加速度歷時圖如圖(4-90)~圖(4-92)，而其結果與新竹海岸

砂並無太大差異。渥太華標準砂在施力大小不同的情況下所對應的阻尼比整理為表(4-4)，表(4-3)與表(4-4)說明施力大小與其所對應之阻尼比並無明顯關係。

## 2.垂直單自由度振動台試驗結果與分析：

本試驗規劃 5Hz、10Hz、20Hz、30Hz、40Hz、50Hz 以及 60Hz 來作為振動台振動的控制因素，振動試驗盒在 5Hz、10Hz、20Hz、30Hz、40Hz、50Hz 以及 60Hz 利用二個加速規 A 以及加速規 B 分別放置於試驗土樣上以及試驗盒底部如圖(4-93)，同時利用二個加速規測量的好處為可知道有砂土以及沒砂土的情況下，減振狀況為何，以及哪種情況下減振效果較為理想。而為了證明加速規 A 與加速規 B 在同塊鐵片上不同的位置量測的加速度值相同，固把加速規 A 放置鐵片正中間，加速規 B 放置鐵片外側如圖(4-94)，其所量測加速度值不論在鐵片何處均相同，證明了鐵片無擾動狀況。圖(4-95)~圖(4-101)為加速規放置在試驗盒底部振動所量測 5Hz、10Hz、20Hz、30Hz、40Hz、50Hz 以及 60Hz 之加速度值。

新竹海岸砂裝入振動試驗盒後，在 5Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-102)、(4-103)，加速度值分別為 0.008 gal、0.0075 gal，在 10Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-104)、(4-105)，加速度值分別為 0.024gal、0.024-0.025 gal，相較於圖(4-96)，減振效果為 80% 左右，在 20Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-106)、(4-107)，加速度值都為 0.075gal，相較於圖(4-97)減振效果為 83%，在 30Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-108)、(4-109) 加速度值都為 0.04gal，在 40Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-110)、(4-111)，加速度值約為 0.035-0.04 gal 之間，在 50Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-112)、(4-113)，加速度值為 0.032-0.035gal 間，在 60Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷

時如圖(4-114)、(4-115)，加速度值為 0.03 gal 左右。

渥太華標準砂裝入振動試驗盒後，在 5Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-116)、(4-117)，加速度值為 0.0075 gal，在 10Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-118)、(4-119)，加速度值為 0.024 gal，與圖(4-96)比較，減振效果為 80% 為最佳，在 20Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-120)、(4-121)，加速度值為 0.075-0.08 gal 之間，在 30Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-122)、(4-123)，加速度值為 0.04 gal，與新竹砂在 30Hz 時相同，在 40Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-124)、(4-125)，加速度值為 0.033-0.038 gal，與新竹砂比較較低，在 50Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-126)、(4-127)，在 60Hz、飽和度 0% 及 100% 的狀況下，其加速度歷時如圖(4-128)、(4-129)，加速度值為 0.028-0.034 gal，加速度變化值比新竹砂來的大。

#### 試驗分析：

由上述圖(4-102)~圖(4-115)，其新竹海岸砂在不同頻率對應不同的加速度值整理如表(4-5)、渥太華標準砂在不同頻率對應不同的加速度值整理如表(4-6)，表(4-5)與表(4-6)說明，其一個放置於底部所量測的加速度值與一個放置試體砂上量測的加速度值作比較，而表(4-7)說明有砂以及沒砂的減振效果，減振效果定義為放置試體砂上量測的加速度值除以放置於底部所量測的加速度值，二個加速規量測之加速度值相除，其值越小代表減振效果較好。在表(4-7)說明新竹砂試驗土樣上未加重量的條件下，由 5Hz 開始飽和度 0% 以及飽和度 100% 的減振效果分別為 88.89% 以及 83.33%，到了 10Hz 至 20Hz 時減振效果較 5Hz 時後來的好，過了 20Hz 之後減振效果又不如 10Hz、20Hz 的時候好。其原因推測為因為砂土剛開始受到低頻外力作用的時候，砂土與砂土之間的摩擦振動方向大致都一樣，所以此時消耗的

能量較小，接著至 10Hz、20Hz 也就是頻率作用增加時，砂土與砂土之間的振動方向較先前的慣性作用較不一致，此時能量的耗損會比先前來的稍微大，而減振效果也較之前來的好一點，接著再增加頻率振動時，此時為高頻振動，砂土間的振動方式也逐漸轉變成慣性振動的行為，能量的耗損自然也沒之前的大，所以在新竹砂方面在 10Hz 至 20Hz 的時候減振效果較其他頻率作用來的好。

渥太華標準砂試驗土樣上未加重量的條件下，在 5Hz 的時候飽和度 0% 以及 100% 減振效果都為 88.89%，而到了 10Hz 時變為 80%，之後外力頻率增加至 20Hz、30Hz 到 60Hz 時，其減振效果卻沒 10Hz 時的好，其推測原因跟新竹砂的大致相同。



## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本研究利用新竹海岸砂以及渥太華標準砂二種不同的砂，以不同的相對密度、飽和度、施力大小來探討其阻尼比，並以不同的頻率振動來試驗二種不同土樣砂所對應的加速度值，探討其減振情形，而下列幾項為本試驗所得的一些結論：

#### (1) 相同密度方面

在相同的飽和度以及細料含量下，新竹海岸砂阻尼比由 0.0354(相對密度 30%)增加到 0.0425(相對密度 70%)，渥太華標準砂由 0.0299(相對密度 30%)增加到 0.0365(相對密度 70%)，顯示阻尼比隨著相對密度增加而有輕微增加的趨勢。

#### (2) 飽和度方面

由第四章的試驗結果顯示，飽和度 100%時的阻尼比比飽和度未達 100%時的阻尼比略高一些，而阻尼比隨著飽和度之變化之趨勢不明顯。

#### (3) 細料含量方面

就砂土阻尼比而言，阻尼比隨著細料含量變化之趨勢不明顯。此結論與“葉國樑的研究指出，針對雲林外海砂樣，細料含量對阻尼比的影響並不明顯。”結果相同。

#### (4) 施力大小方面

就本研究分別對二種試驗土樣施 50N、100N、150N 的力量大小，發現施力大小與阻尼比之變化並無明顯影響，阻尼比範圍約為 3%-4%之間。

#### (5) 外力振動頻率方面

由表(4-7)可知，新竹海岸砂在 10Hz 至 20Hz 時的減振效果較其他頻率

的減振效果來的佳，而渥太華砂在 10Hz 時候的減振效果也較其他頻率作用時來的好，其推測原因在分析時已說明。

## 5.2 建議

1. 本試驗僅針對相對密度、飽和度、細料含量等主要的因素作研究、而一些次要的因素有待之後的研究探討。
2. 本研究只針對新竹海岸砂做不同細料含量試驗，建議未來可針對不同砂樣進行不同細料含量的試驗。
3. 本研究只探討單一尺寸的試驗盒進行試驗，建議未來可對不同尺寸進行試驗。



## 參考文獻

1. Alexander H. Slocum "Precision Machine Design" PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, (1992)
2. 王金山, "共振柱試驗之土壤動力性質," 國立中央大學土木工程研究所, 碩士論文, (1994).
3. Iwasaki, T., and Tatsuoka, F., "Effect of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sand," Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 17, No.3, pp.19-35(1997)
4. 葉國樑, "臺灣西部外海抽砂回填土壤動態特性之應用," 國立臺灣海洋大學河海工程研究所, 碩士論文, (1994).
5. 簡連貴, 胡淵南 (1995), "細料含量對抽砂動態特性之影響," 中國土木水利工程學刊, 第七卷, 第四期.
6. 林中平, "黏土含量對福隆砂動態應力模數與阻尼比之影響," 碩士論文, 國立臺灣大學土木工程研究所, (1983).
7. 陳昱憲, "頻率比對臺北盆地含細料砂土動態特質與地盤反應分析之初步研究," 國立臺灣大學土木工程研究所, (1999)
8. Sliver, M.L., and Seed, H.B., "Deformation Characteristics of Sands Under Cyclic Loading," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM8, pp.1081~1098(1971)
9. Hardin, B. O., and V. P. Drnevich, "Shear Modulus and Damping in soil :Design Equations and Curves," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.98, No. SM7, pp.667-692(1972).
10. Hall, R.T. and Richart, F.E., "Dissipation of Elastic Wave Energy in Granular Soils," JSMFD, ASCE, Vol.89, No. SM6, pp-(1973).
11. 林永盛, "基礎結構動力(上)" 文笙出版社, 第 222-268 頁, (2003).

表 3-1 新竹海岸砂 比重、最大乾密度、最小乾密度

土樣種類	新竹砂
細料含量%	2.1
Gs	2.71
$r_{d \max}$	1.604
$r_{d \min}$	1.277
土壤分類	SP

表 3-2 渥太華標準砂比重、最大乾密度、最小乾密度

土樣種類	標準渥太華砂
細料含量%	0
Gs	2.65
$r_{d \max}$	1.766
$r_{d \min}$	1.521
土壤分類	SP

表 3-3 PVC 的材料特性

PVC 聚氯乙烯	
波松比	0.34
楊氏係數	3.2-4 $\text{kg}/\text{cm}^2$
密度	1400 $\text{kg}/\text{m}^3$

表 3-4 相對密度與土壤緊密度

相對密度 (%)	描述項目
0-15	非常疏鬆
15-35	疏鬆
35-65	中等緊密
65-85	緊密
85-100	非常緊密

表 4-1 新竹海岸砂

相對密度(%)	飽和度(%)	細料含量(%)	阻尼比
30%	0%	0%	0.0369
		5%	0.0366
		10%	0.0354
	25%	0%	0.0367
		5%	0.0379
		10%	0.0379
	50%	0%	0.0367
		5%	0.0357
		10%	0.0354
	100%	0%	0.0381
		5%	0.0393
		10%	0.0388
50%	0%	0%	0.0371
		5%	0.0381
		10%	0.0379
	25%	0%	0.0372
		5%	0.0366
		10%	0.0372
	50%	0%	0.0388
		5%	0.038
		10%	0.0377
	100%	0%	0.0397
		5%	0.041
		10%	0.0389
70%	0%	0%	0.0382
		5%	0.0385
		10%	0.0391
	25%	0%	0.0388
		5%	0.0374
		10%	0.0395
	50%	0%	0.0391
		5%	0.0385
		10%	0.0394
	100%	0%	0.0411
		5%	0.0425
		10%	0.0416

表 4-2 渥太華標準砂阻尼比

相對密度	飽和度	阻尼比
30%	0%	0.0333
	25%	0.0299
	50%	0.0332
	100%	0.0351
50%	0%	0.0342
	25%	0.0333
	50%	0.0343
	100%	0.0344
70%	0%	0.0358
	25%	0.0357
	50%	0.0348
	100%	0.0365

表 4-3 新竹砂阻尼比與施力大小

垂直振動		
新竹海岸砂		
相對密度	施力大小	阻尼比
30%	50N	0.0341
	100N	0.0363
	150N	0.0382
50%	50N	0.0372
	100N	0.0368
	150N	0.036
70%	50N	0.0388
	100N	0.0386
	150N	0.0392

表 4-4 渥太華砂阻尼比與施力大小

垂直振動		
渥太華標準砂		
相對密度	施力大小	阻尼比
30%	50N	0.0325
	100N	0.0333
	150N	0.0318
50%	50N	0.329
	100N	0.0342
	150N	0.0355
70%	50N	0.0362
	100N	0.0338
	150N	0.0357

表 4-5 振動試驗盒新竹砂之加速度值

頻率 (Hz)	加速規置底部(Gn)	新竹砂飽和度 0% 加速度(Gn)	新竹砂飽和度 100% 加速度(Gn)
5	0.008	0.008	0.0075
10	0.03	0.024	0.024-0.025
20	0.09	0.075	0.075
30	0.045	0.04	0.04
40	0.042-0.045	0.035-0.038	0.035-0.04
50	0.04	0.032-0.035	0.033
60	0.035-0.037	0.03	0.03-0.032

表 4-6 振動試驗盒渥太華砂之加速度值

頻率 (Hz)	加速規置底部(Gn)	渥太華砂飽和度 0% 加速度(Gn)	渥太華砂飽和度 100% 加速度(Gn)
5	0.008	0.0075	0.0075
10	0.03	0.024	0.024
20	0.09	0.075	0.075-0.08
30	0.045	0.04	0.04
40	0.042-0.045	0.033-0.035	0.035-0.038
50	0.04	0.035	0.034
60	0.035-0.037	0.03-0.032	0.028-0.034

表 4-7 試驗振動結果整理

頻率 (Hz)	新竹砂飽和 度 0%減振 效果(%)	新竹砂飽和 度 100%減 振效果(%)	渥太華砂飽 和度 0%減 振效果(%)	渥太華砂飽 和度 100% 減振效果 (%)
5	93.75	93.75	93.75	93.75
10	80	81.67	80	80
20	83.33	83.33	83.33	86.11
30	88.89	88.89	88.89	88.89
40	83.9	86.2	78.2	83.9
50	85	82.5	87.5	85
60	83.33	86.11	86.11	86.11

減振效果定義：放置試樣砂上加速度值/未放砂之加速度值



Material	Load	$T_1$ (°K)	$T_2$ (°K)	$\sigma_1$ (ksi)	$\sigma_2$ (ksi)	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$\zeta_1$	$\zeta_2$	$A_{r1}$	$A_{r2}$
Alumina								5.00E-06	1.50E-05	100000	33300
Aluminum (6063-T6)	bending			1	6			2.50E-04	2.50E-03	2000	200
Aluminum (pure annealed)	axial	50	300					3.50E-06	1.00E-05	143000	50000
Beryllium (18.6%Be)	unspec.			2	50			7.50E-03	4.10E-01	66.7	1.3
Copper (brass)	bending					50	600	1.50E-03	3.00E-03	333	167
Copper (pure annealed)	bending					20	550	3.50E-03	1.00E-03	143	500
Glass	bending					10	100	1.00E-03	3.00E-03	500	167
Granite (Quincy)	bending					140	1600	2.50E-03	5.00E-03	200	100
Iron (cast, annealed)	bending					100	2000	6.00E-04	1.50E-03	833	333
Iron (mild steel)	bending			2.5	5.5			4.50E-04	7.00E-04	1110	714
Lead	bending					20	160	4.00E-03	7.00E-03	125	71.4
Polymer concrete	bending							3.50E-03		143	
Portland cement concrete	bending							1.20E-02		41.7	
Quartz (ground, piezo)	unspec.					65k		5.00E-06		100000	
Sand (loose on an Al beam)											
beam alone	bending					1000	4000	1.00E-03		500	
50% wt. layer of sand	bending					1000	4000	4.00E-02	9.95E-02	12.5	5.1
100% wt. layer of sand	bending					1000	4000	9.95E-02	4.10E-01	5.1	1.3
Silica (fused, annealed)	axial	73	1073					5.00E-07	5.00E-05	1000000	10000
Silicon nitride (n)	unspec.							1.25E-05		40000	
Soil (misc.)	unspec.					6	30	4.99E-02		10.0	

圖 1-1 材料之阻尼比

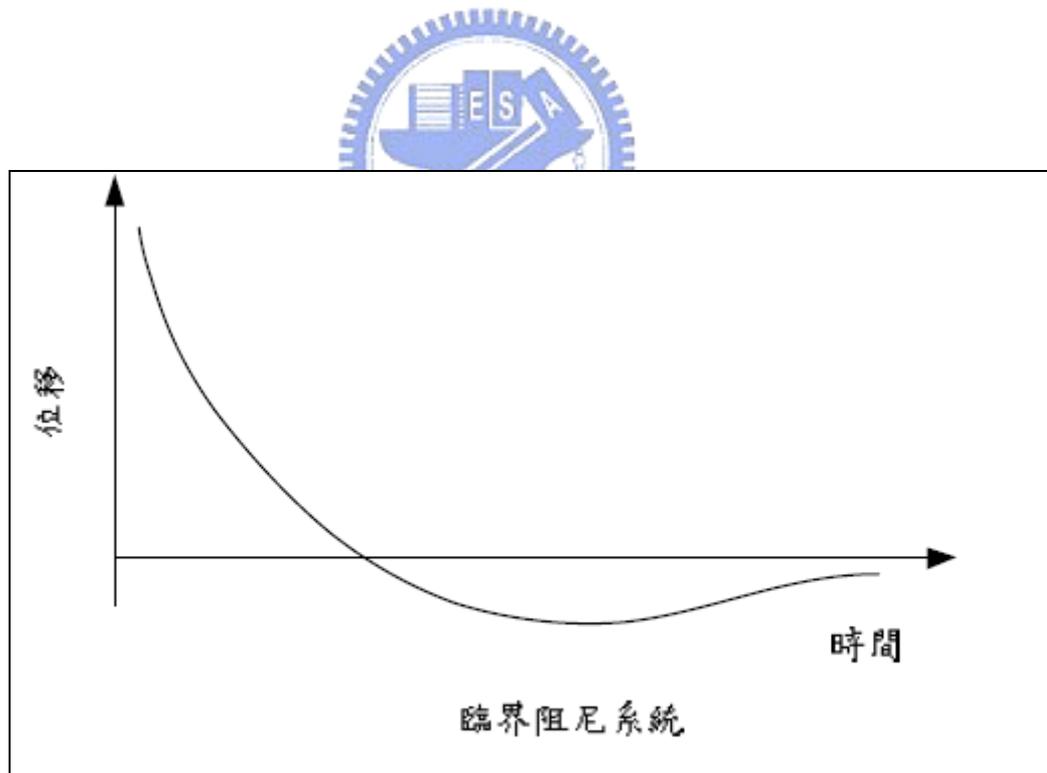


圖 2-1 臨界阻尼系統

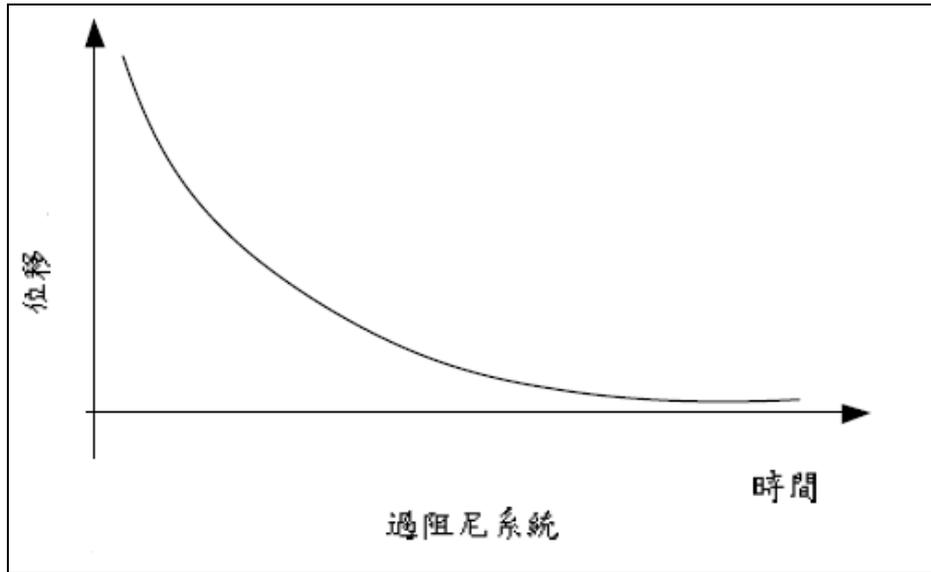


圖 2-2 過阻尼系統

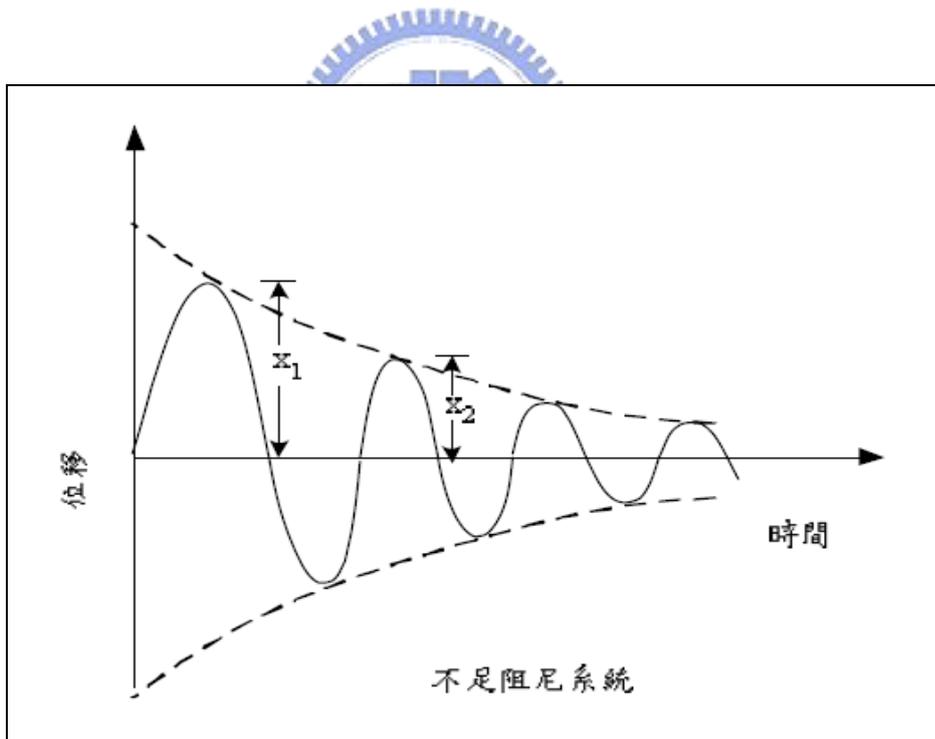


圖 2-3 不足阻尼系統

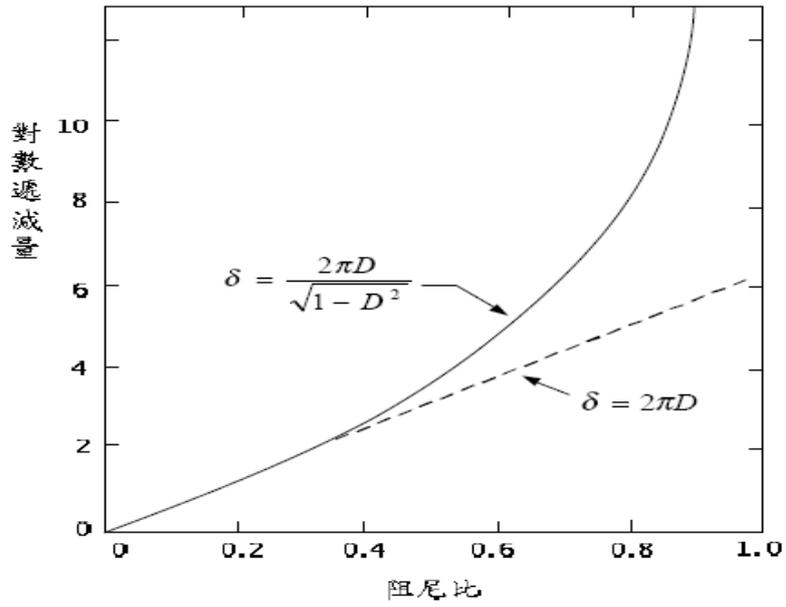


圖 2-4 阻尼比與對數衰減量關係圖

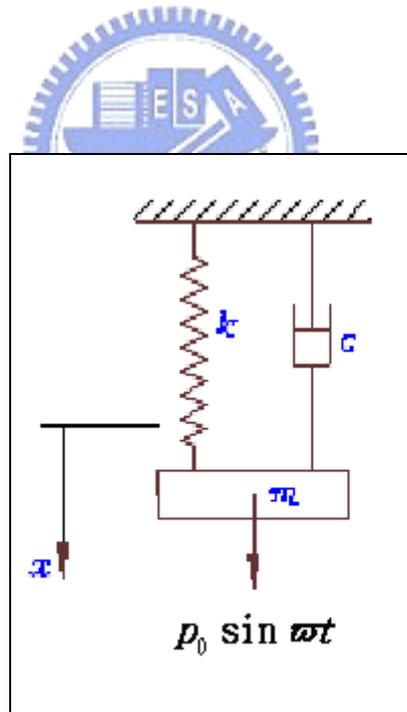


圖 2-5 諧和外力作用於單自由度系統

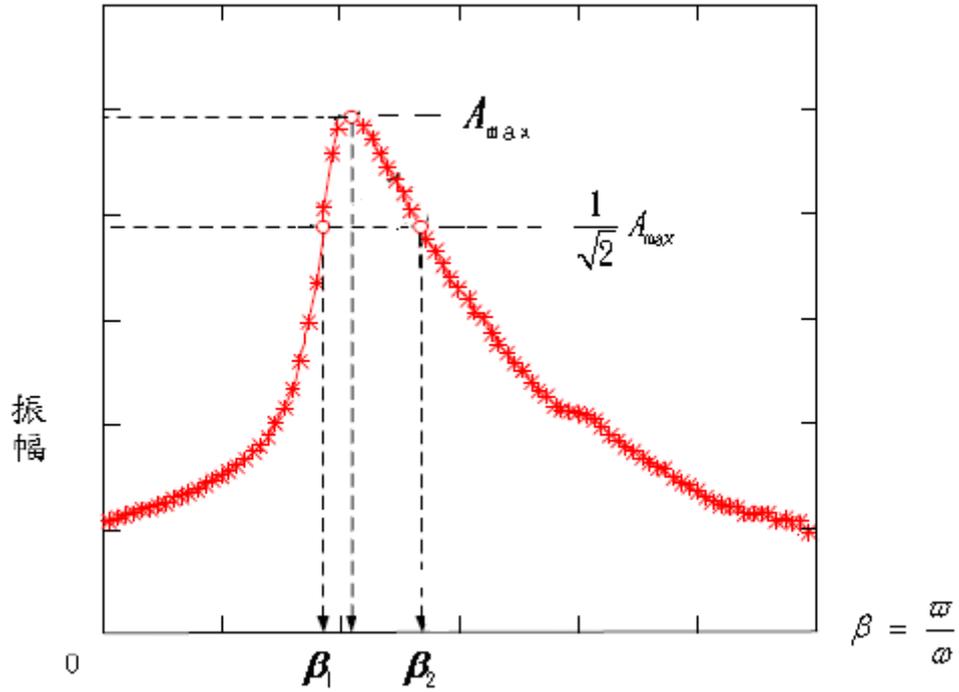


圖 2-6 頻譜圖

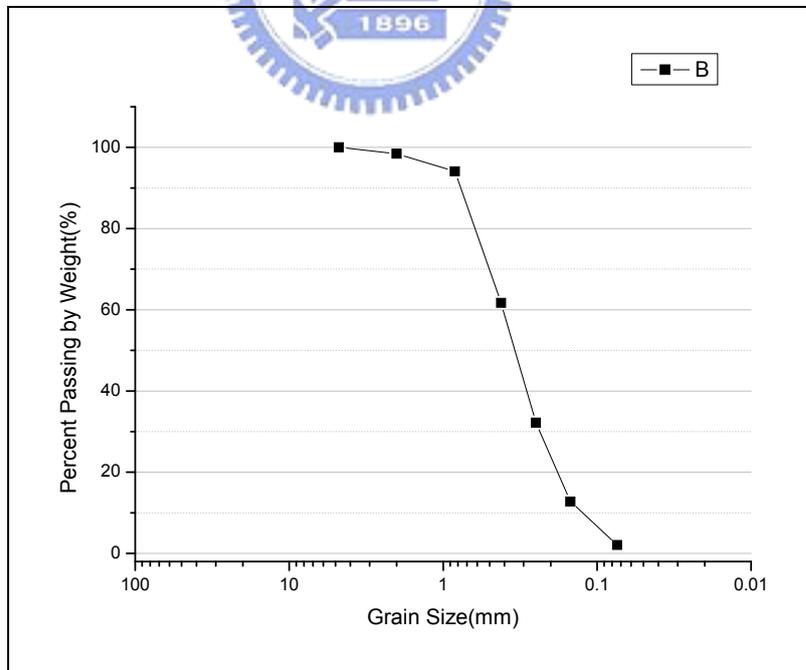


圖 3-1 新竹砂粒徑分佈曲線



圖 3-2 新竹砂放大 50 倍



圖 3-3 渥太華標準砂之包裝外觀

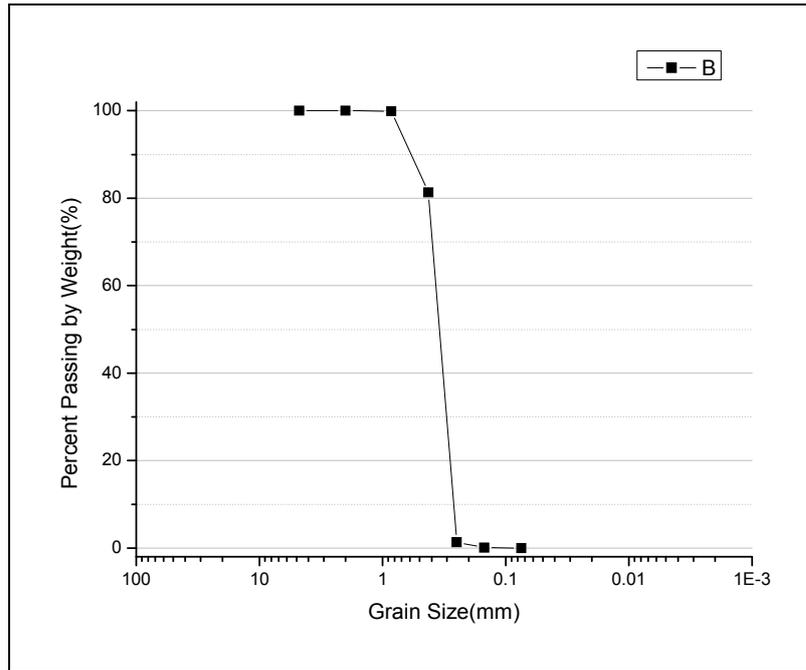


圖 3-4 渥太華標準砂粒徑分佈曲線



圖 3-5 渥太華標準砂放大 50 倍



圖 3-6 PCB 加速規

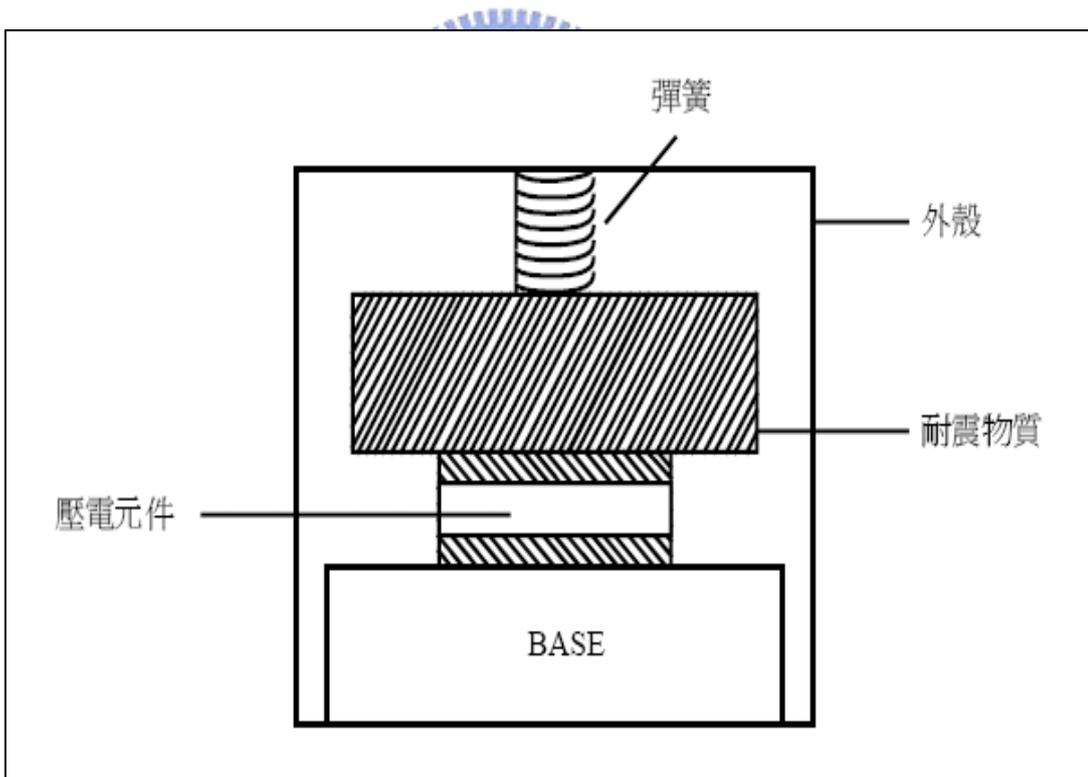


圖 3-7 加速規內部元件

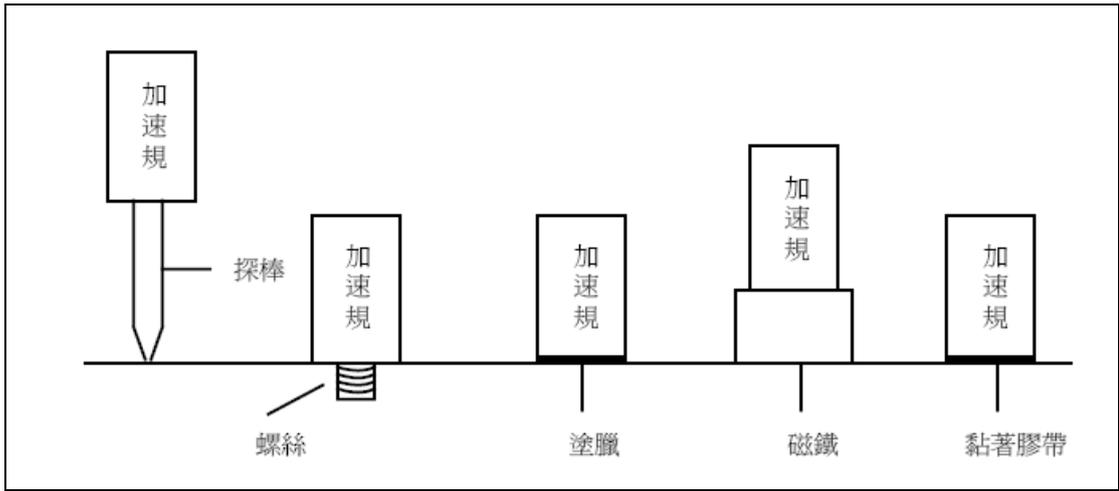


圖 3-8 加速規固定方式

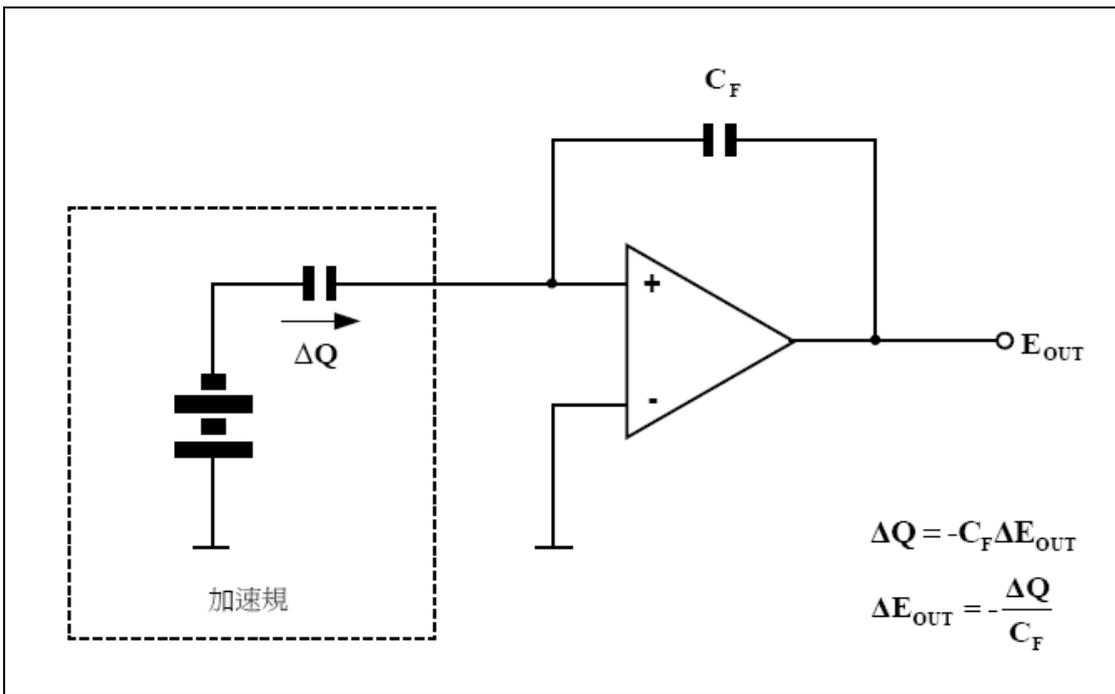


圖 3-9 加速規電阻原理



圖 3-10 PCB 電子式敲擊鉗



圖 3-11 LDS 訊號接收器



圖 3-12 小型振動台



圖 3-13 振動台訊號主機



圖 3-14 垂直振動試驗盒

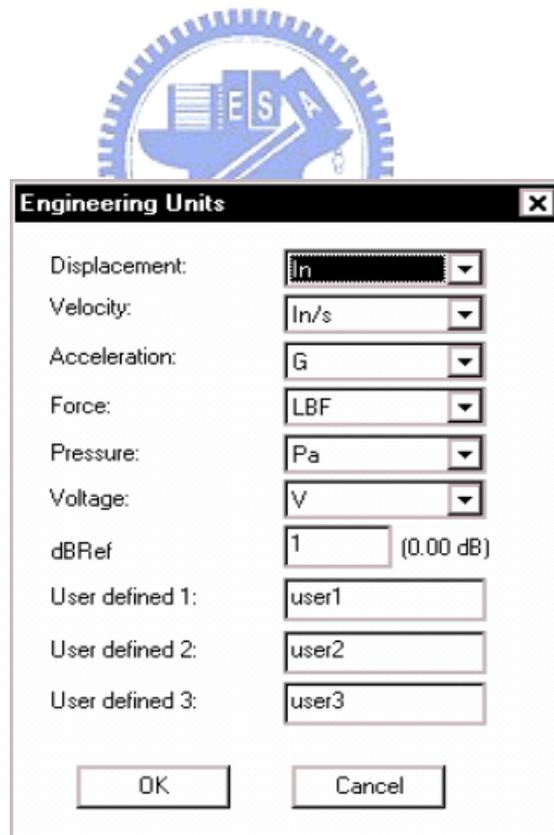


圖 3-15 系統單位設定

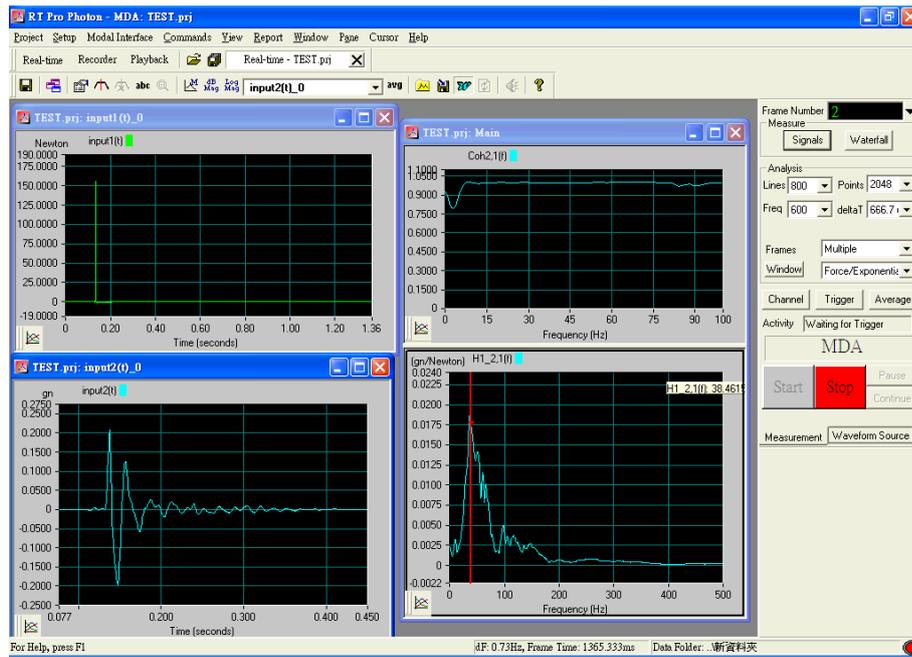


圖 3-16 本實驗監測功能

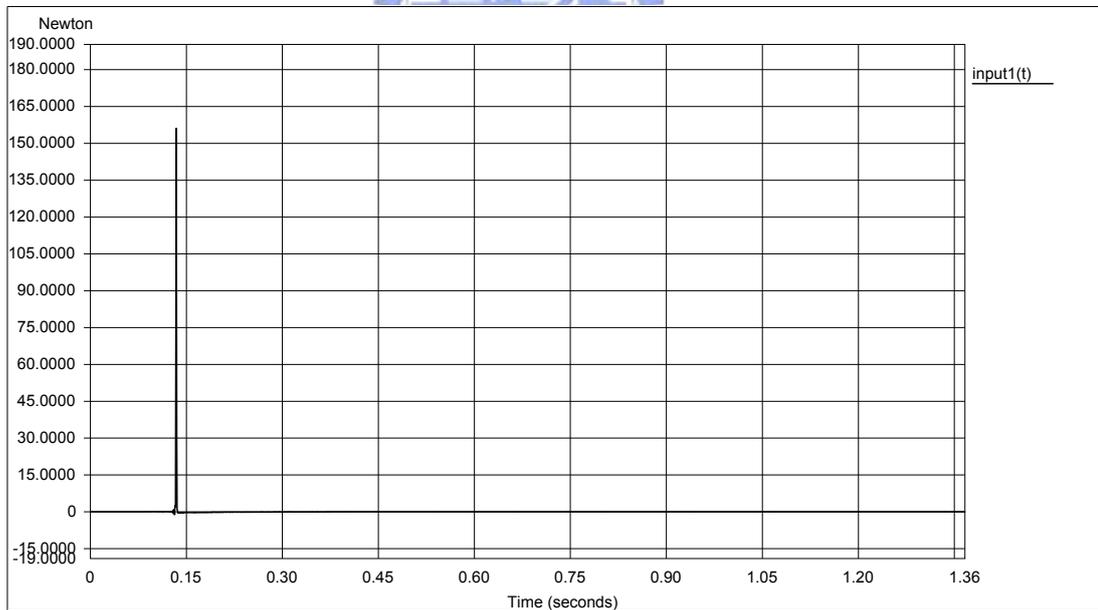


圖 3-17 施力大小監測

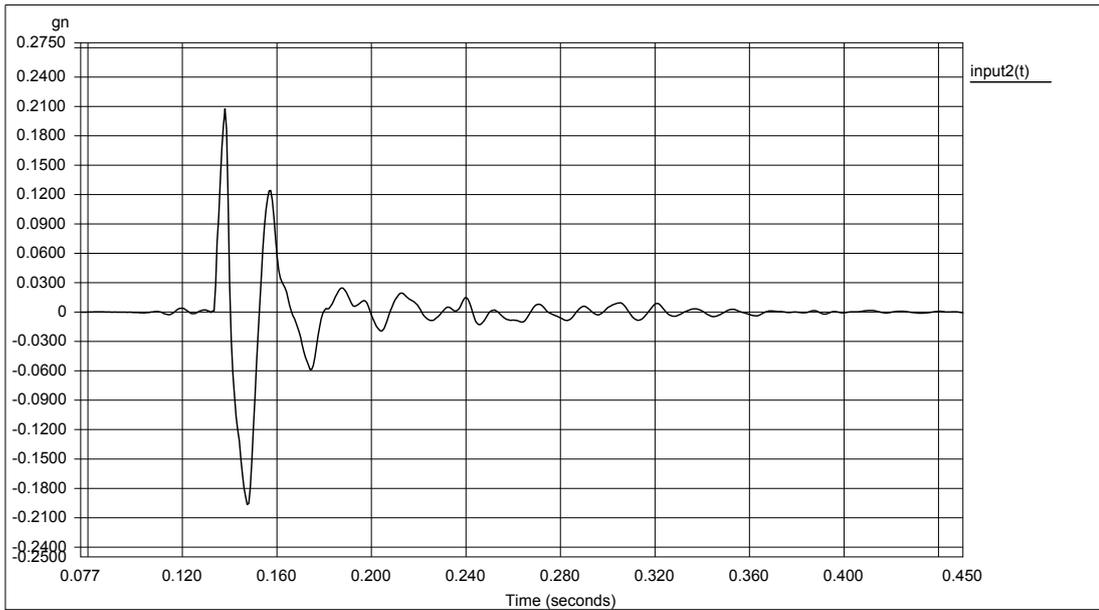


圖 3-18 加速度訊號擷取

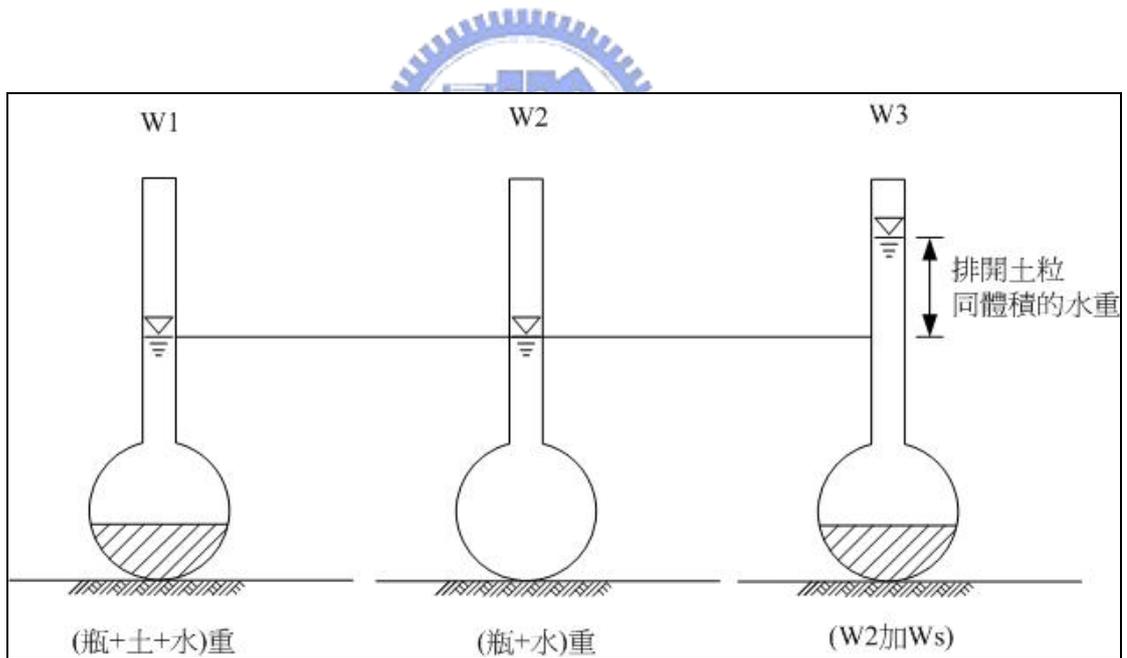


圖 3-19 比重瓶實驗圖



圖 3-20 篩分析圖片



圖 3-21 篩分析設備

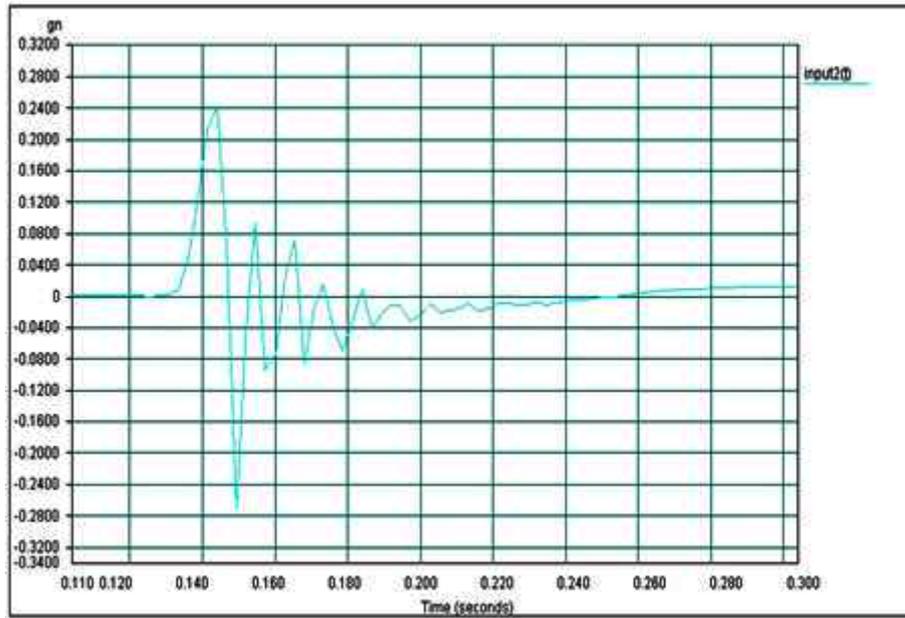


圖 4-1 新竹砂相對密度 30%、飽和度 0%、細料含量 0%時加速度

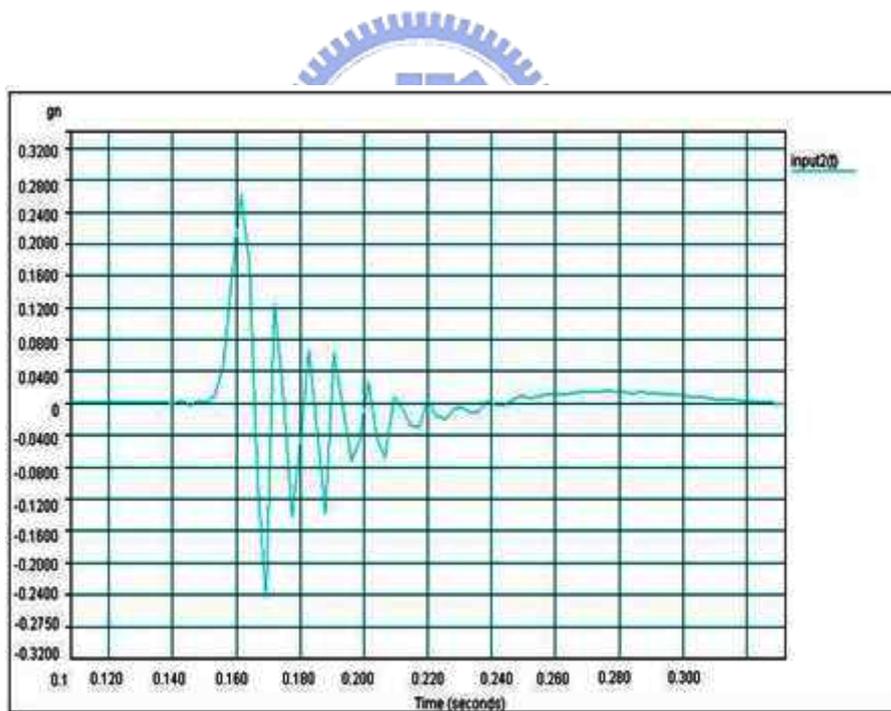


圖 4-2 新竹砂相對密度 30%、飽和度 0%、細料含量 5%時加速度

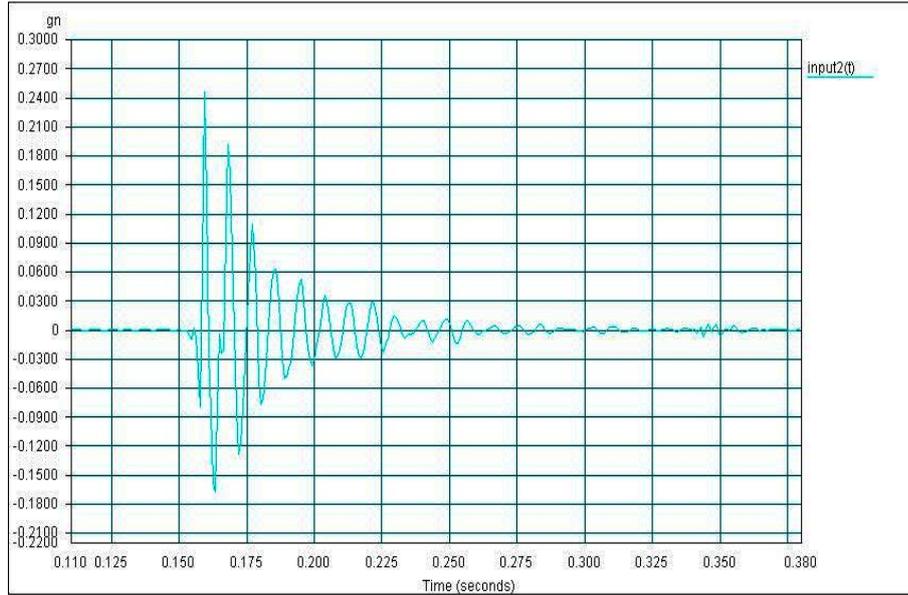


圖 4-3 新竹砂相對密度 30%、飽和度 0%、細料含量 10%時加速度

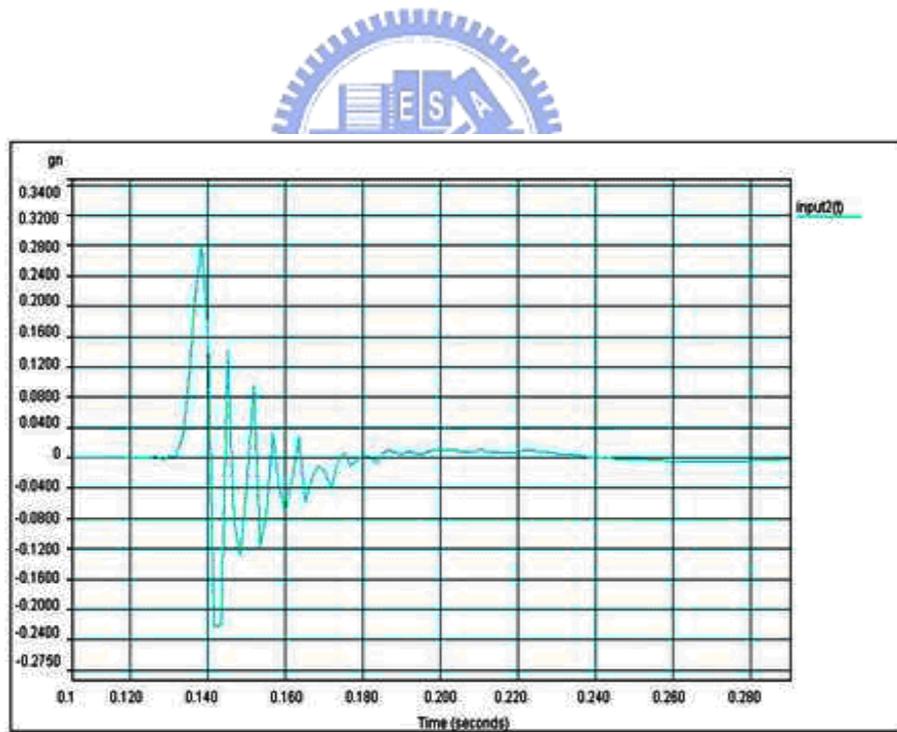


圖 4-4 新竹砂相對密度 30%、飽和度 25%、細料含量 0%時加速度

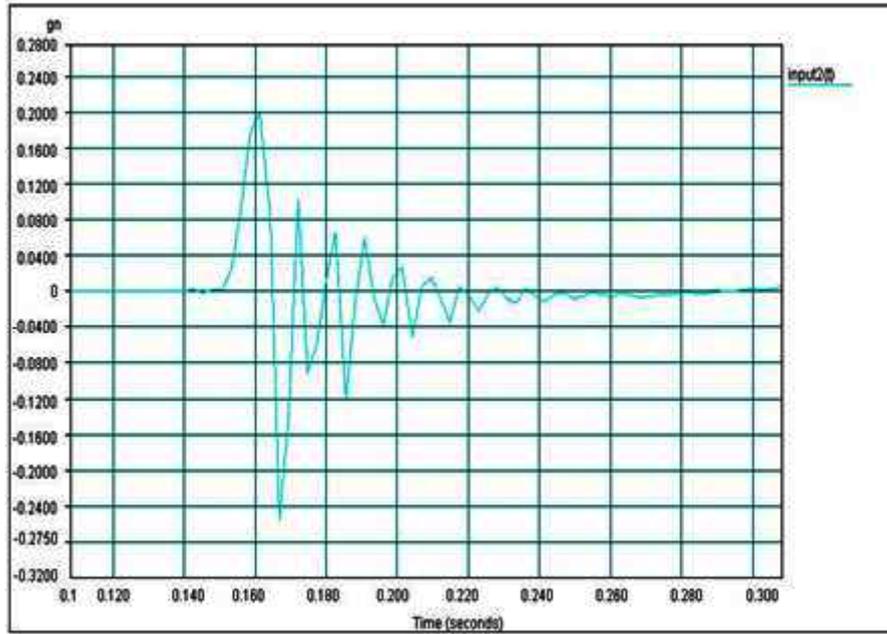


圖 4-5 新竹砂相對密度 30%、飽和度 25%、細料含量 5%時加速度

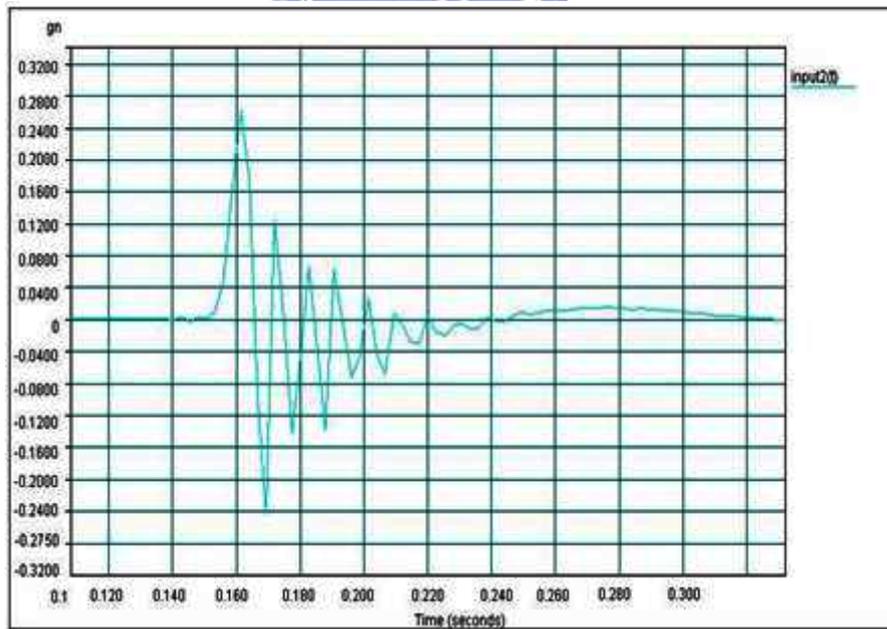


圖 4-6 新竹砂相對密度 30%、飽和度 25%、細料含量 10%時加速度

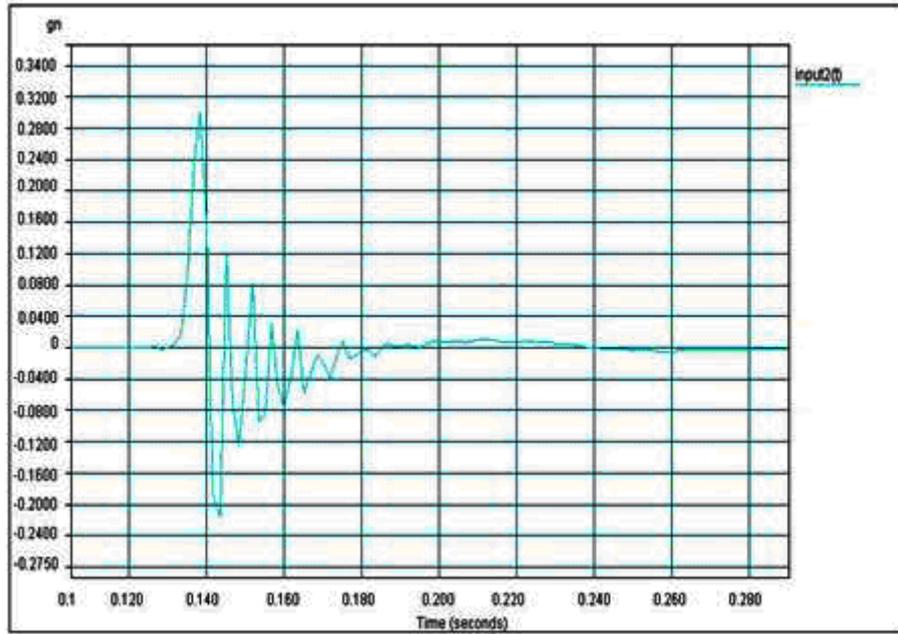


圖 4-7 新竹砂相對密度 30%、飽和度 50%、細料含量 0%時加速度

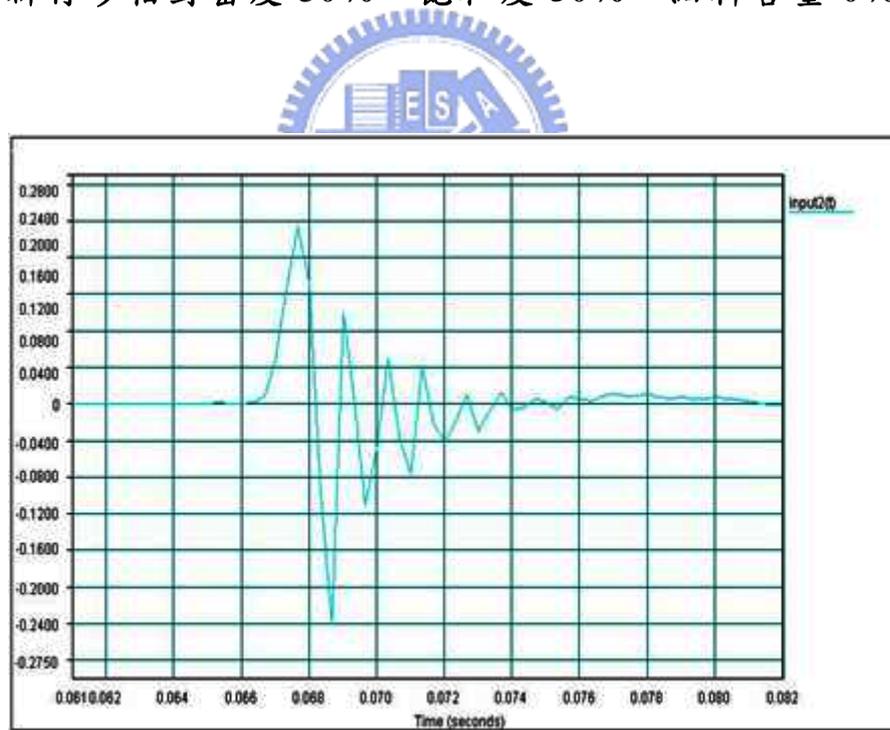


圖 4-8 新竹砂相對密度 30%、飽和度 50%、細料含量 5%時加速度

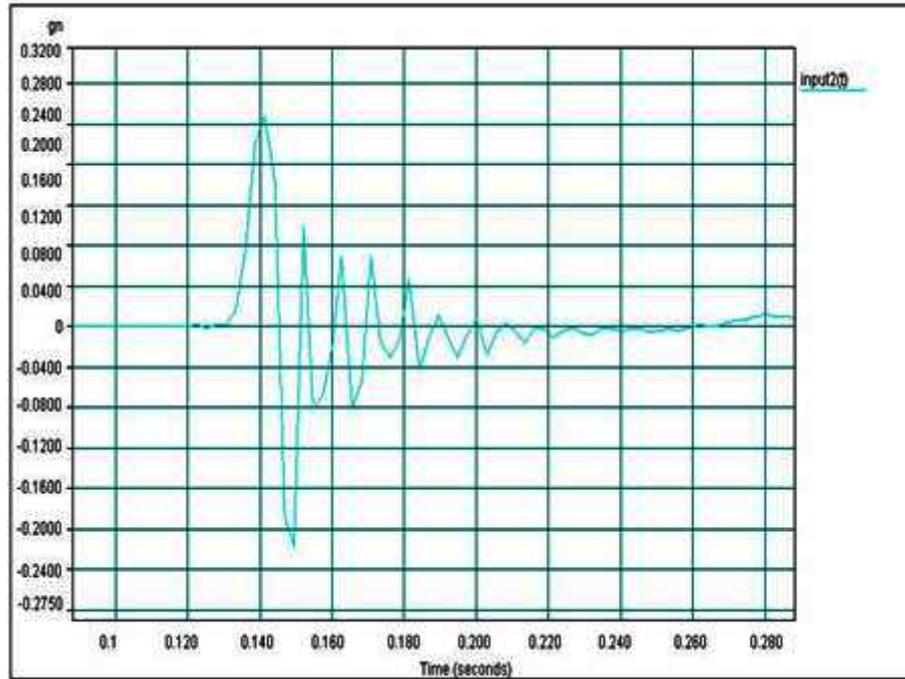


圖 4-9 新竹砂相對密度 30%、飽和度 50%、細料含量 10%時加速度

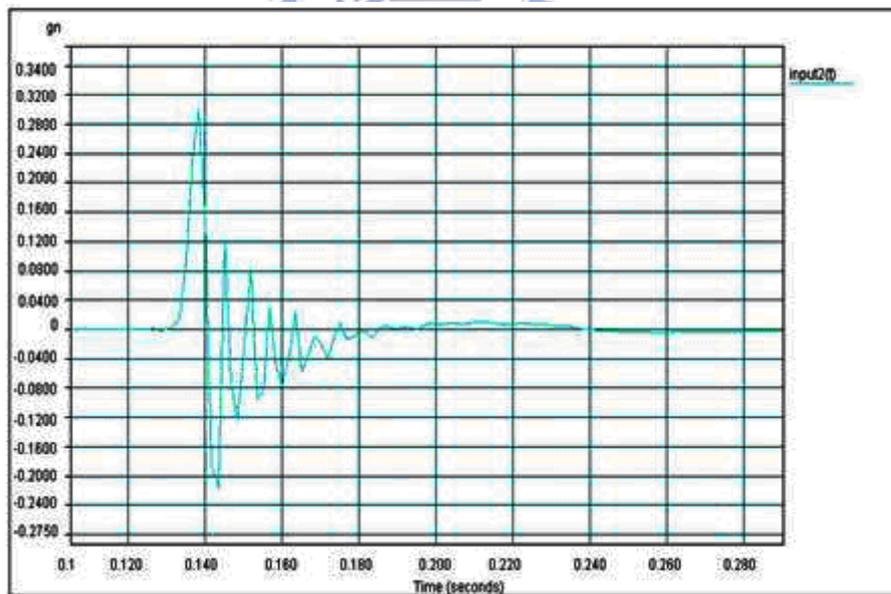
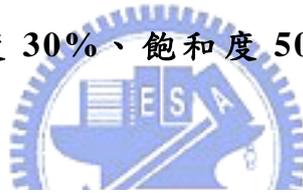


圖 4-10 新竹砂相對密度 30%、飽和度 100%、細料含量 0%時加速度

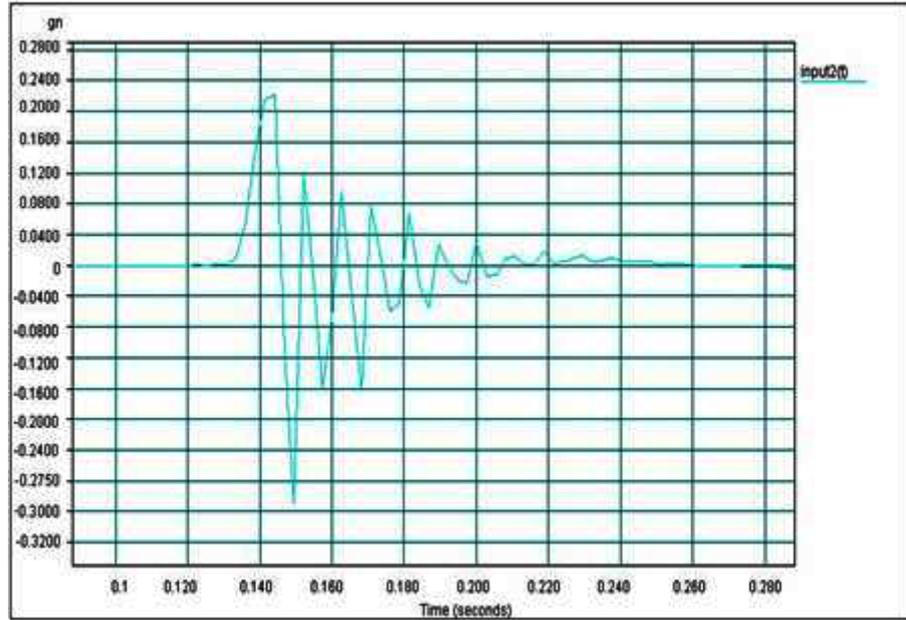


圖 4-11 新竹砂相對密度 30%、飽和度 100%、細料含量 5%時加速度

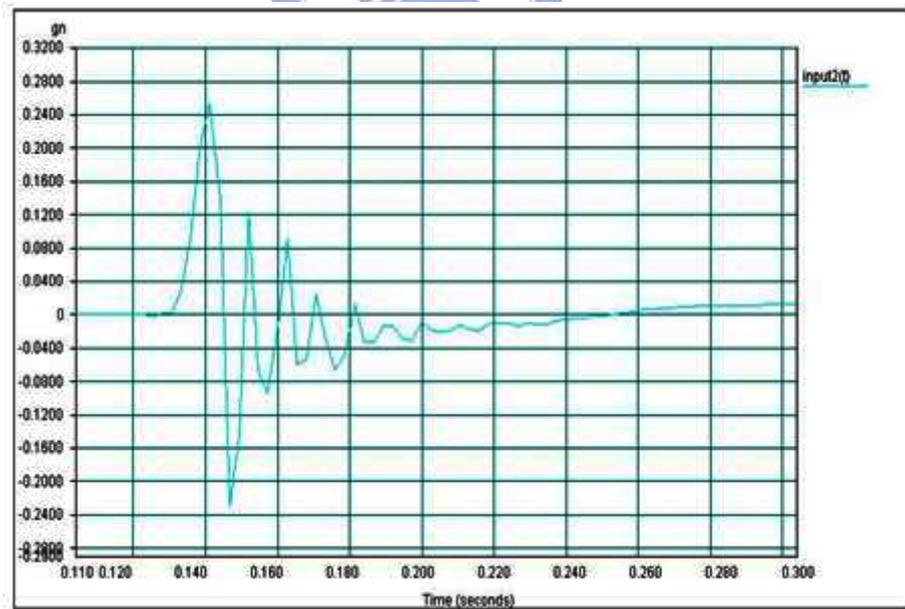


圖 4-12 新竹砂相對密度 30%、飽和度 100%、細料含量 10%時加速度

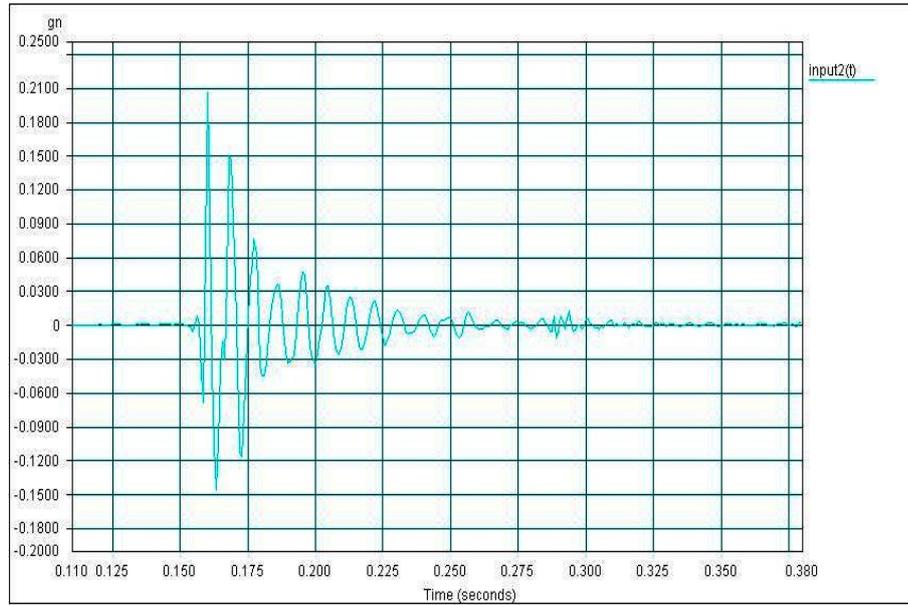


圖 4-13 新竹砂相對密度 50%、飽和度 0%、細料含量 0%時加速度

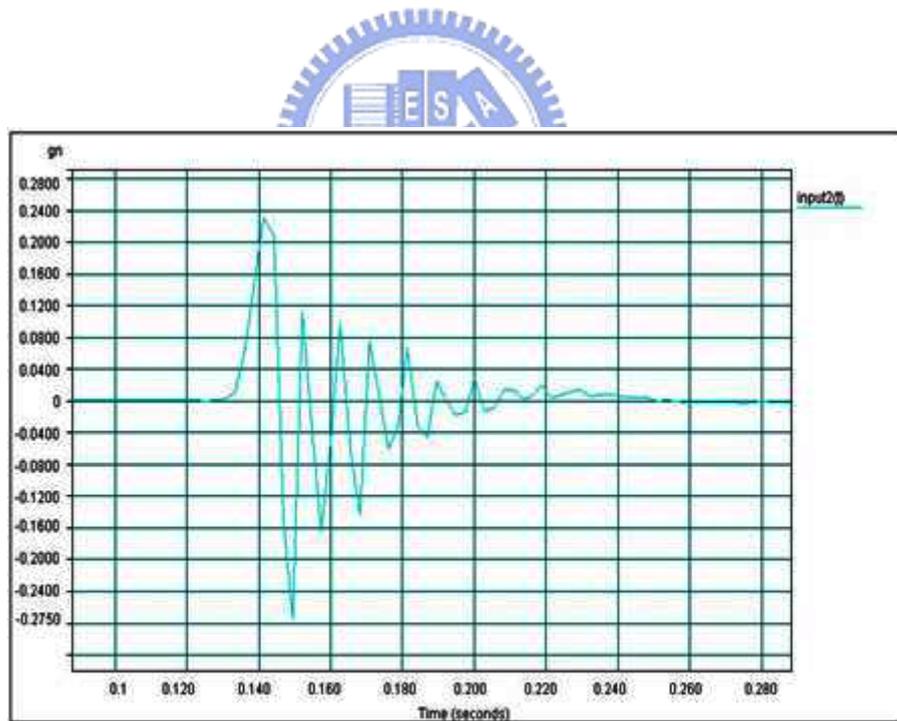


圖 4-14 新竹砂相對密度 50%、飽和度 0%、細料含量 5%時加速度

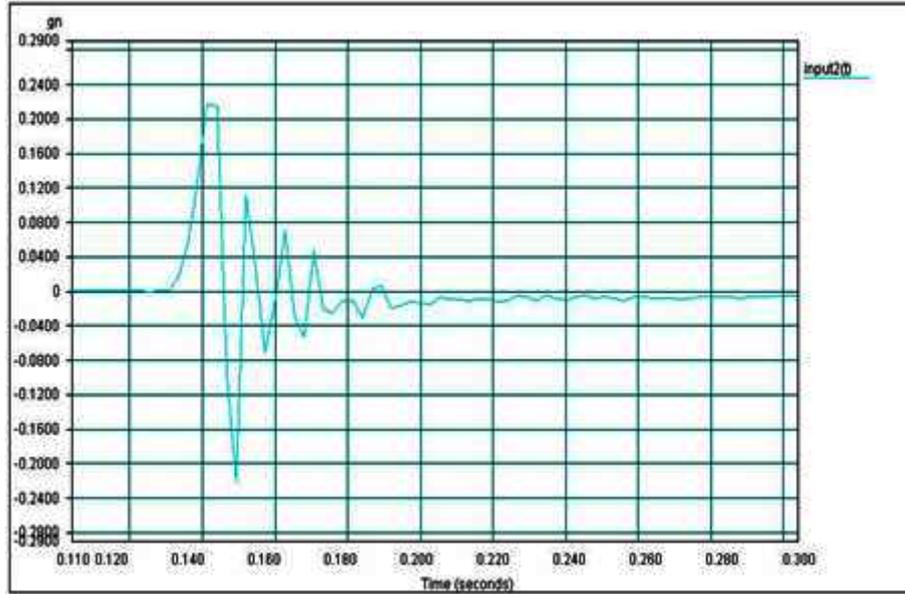


圖 4-15 新竹砂相對密度 50%、飽和度 0%、細料含量 10%時加速度

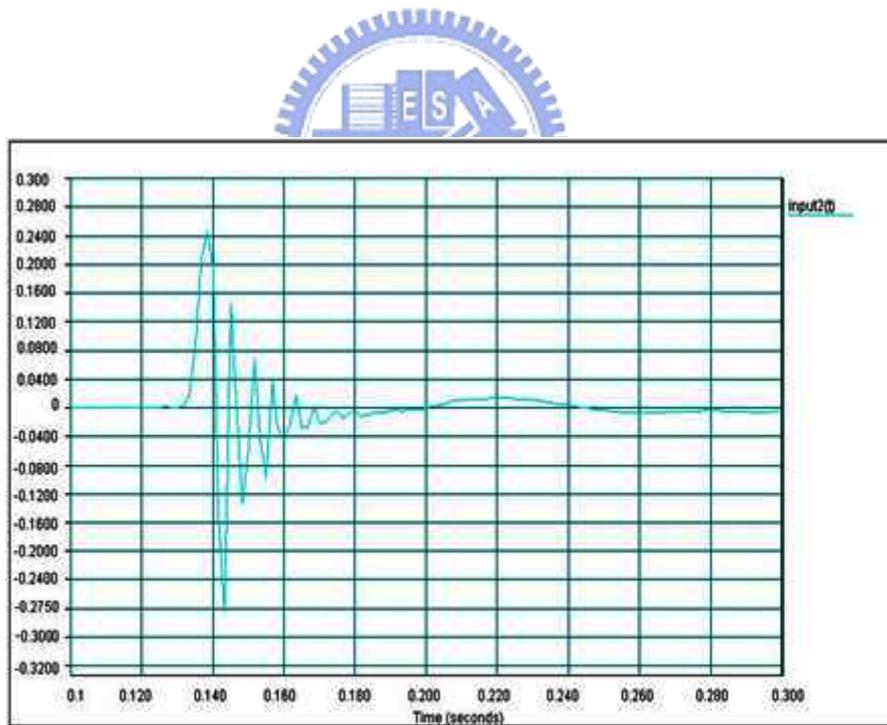


圖 4-16 新竹砂相對密度 50%、飽和度 25%、細料含量 0%時加速度

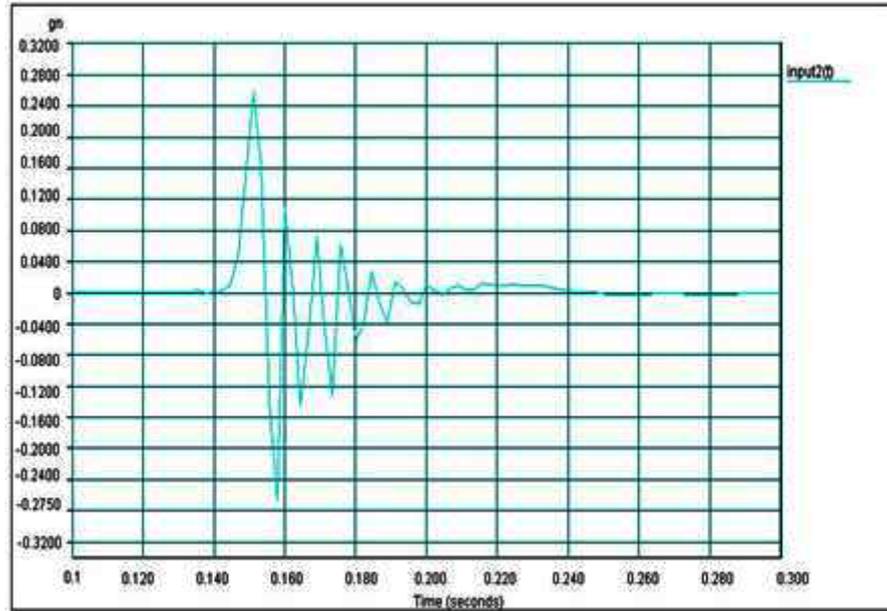


圖 4-17 新竹砂相對密度 50%、飽和度 25%、細料含量 5%時加速度

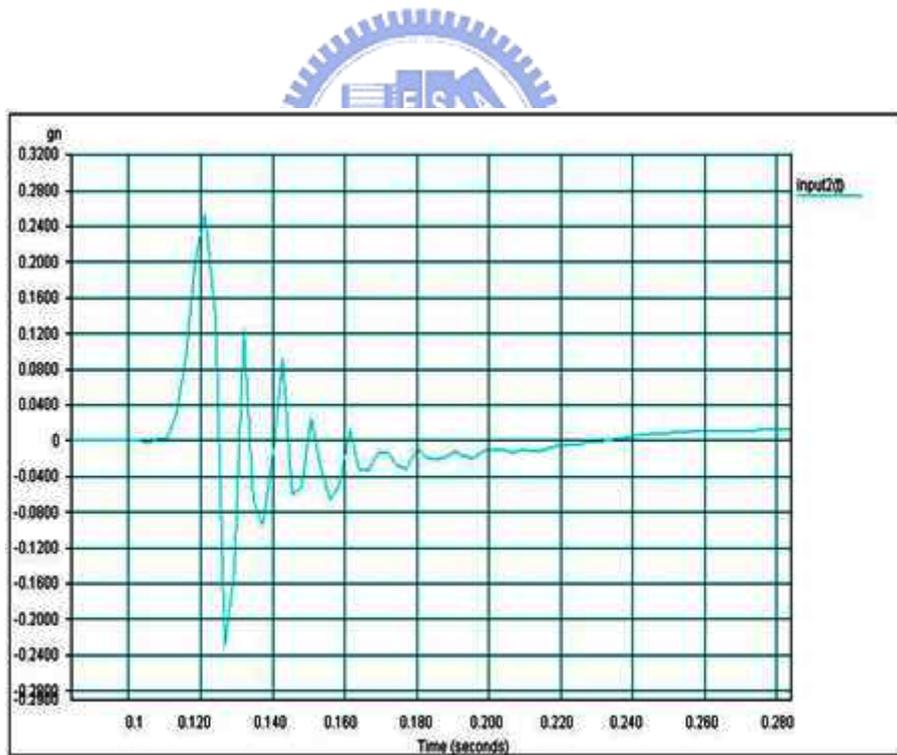


圖 4-18 新竹砂相對密度 50%、飽和度 25%、細料含量 10%時加速度

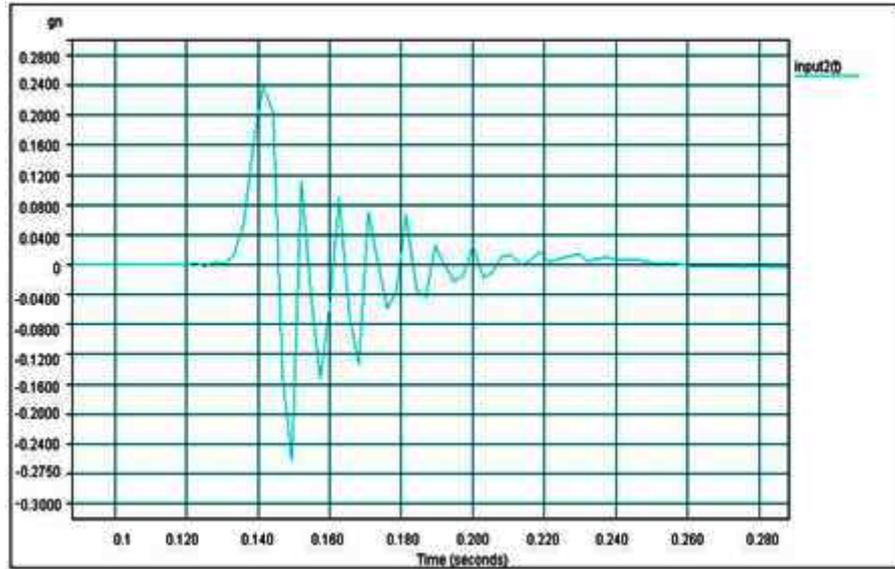


圖 4-19 新竹砂相對密度 50%、飽和度 50%、細料含量 0%時加速度

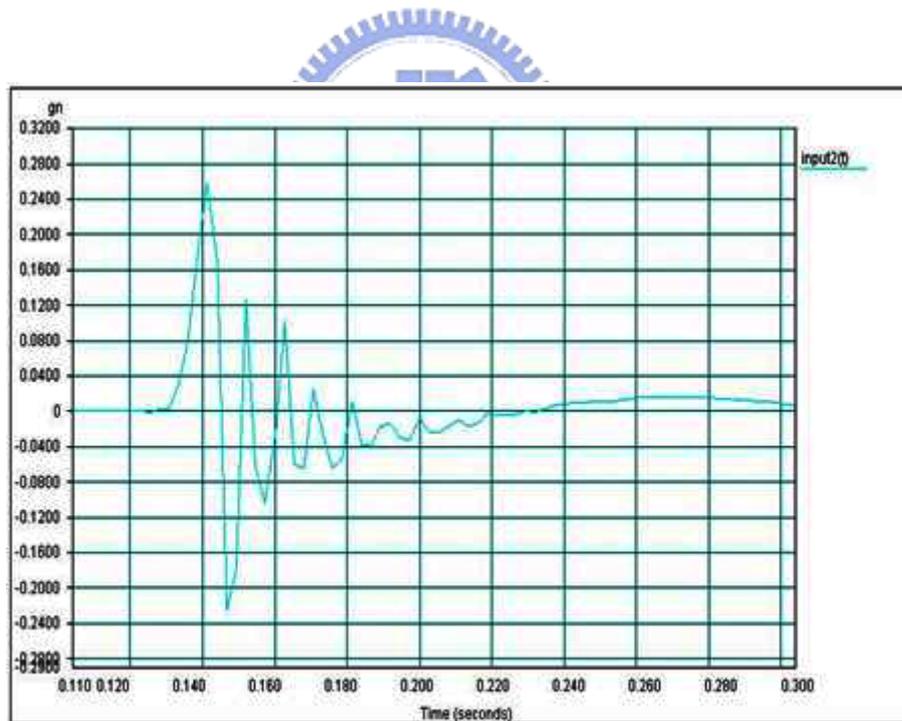


圖 4-20 新竹砂相對密度 50%、飽和度 50%、細料含量 5%時加速度

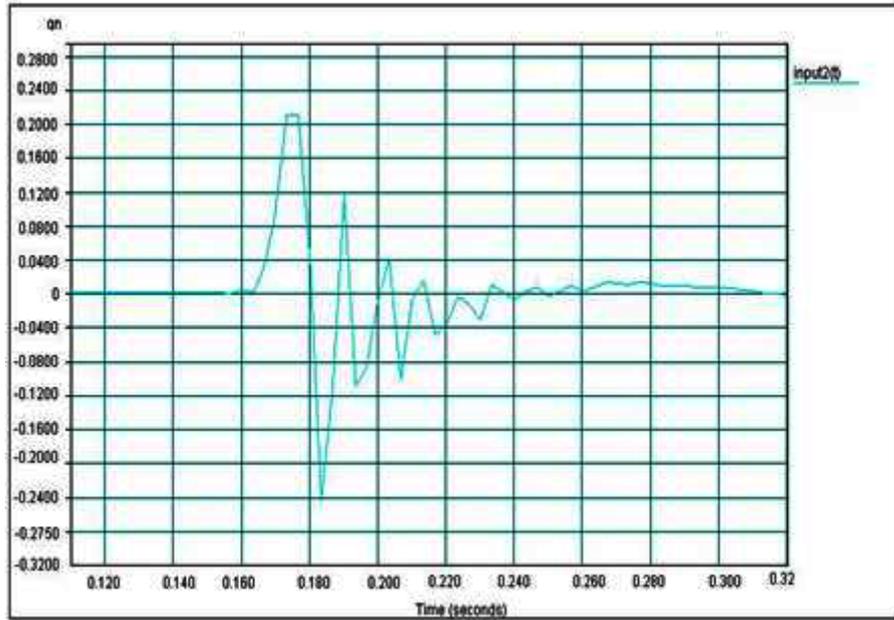


圖 4-21 新竹砂相對密度 50%、飽和度 50%、細料含量 10%時加速度

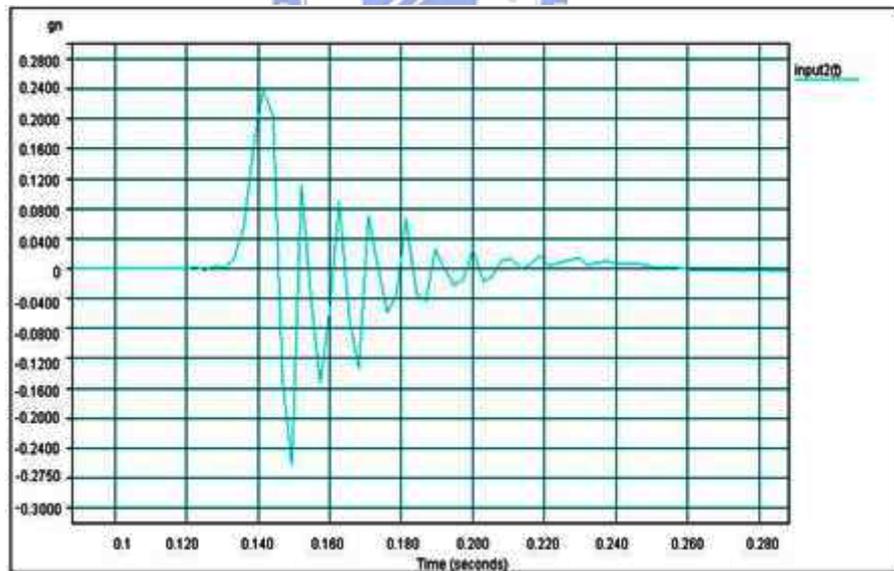


圖 4-22 新竹砂相對密度 50%、飽和度 100%、細料含量 0%時加速度

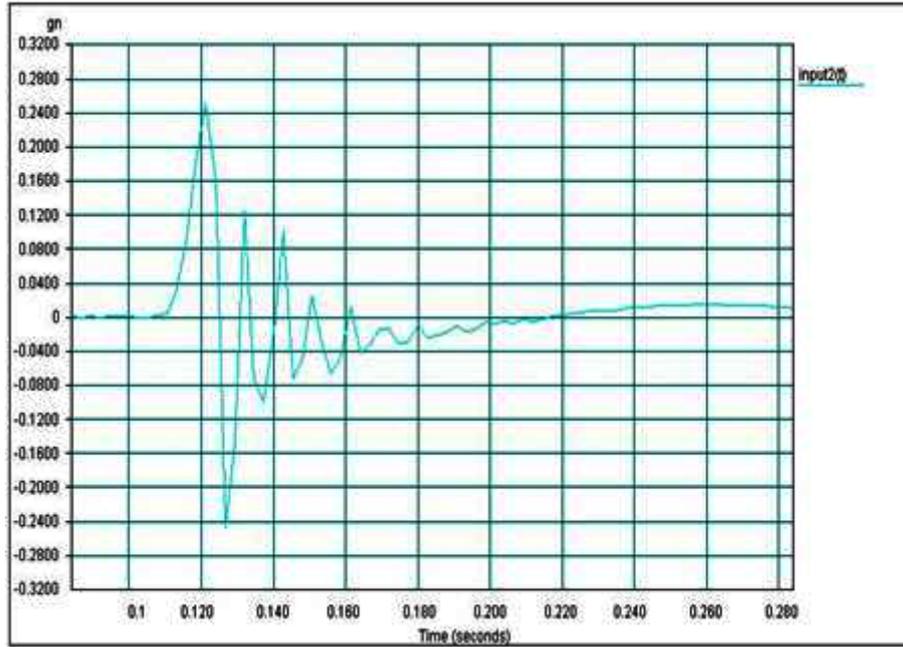


圖 4-23 新竹砂相對密度 50%、飽和度 100%、細料含量 5%時加速度

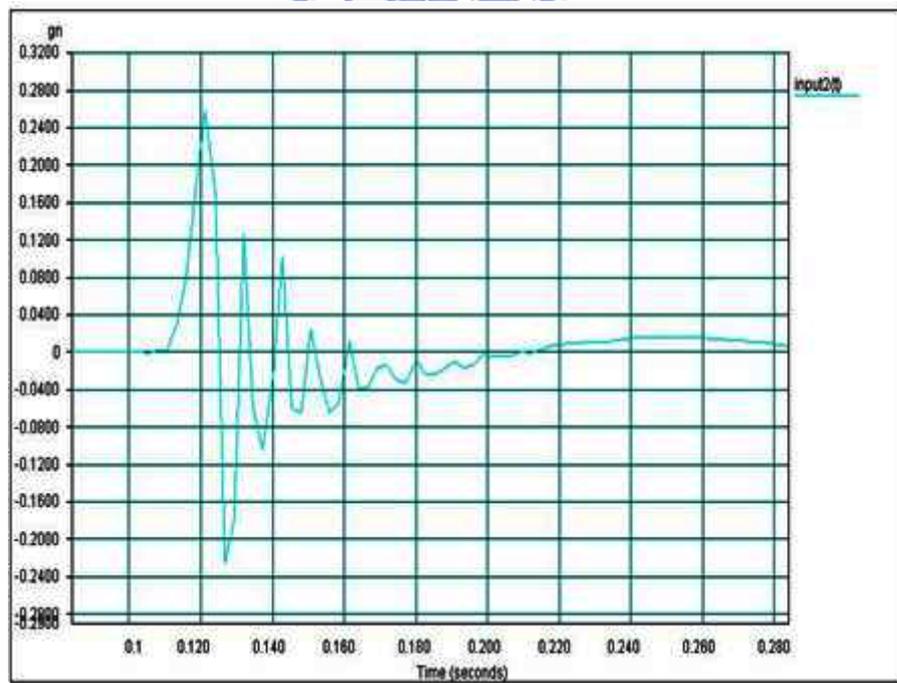


圖 4-24 新竹砂相對密度 50%、飽和度 100%、細料含量 10%時加速度

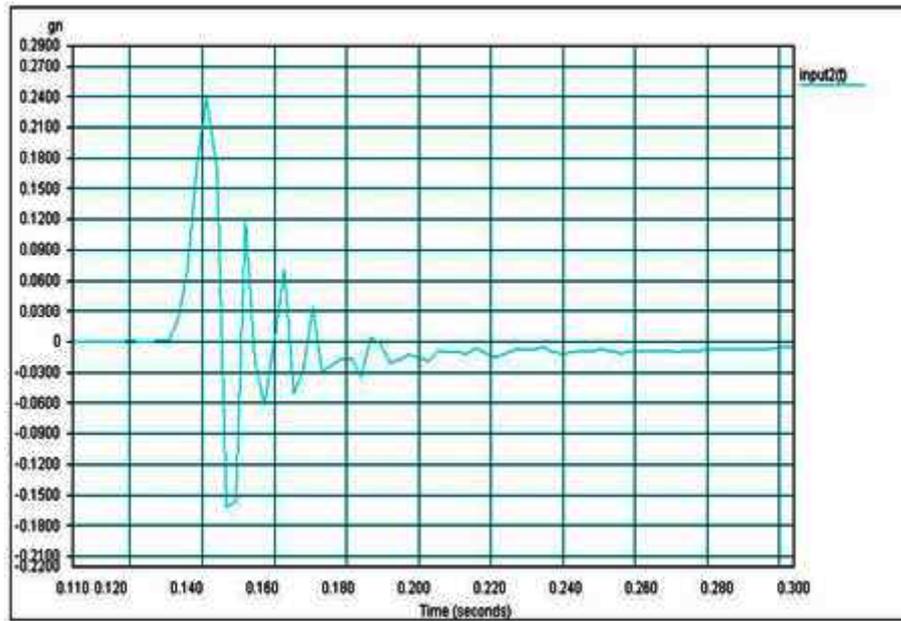


圖 4-25 新竹砂相對密度 70%、飽和度 0%、細料含量 0%時加速度

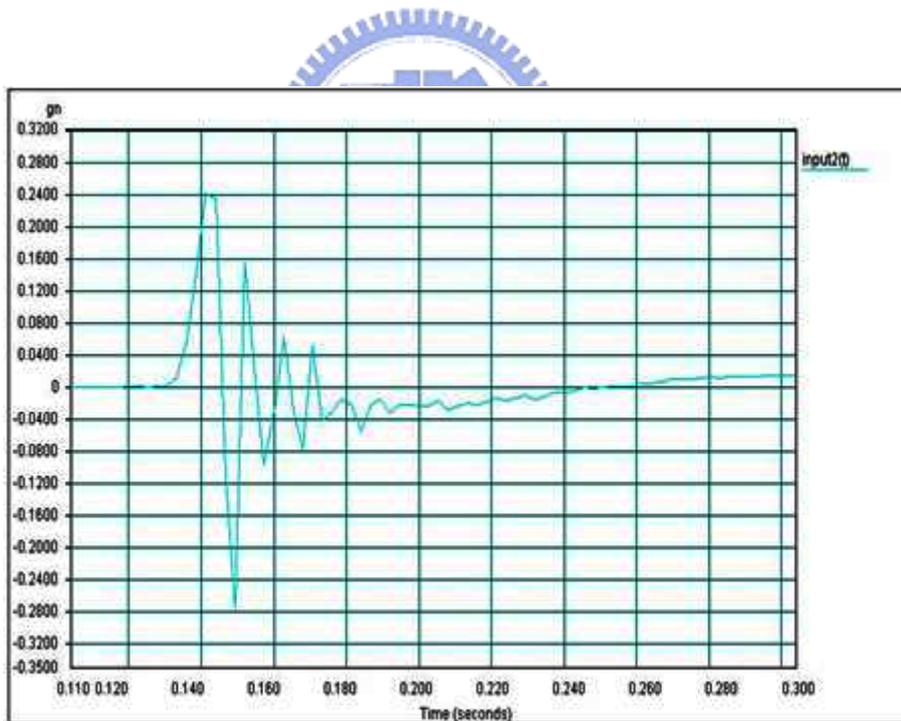


圖 4-26 新竹砂相對密度 70%、飽和度 0%、細料含量 5%時加速度

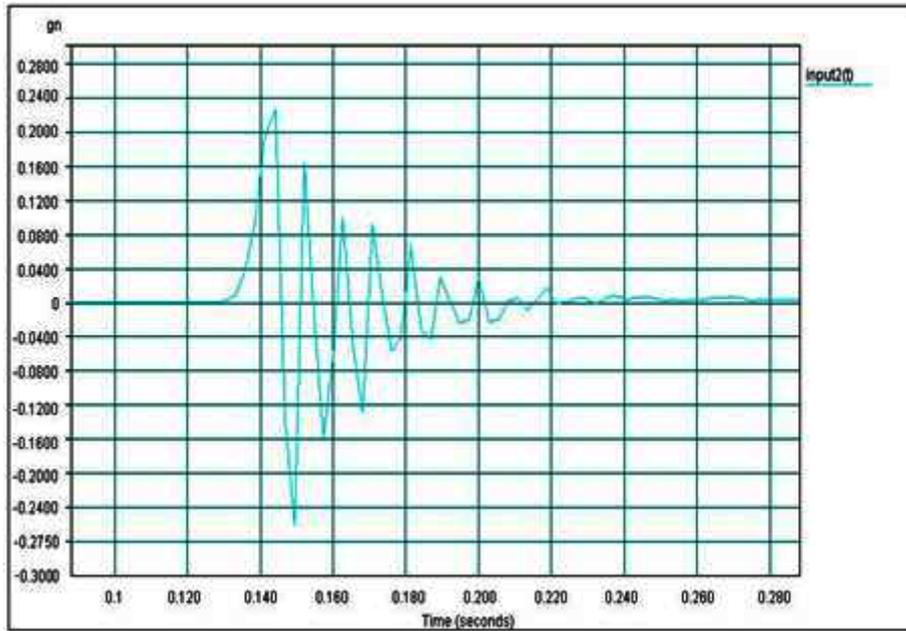


圖 4-27 新竹砂相對密度 70%、飽和度 0%、細料含量 10%時加速度

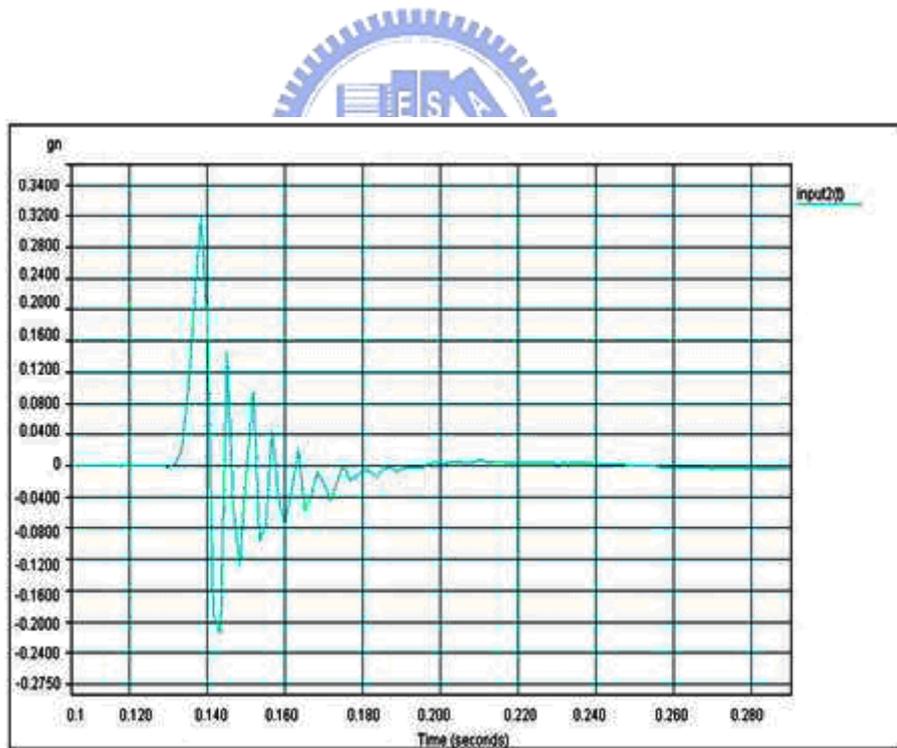


圖 4-28 新竹砂相對密度 70%、飽和度 25%、細料含量 0%時加速度

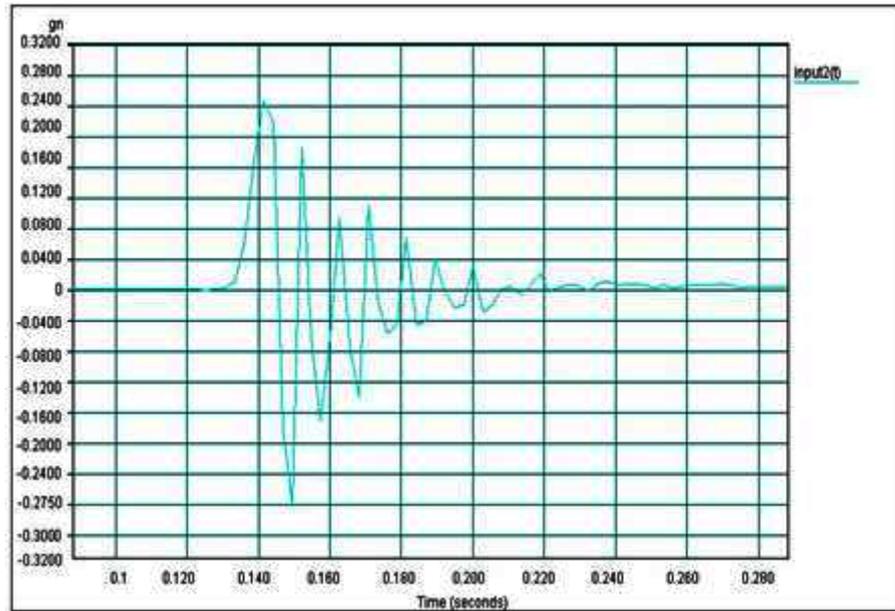


圖 4-29 新竹砂相對密度 70%、飽和度 25%、細料含量 5%時加速度

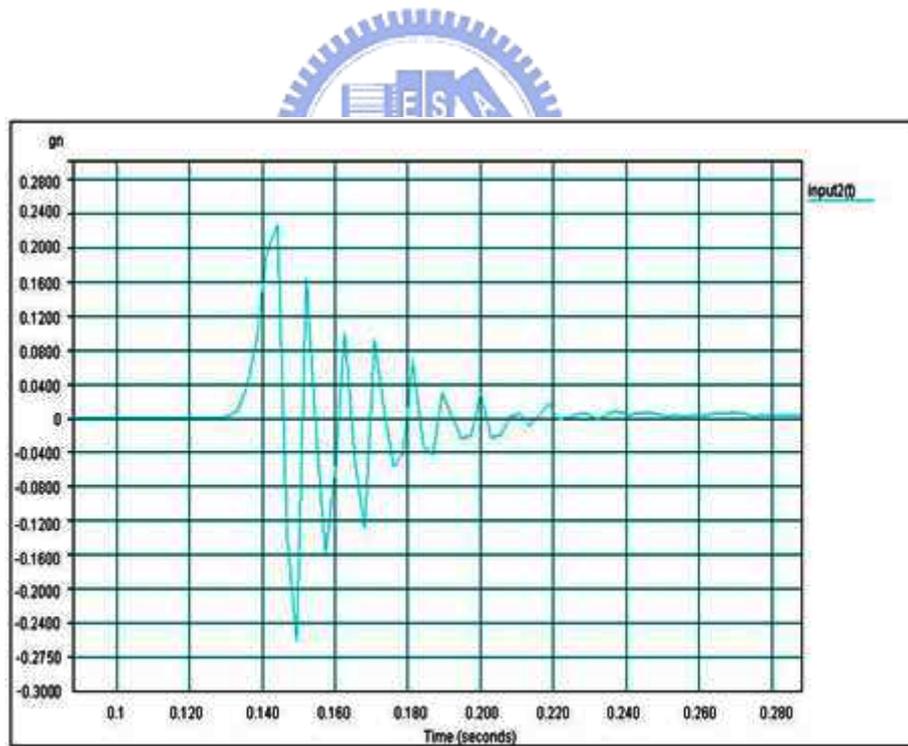


圖 4-30 新竹砂相對密度 70%、飽和度 25%、細料含量 10%時加速度

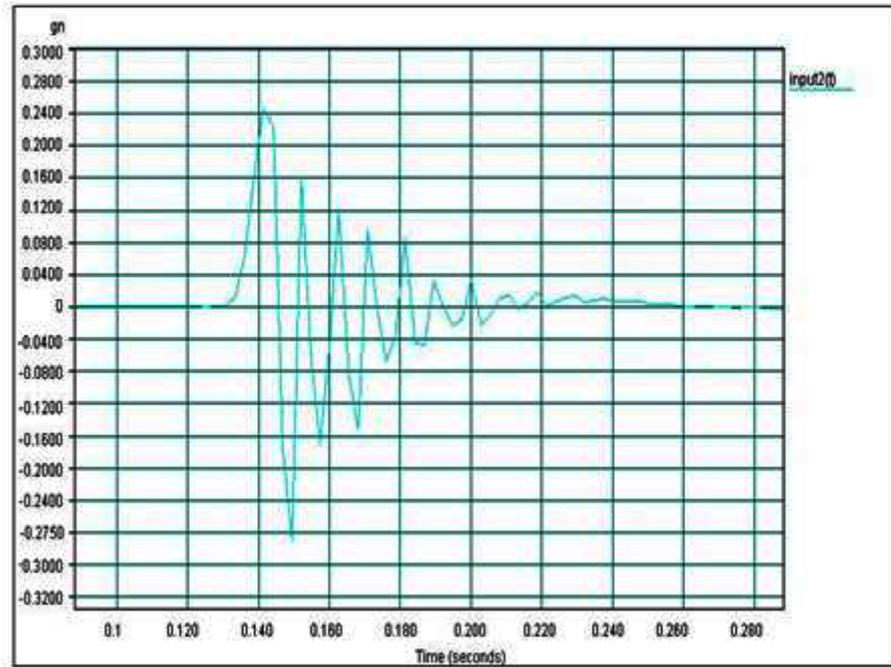


圖 4-31 新竹砂相對密度 70%、飽和度 50%、細料含量 0%時加速度

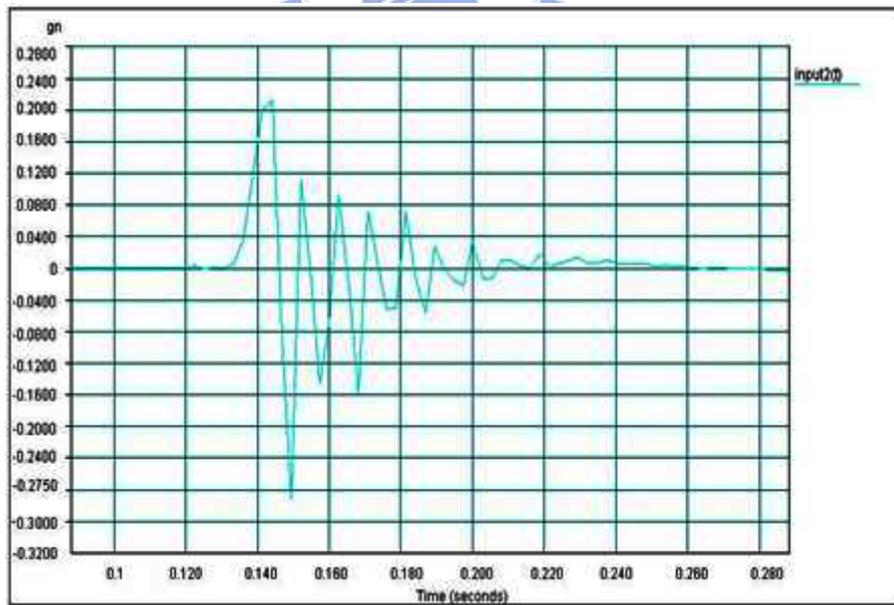


圖 4-32 新竹砂相對密度 70%、飽和度 50%、細料含量 5%時加速度

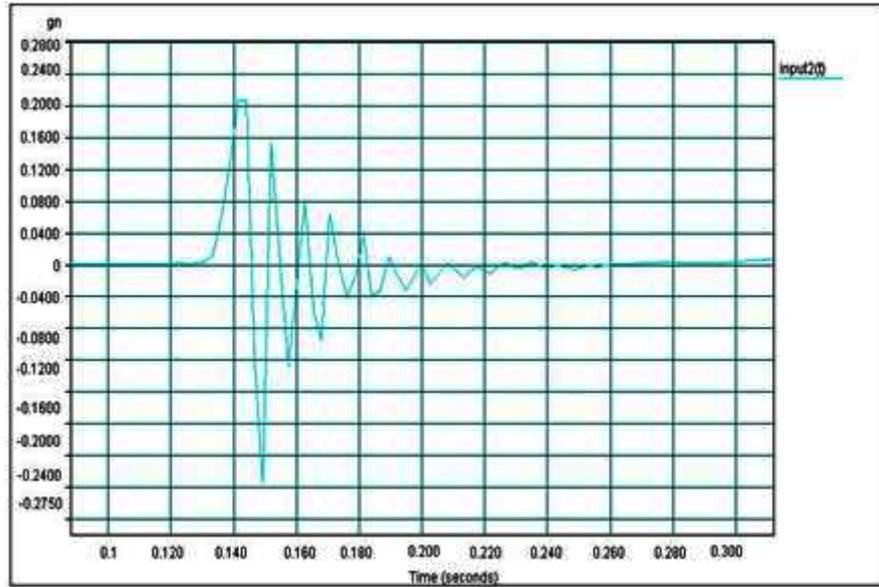


圖 4-33 新竹砂相對密度 70%、飽和度 50%、細料含量 10%時加速度

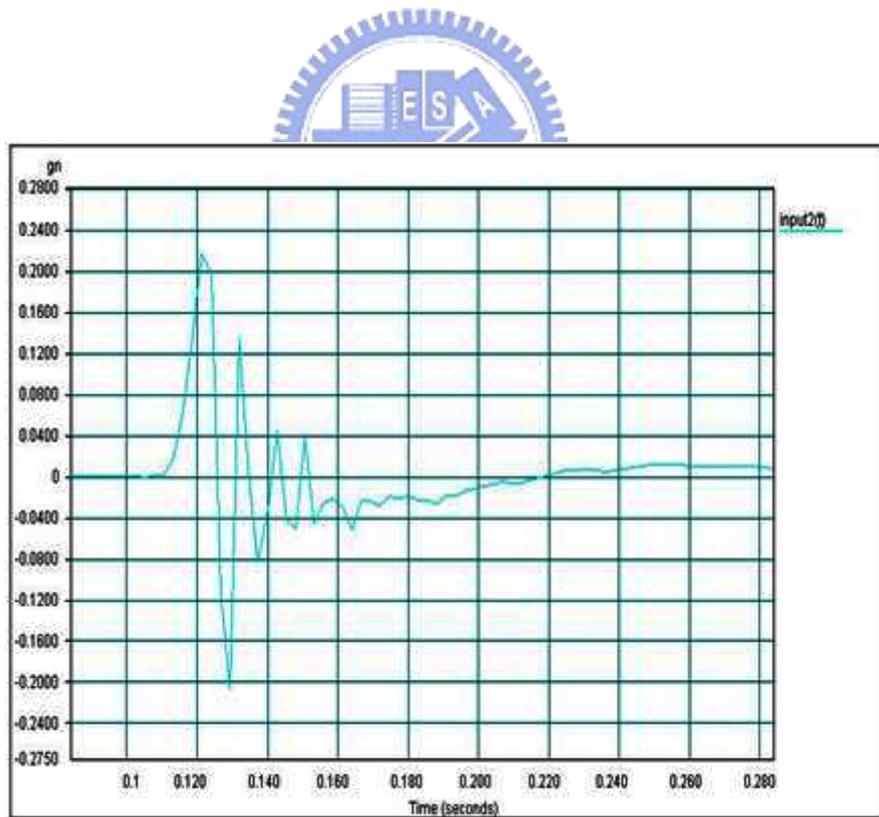


圖 4-34 新竹砂相對密度 70%、飽和度 100%、細料含量 0%時加速度

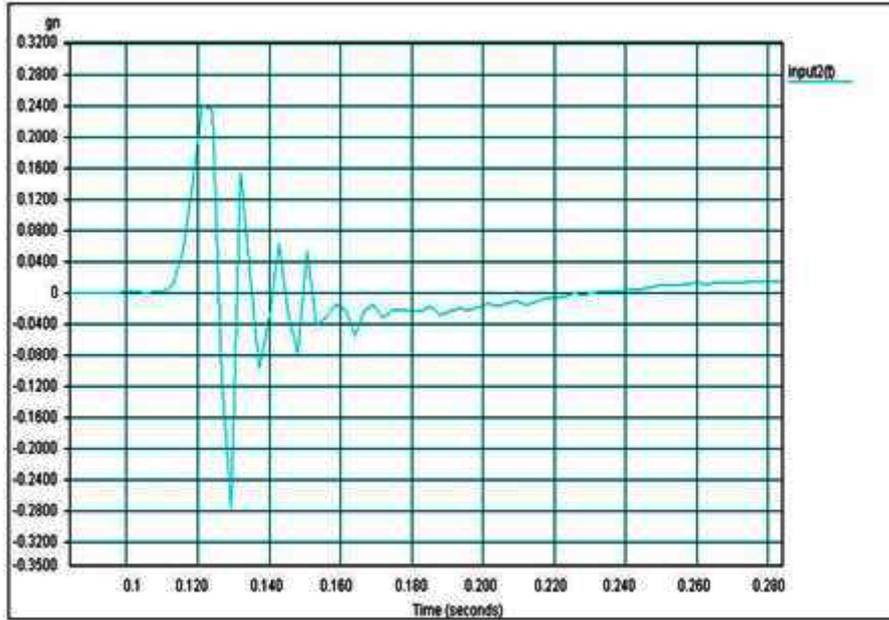


圖 4-35 新竹砂相對密度 70%、飽和度 100%、細料含量 5%時加速度

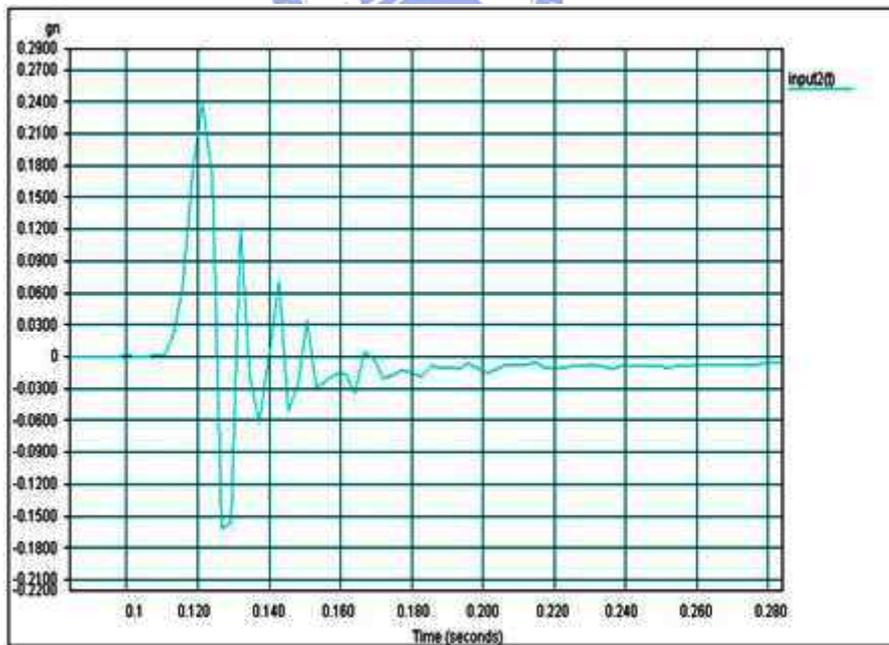


圖 4-36 新竹砂相對密度 70%、飽和度 100%、細料含量 10%時加速度

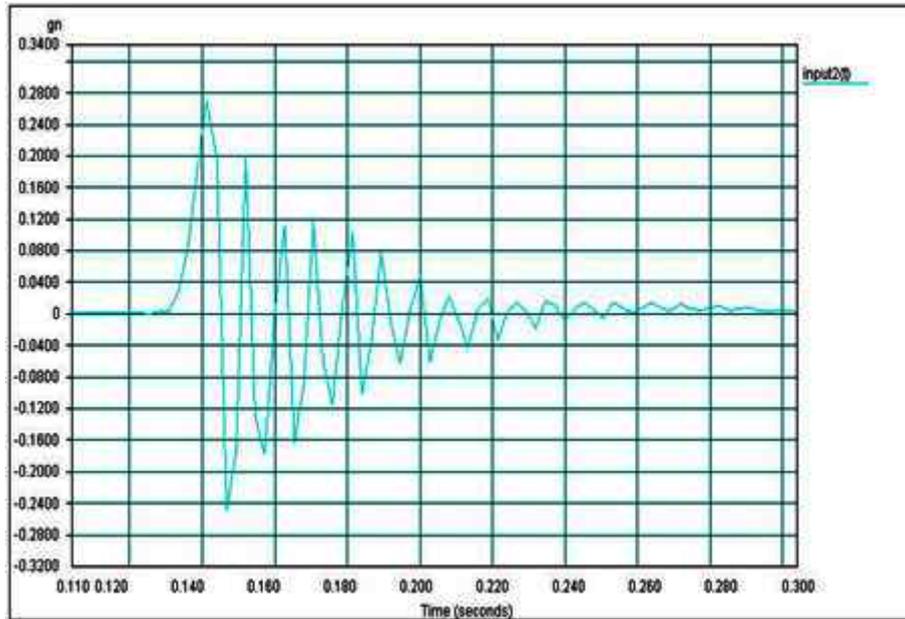


圖 4-37 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 0%

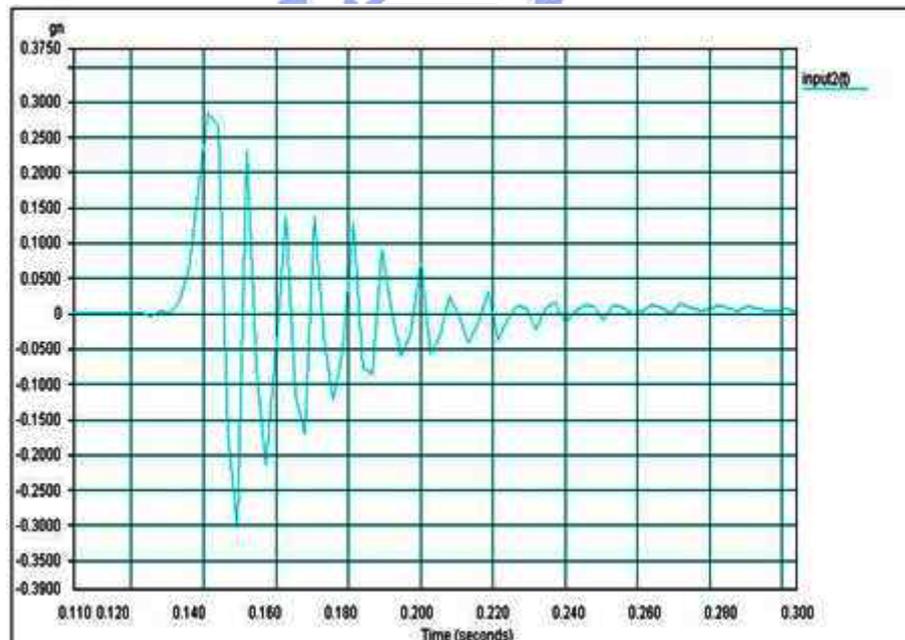


圖 4-38 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 25%

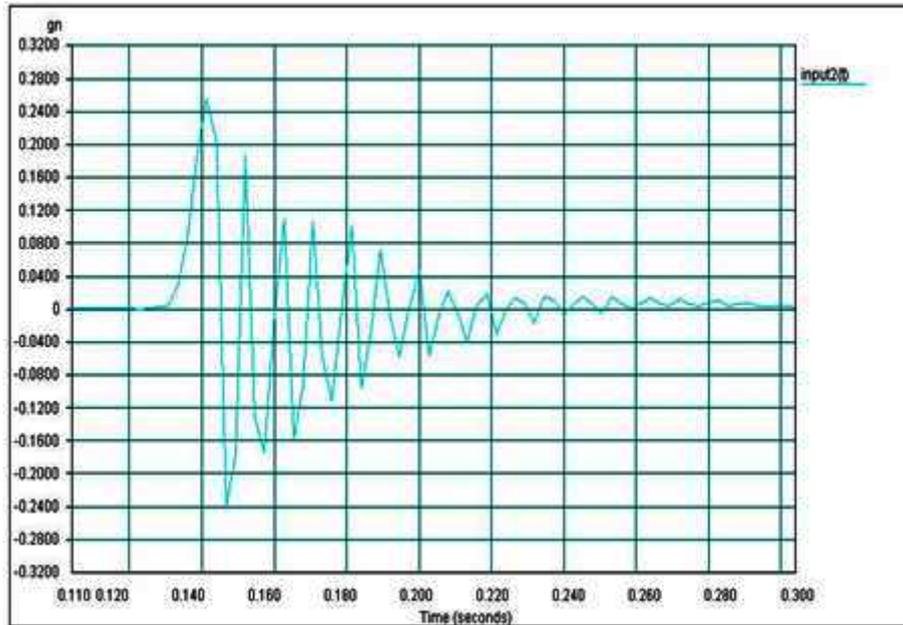


圖 4-39 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 50%

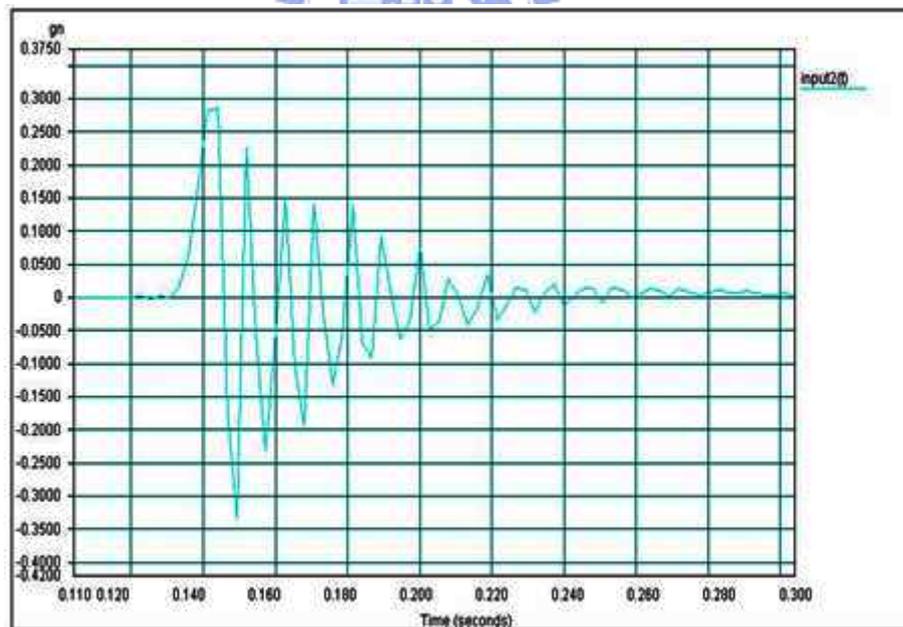


圖 4-40 渥太華砂相對密度 30%、飽和度 100%

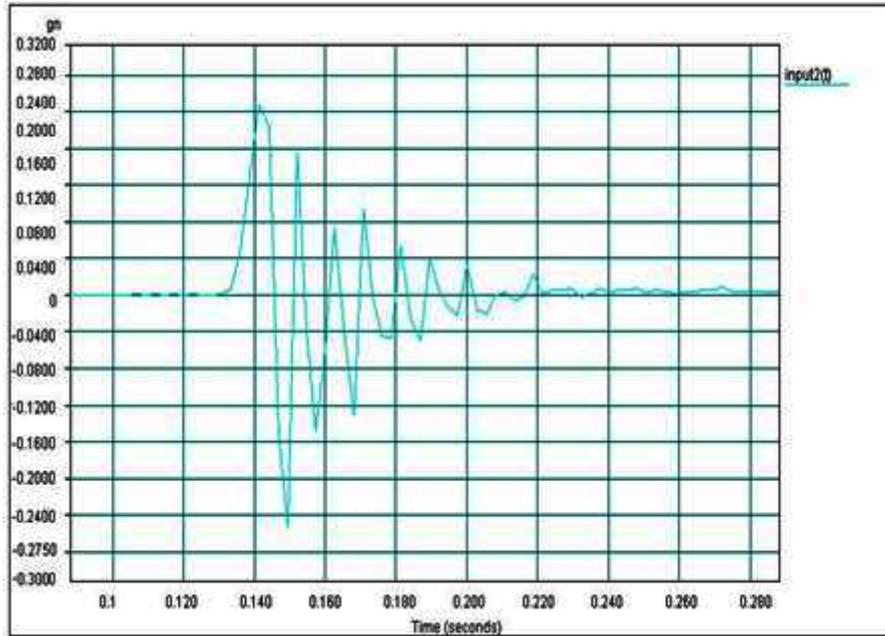


圖 4-41 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 0%

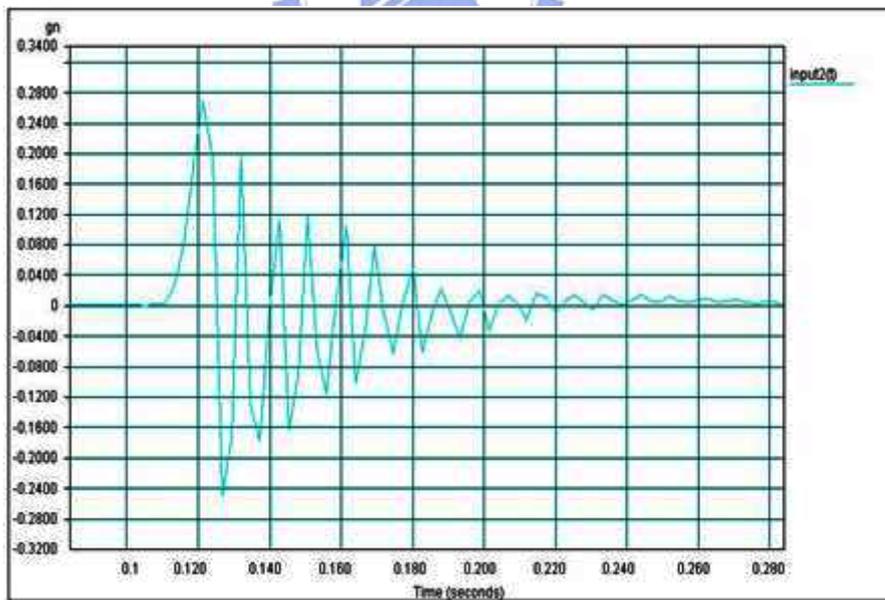


圖 4-42 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 25%

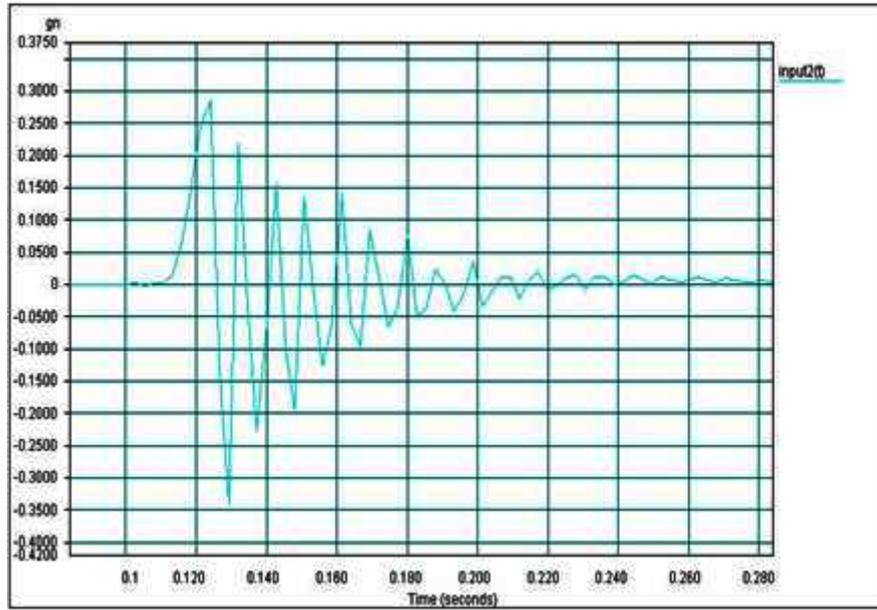


圖 4-43 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 50%

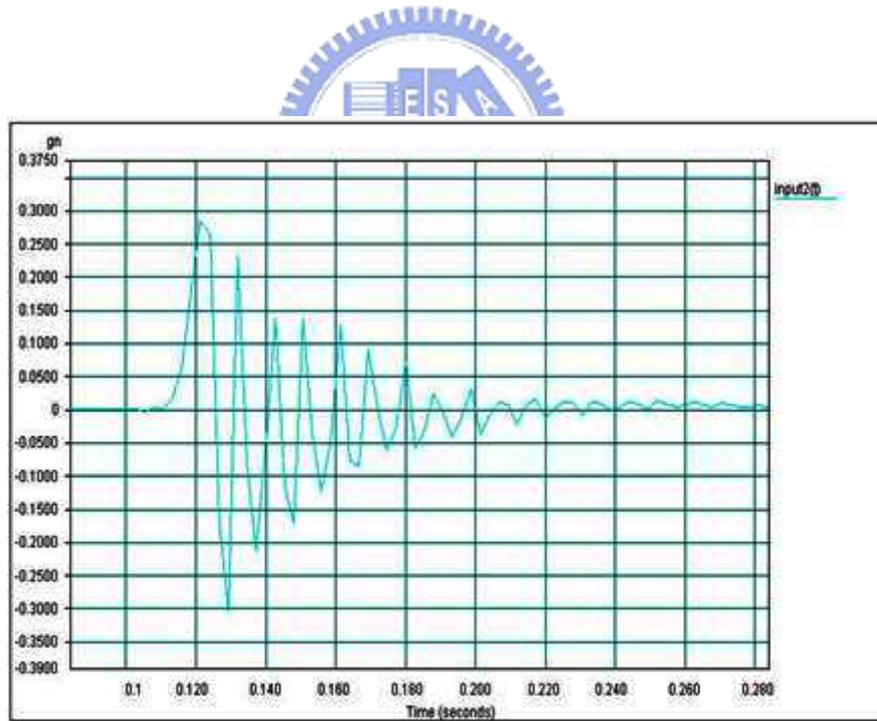


圖 4-44 渥太華砂相對密度 50%、飽和度 100%

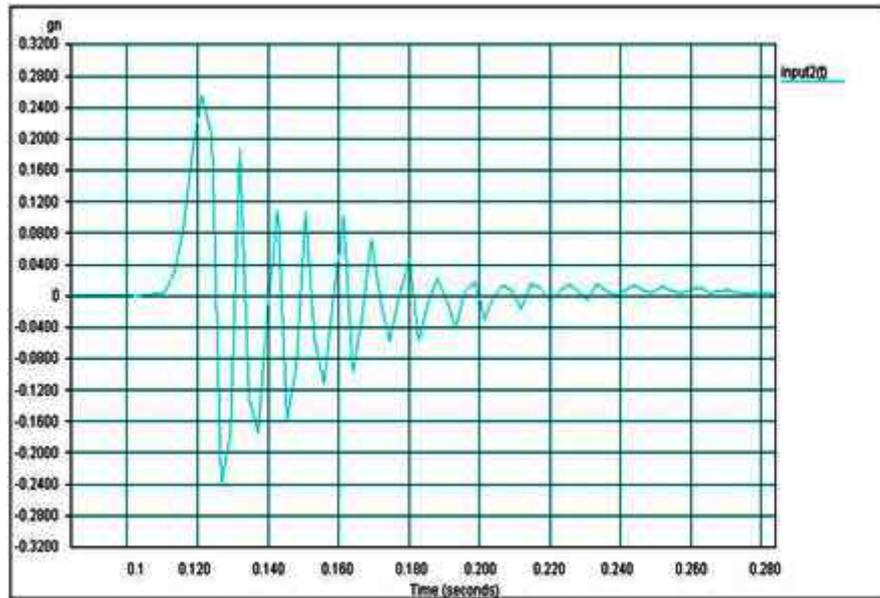


圖 4-45 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 0%

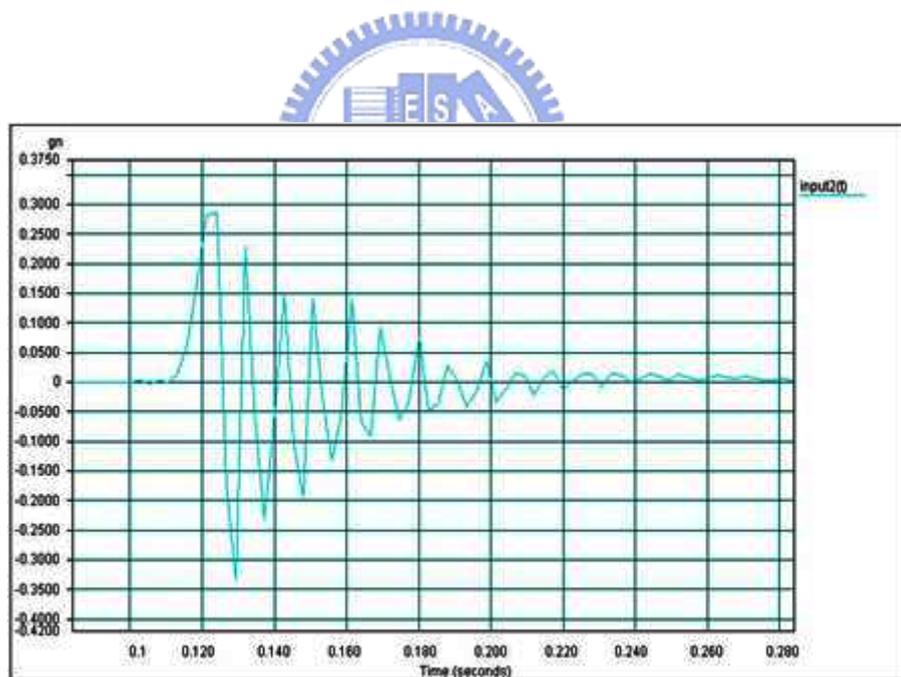


圖 4-46 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 25%

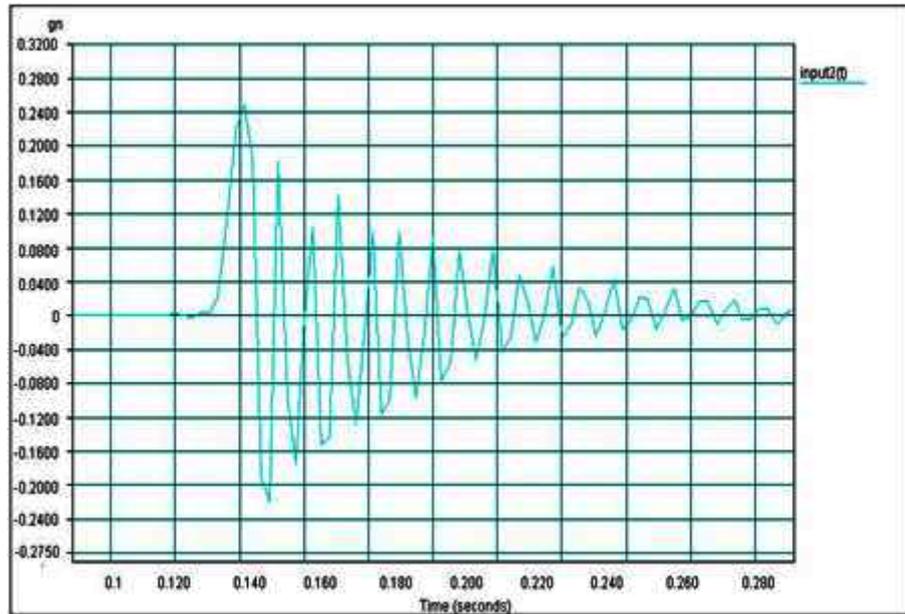


圖 4-47 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 50%

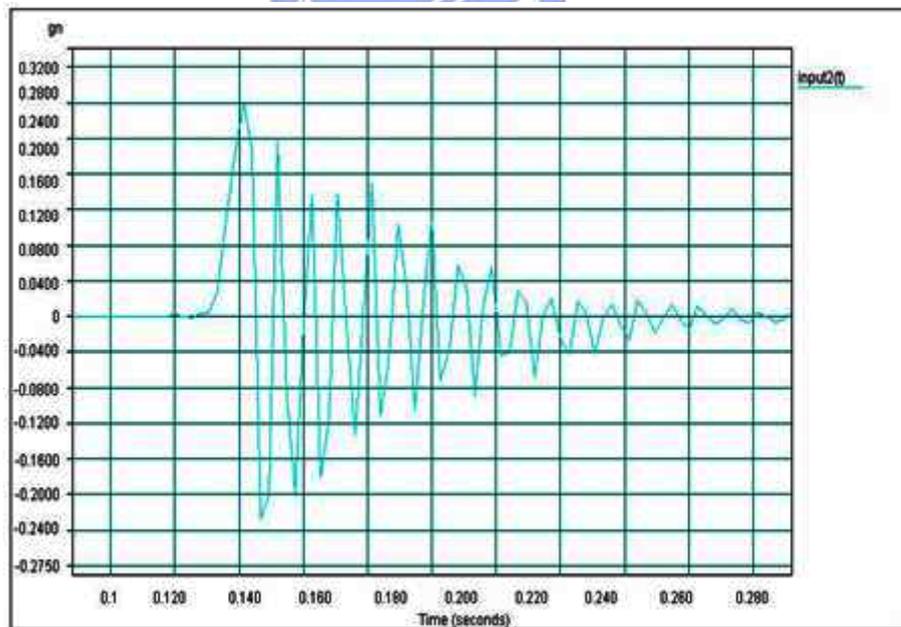


圖 4-48 渥太華砂相對密度 70%、飽和度 100%

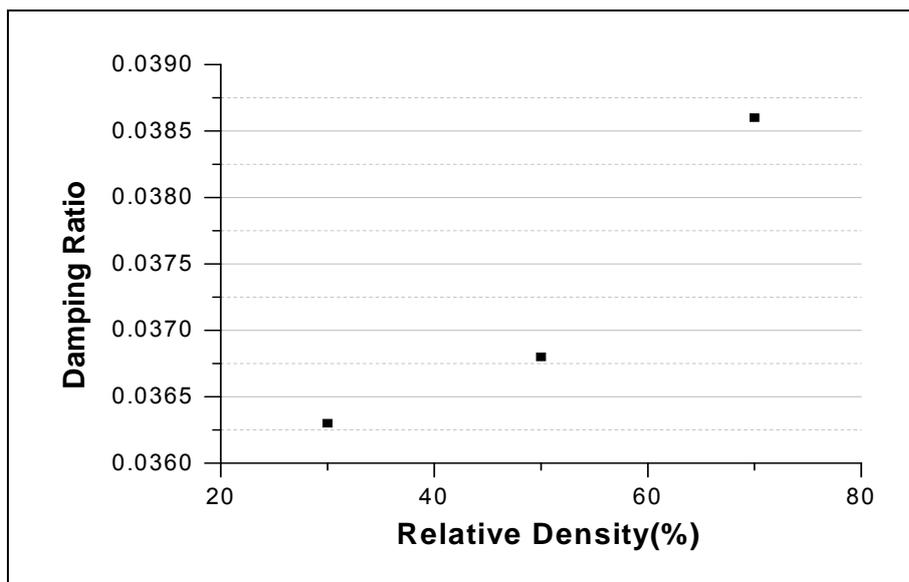


圖 4-49 新竹海岸砂在飽和度 0%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係

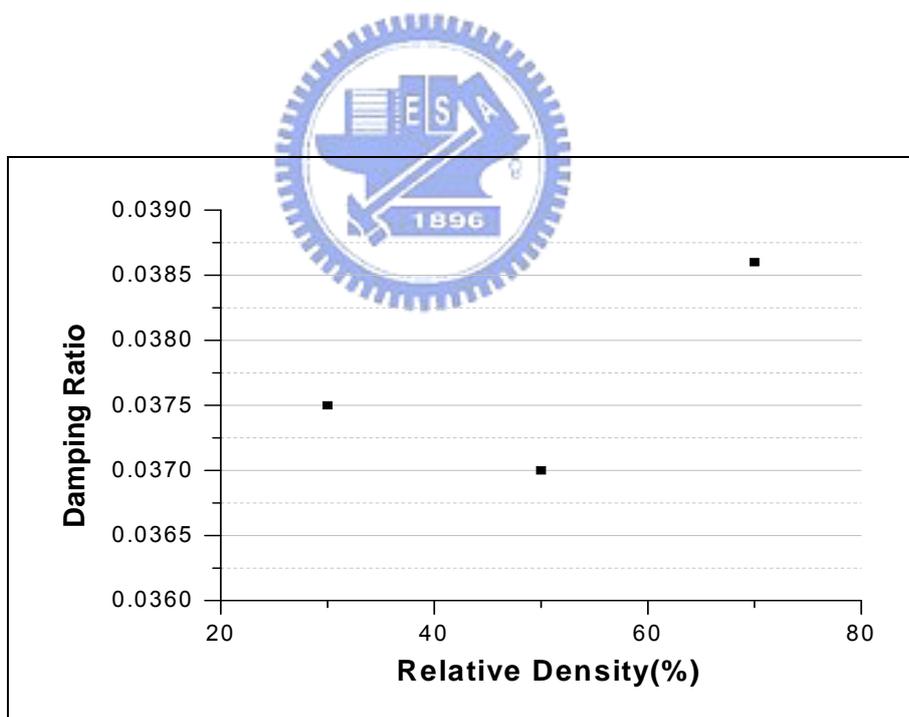


圖 4-50 新竹海岸砂在飽和度 25%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係

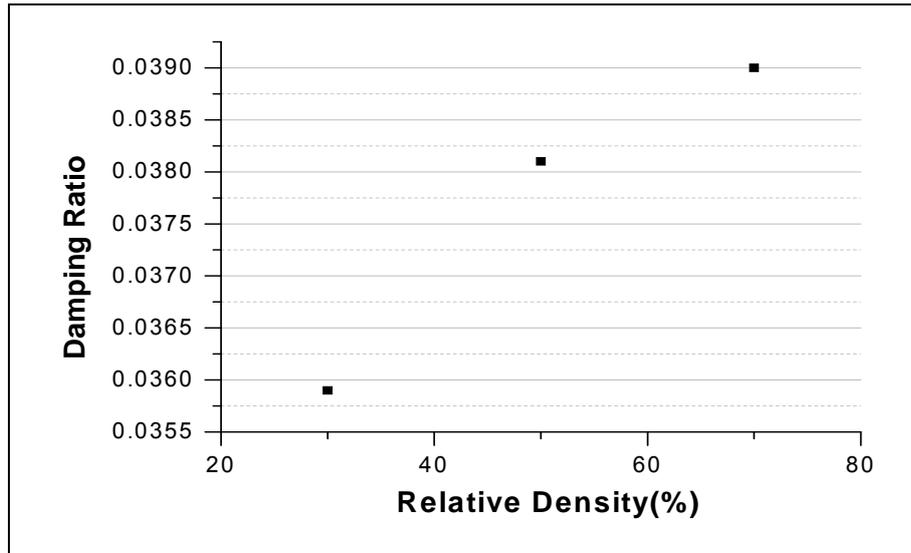


圖 4-51 新竹海岸砂在飽和度 50%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係

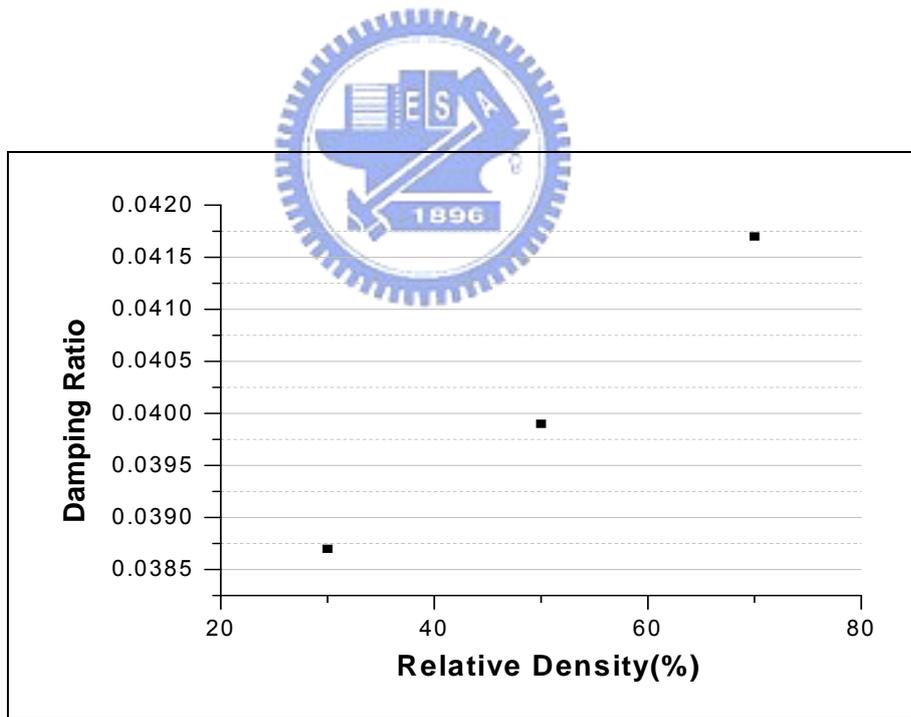


圖 4-52 新竹海岸砂在飽和度 100%、相同細料含量下，其不同相對密度與其阻尼比關係

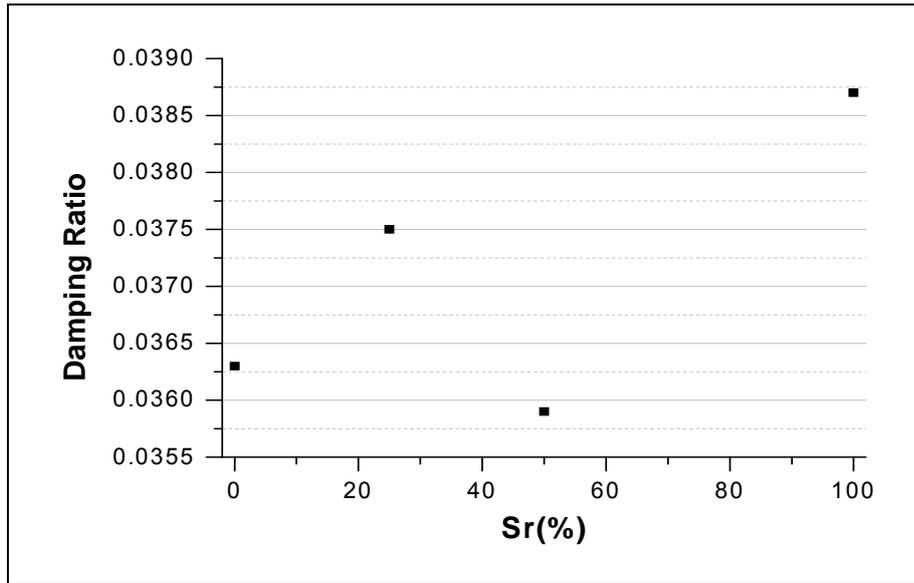


圖 4-53 新竹海岸砂在相對密度 30%、相同細料含量下，不同的飽和度與其阻尼比關係

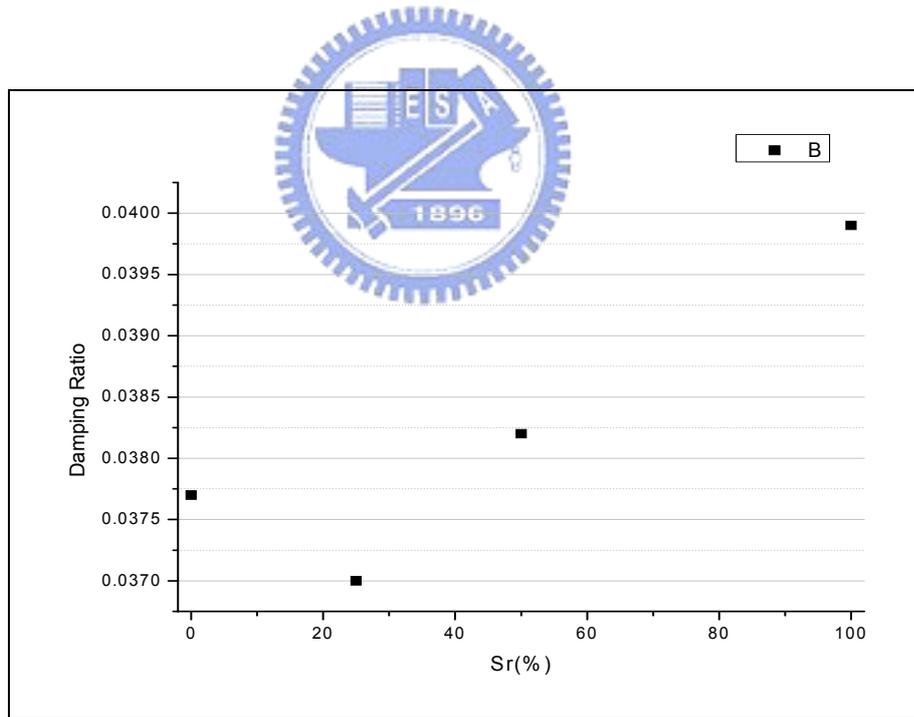


圖 4-54 新竹海岸砂在相對密度 50%、相同細料含量下，不同的飽和度與其阻尼比關係

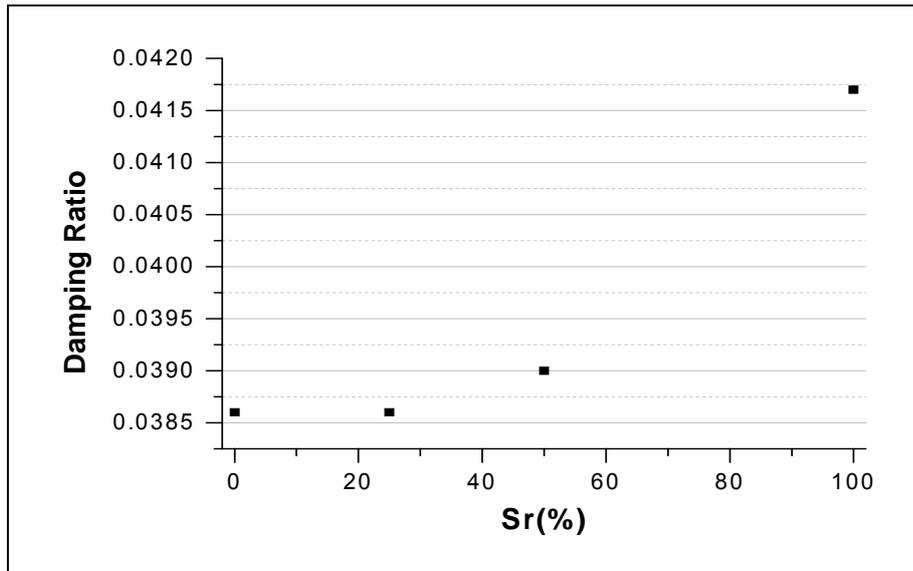


圖 4-55 新竹海岸砂在相對密度 70%、相同細料含量下，不同的飽和度與其阻尼比關係

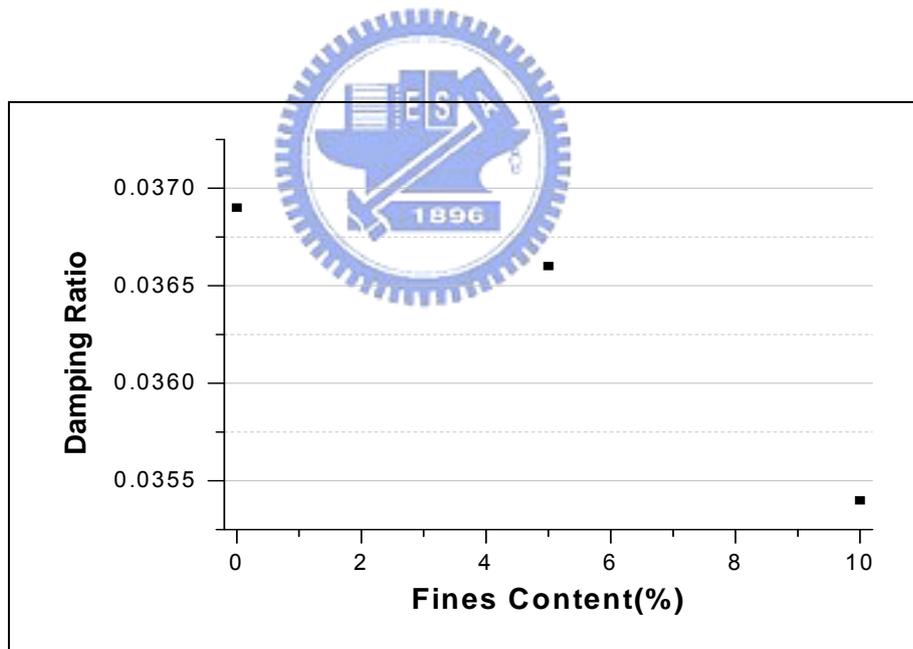


圖 4-56 新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 0%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

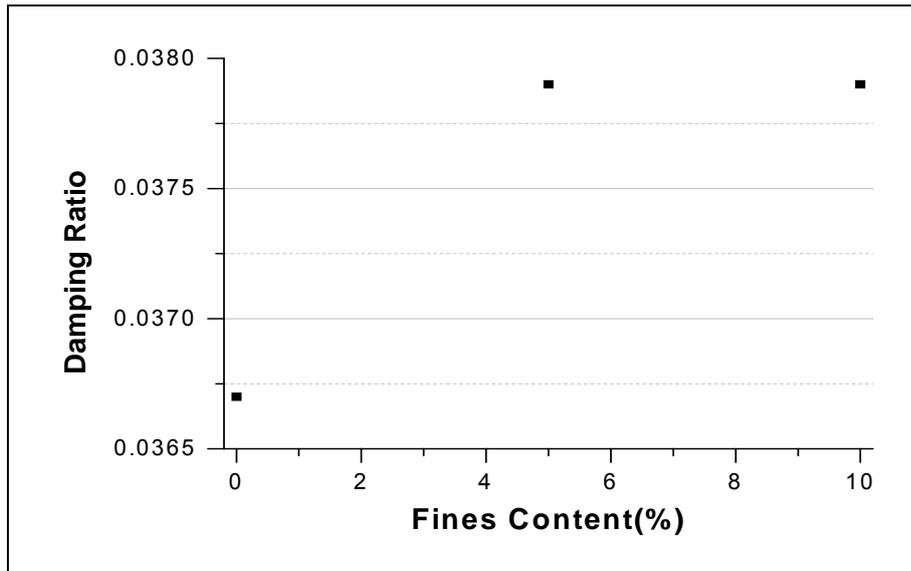


圖 4-57 新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 25%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

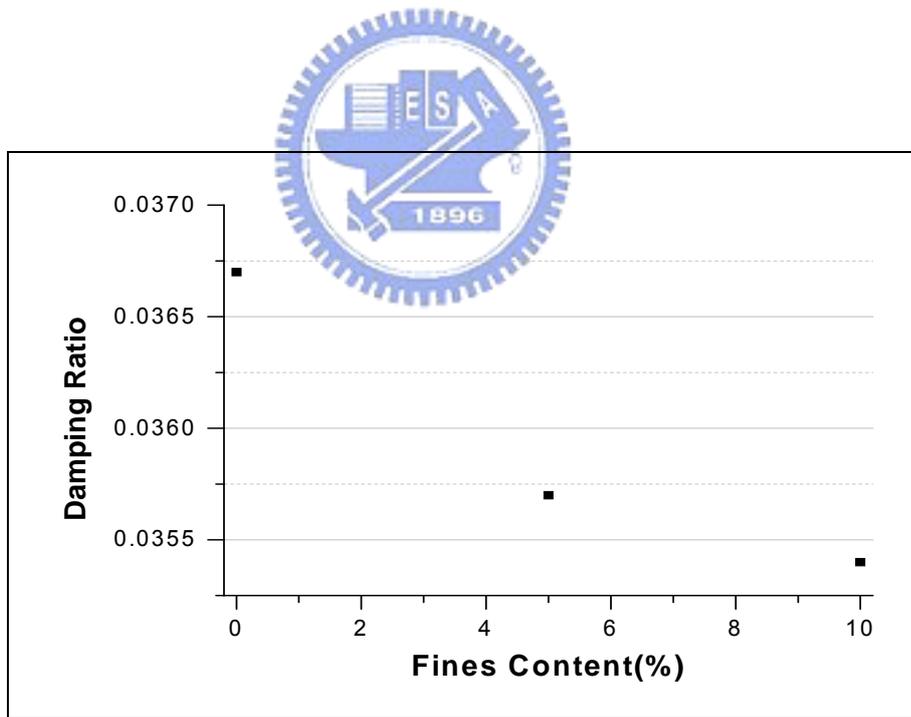


圖 4-58 新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 50%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

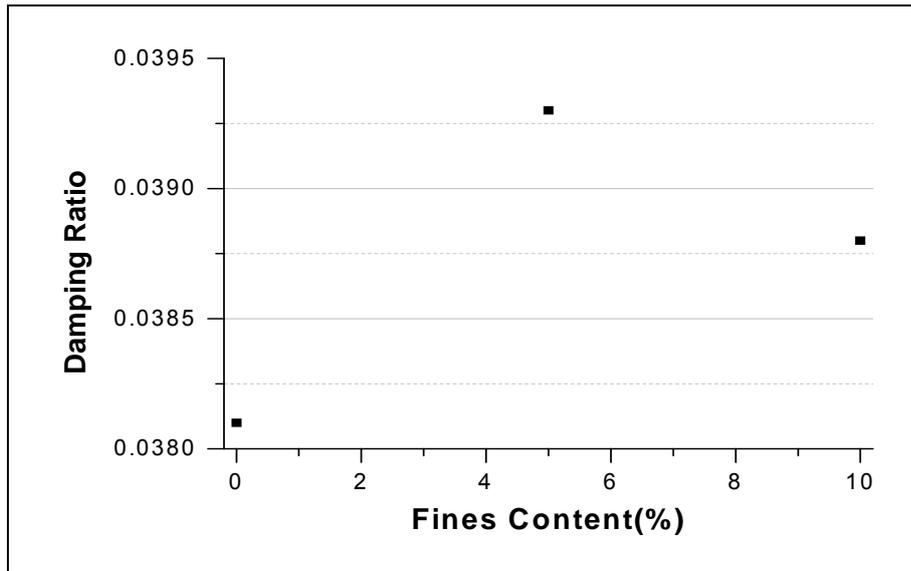


圖 4-59 新竹海岸砂相對密度 30%、飽和度 100%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

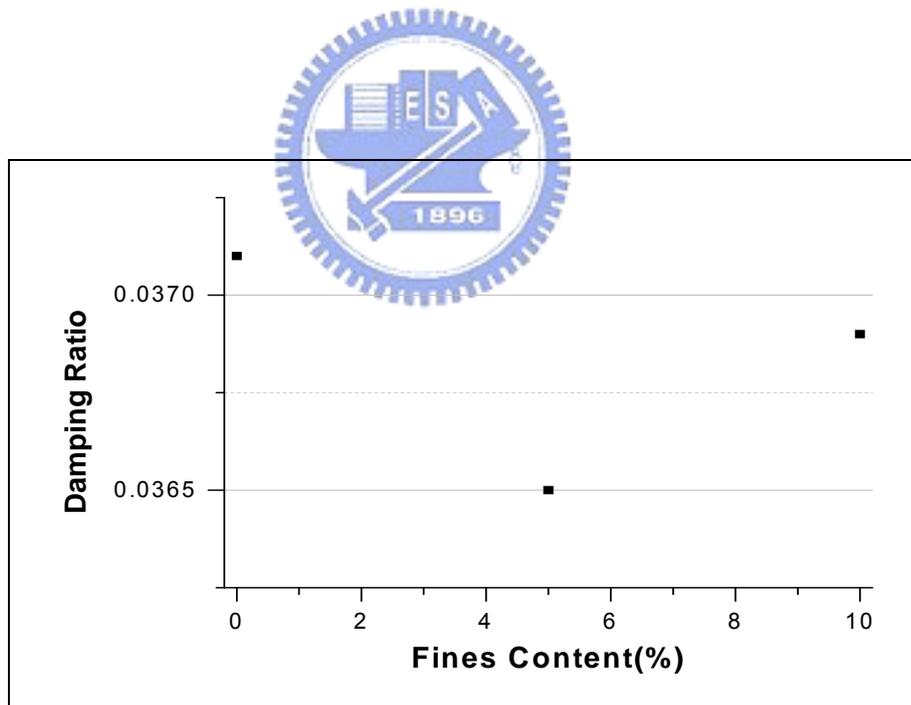


圖 4-60 新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 0%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

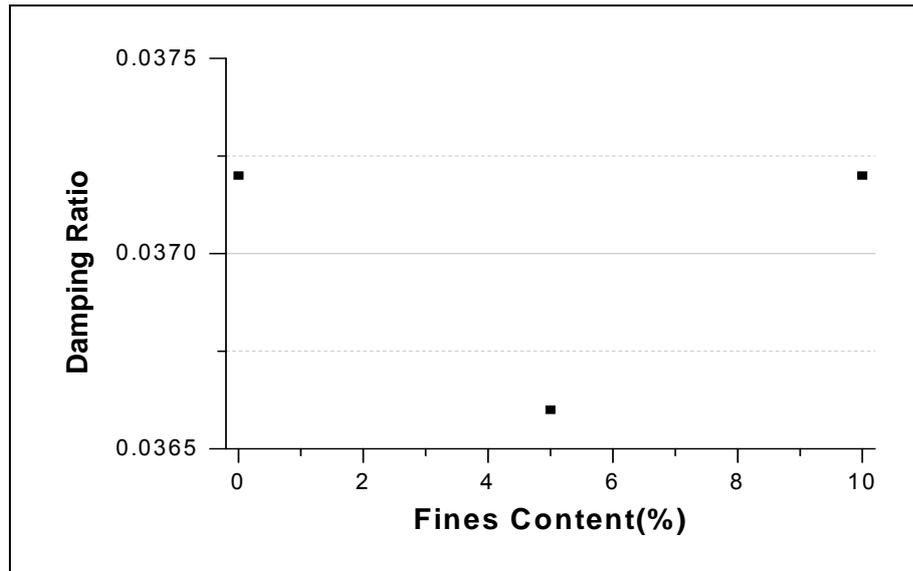


圖 4-61 新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 25%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

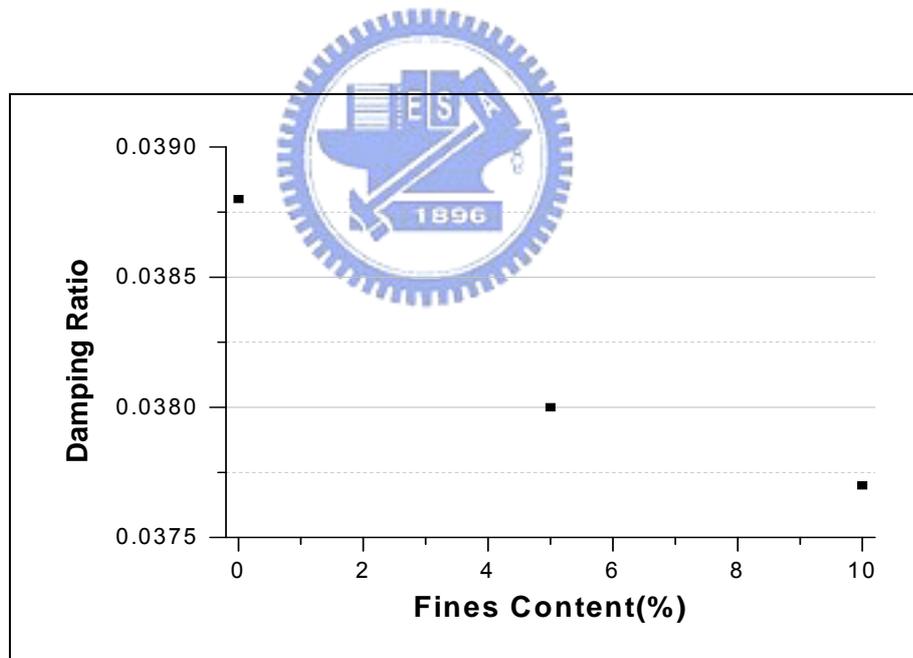


圖 4-62 新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 50%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

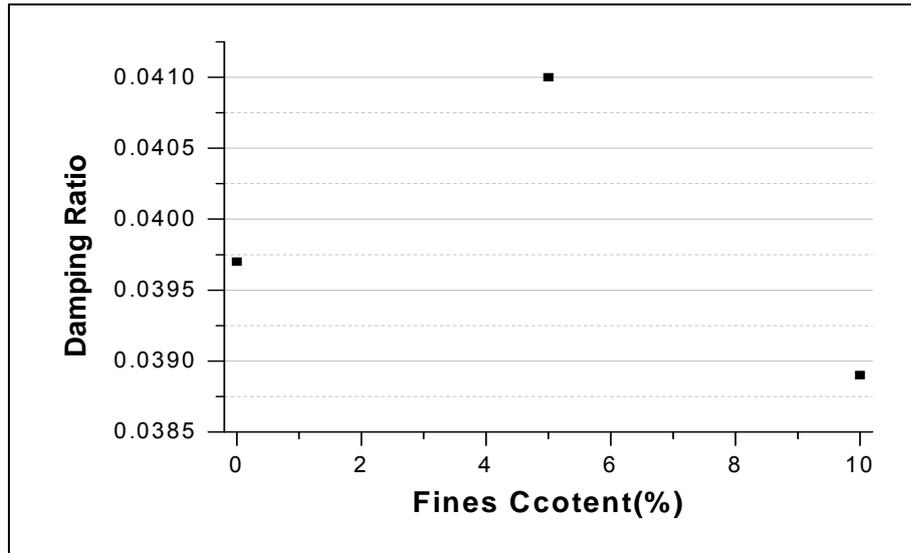


圖 4-63 新竹海岸砂相對密度 50%、飽和度 100%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

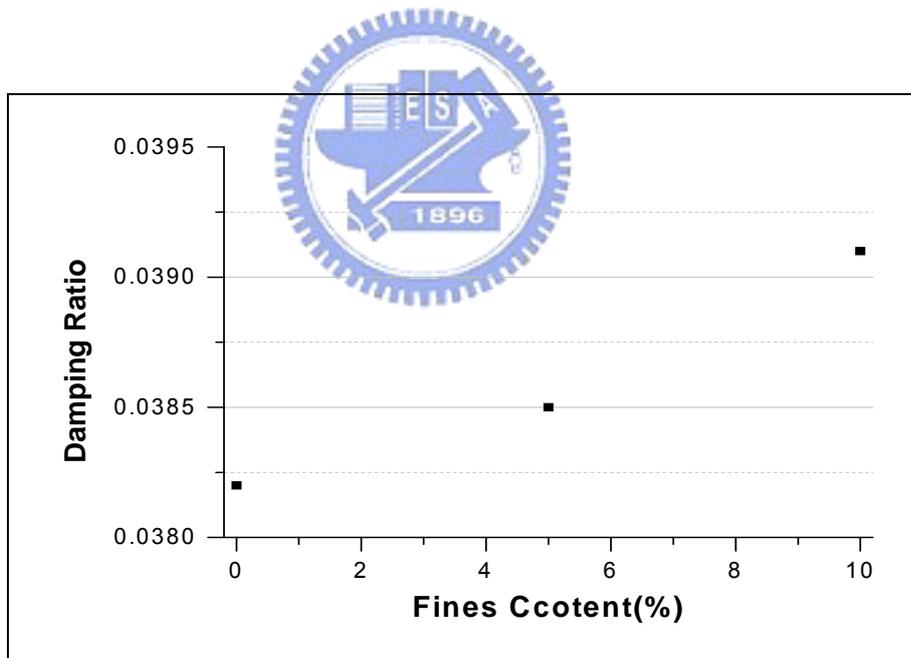


圖 4-64 新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 0%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

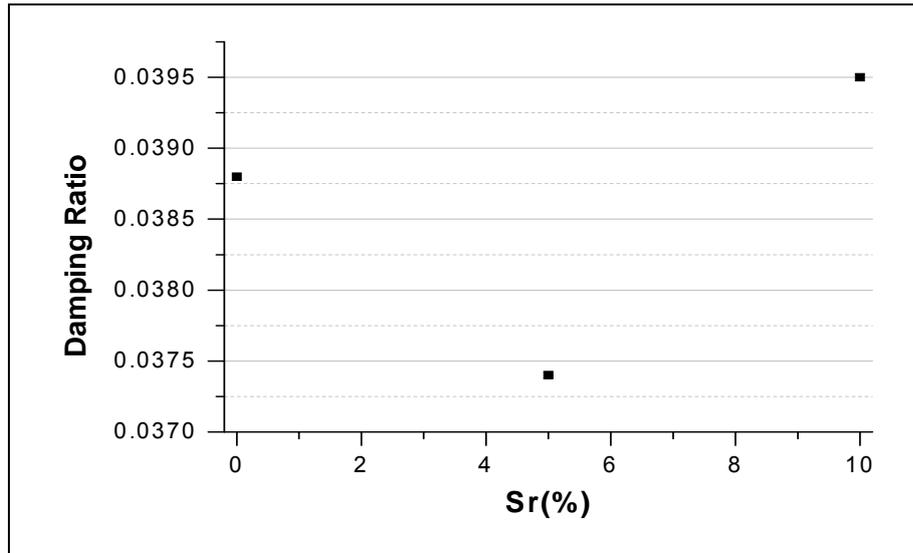


圖 4-65 新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 25%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

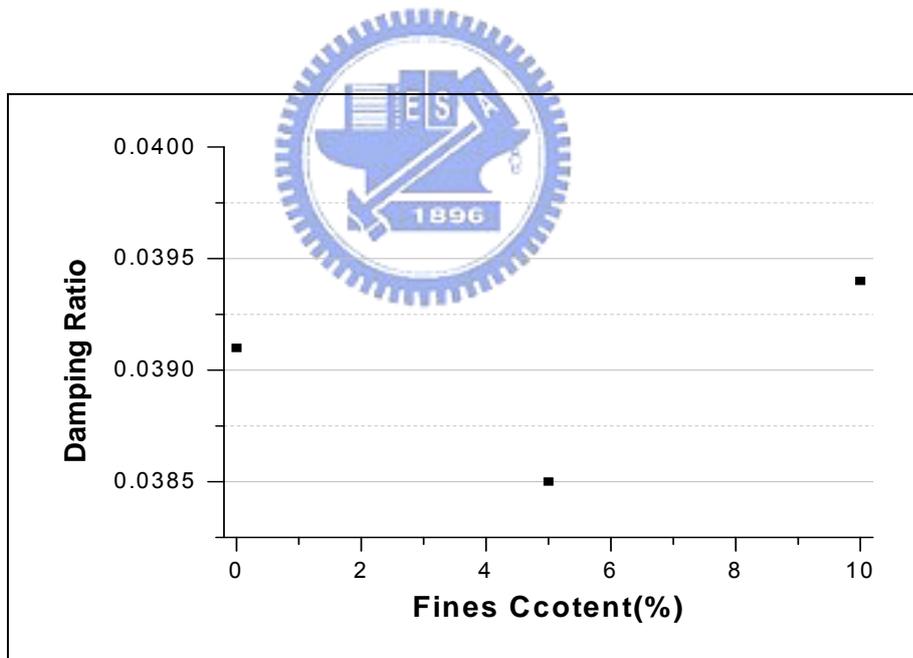


圖 4-66 新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 50%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

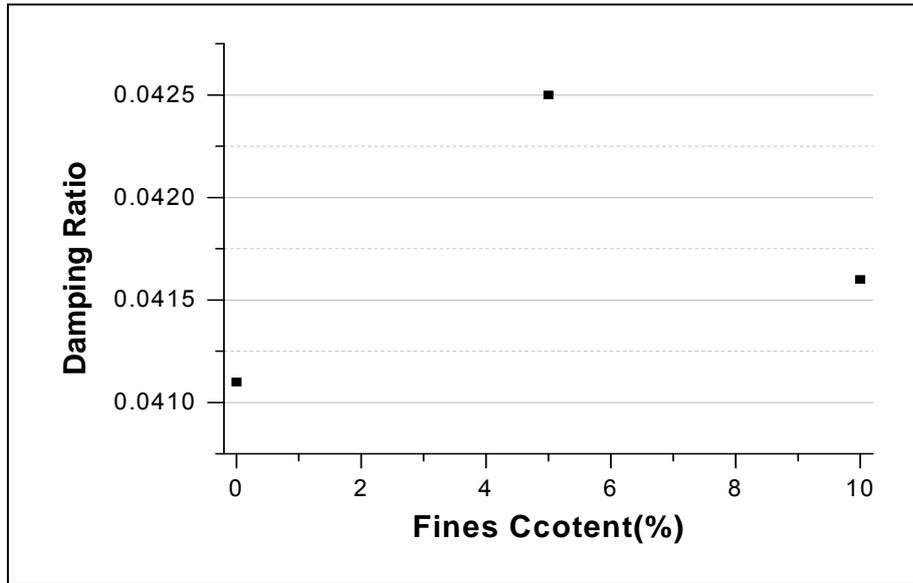


圖 4-67 新竹海岸砂相對密度 70%、飽和度 100%時，不同的細料含量與其阻尼比的關係

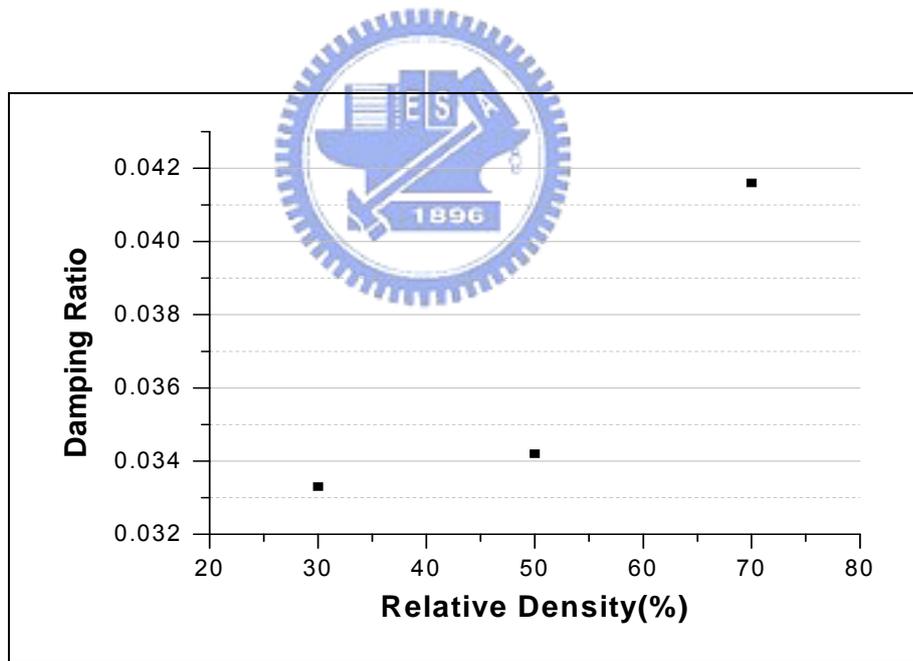


圖 4-68 渥太華標準砂在飽和度 0%時，不同相對密度所對應的阻尼比

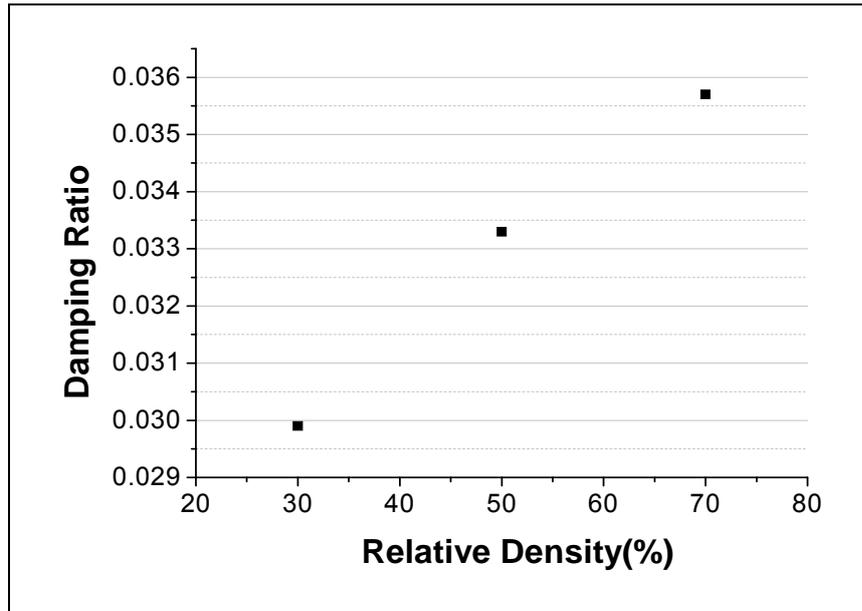


圖 4-69 渥太華標準砂在飽和度 25% 時，不同相對密度所對應的阻尼比

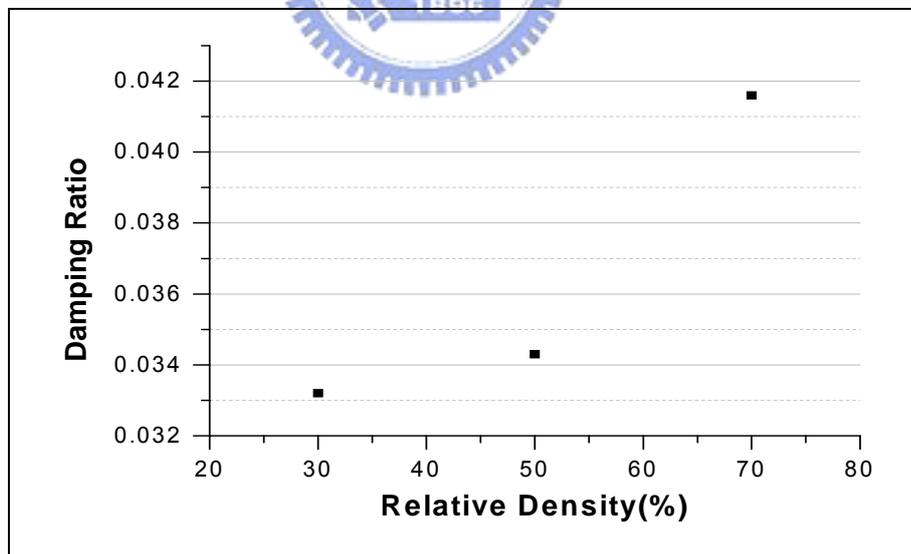


圖 4-70 渥太華標準砂在飽和度 50% 時，不同相對密度所對應的阻尼比

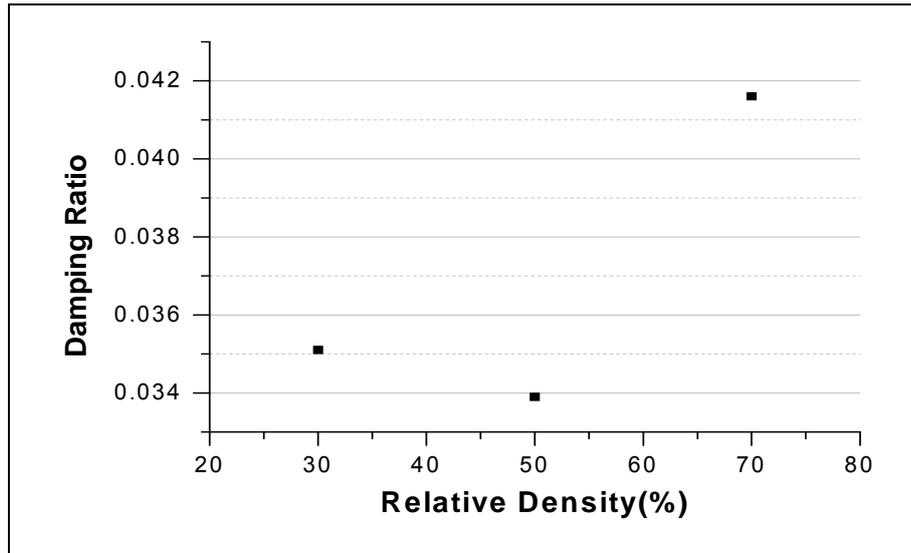


圖 4-71 渥太華標準砂在飽和度 100%時，不同相對密度所對應的阻尼比

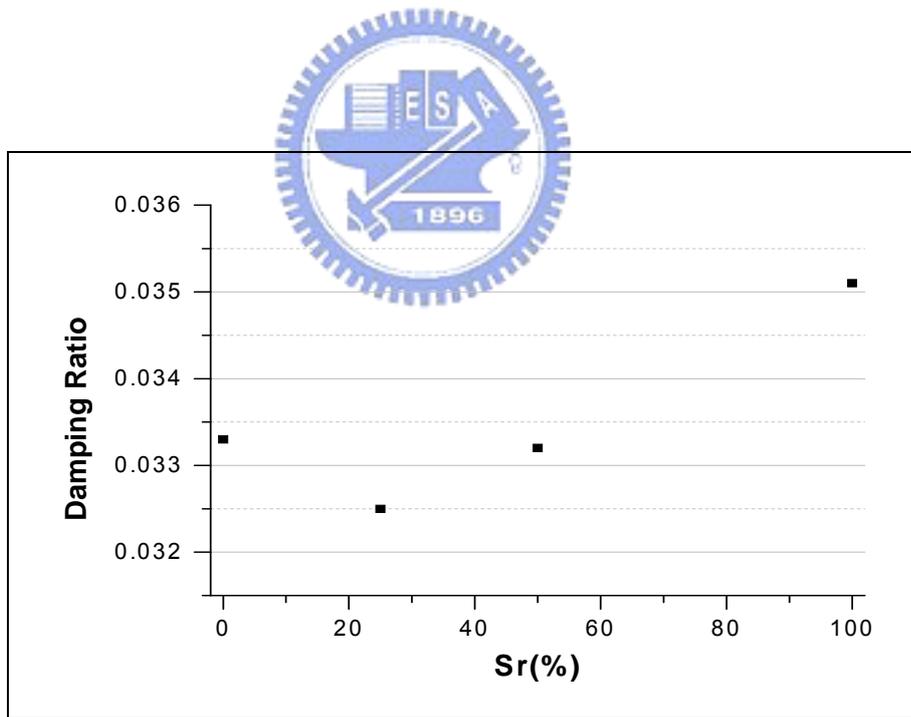


圖 4-72 渥太華標準砂在相對密度 30%時，不同飽和度所對應的阻尼比

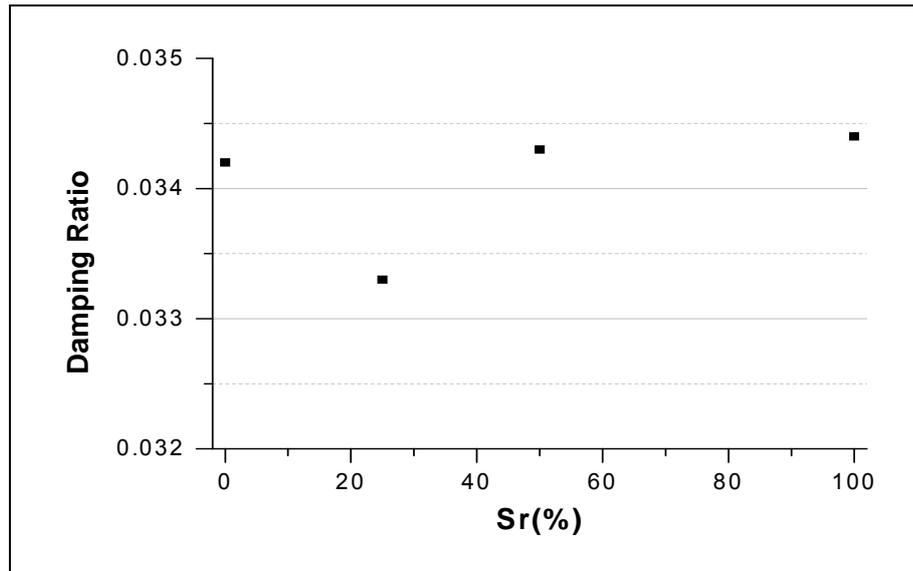


圖 4-73 渥太華標準砂在相對密度 50%時，不同飽和度所對應的阻尼比

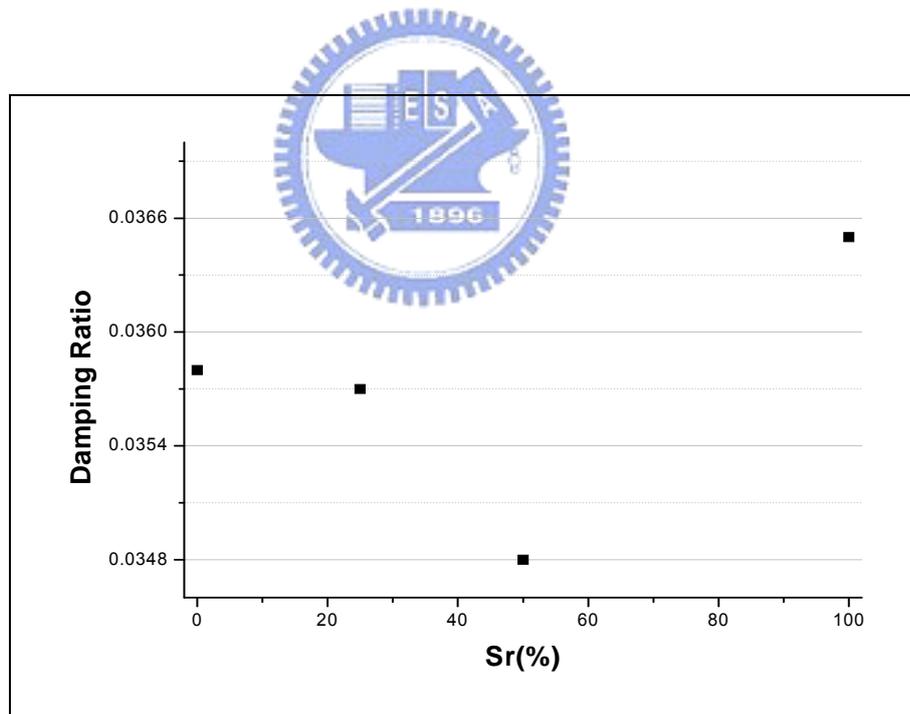


圖 4-74 渥太華標準砂在相對密度 70%時，不同飽和度所對應的阻尼比

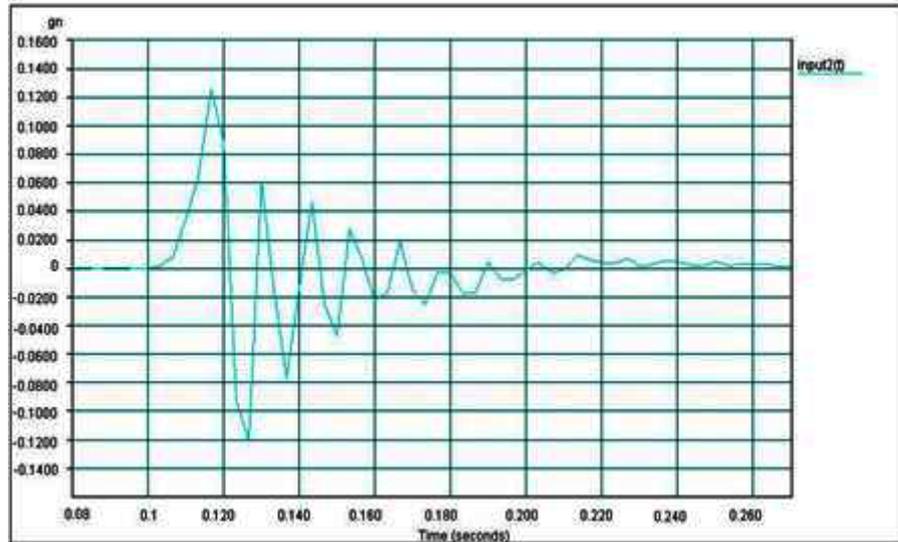


圖 4-75 新竹砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 50N

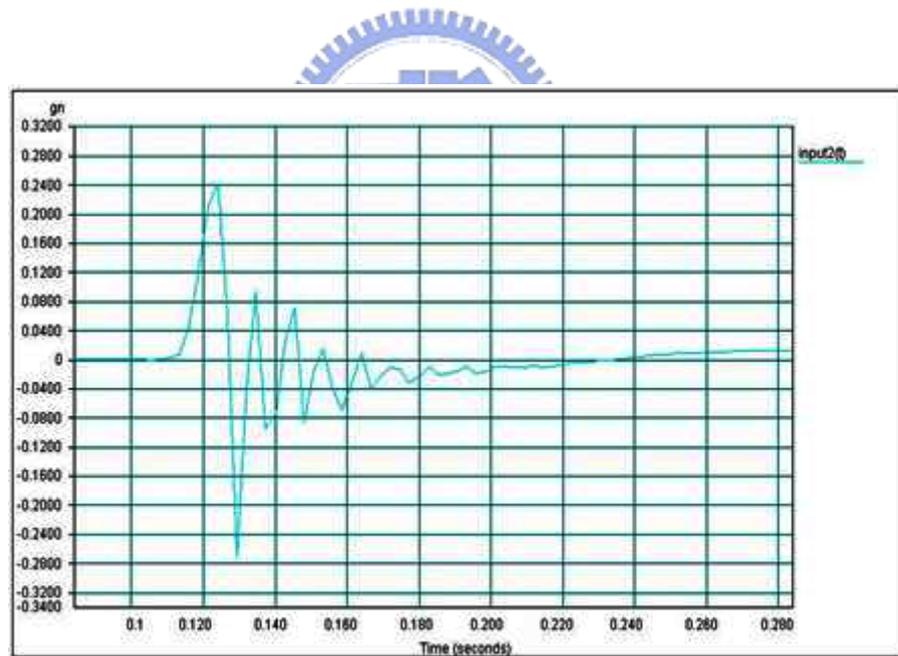


圖 4-76 新竹砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 100N

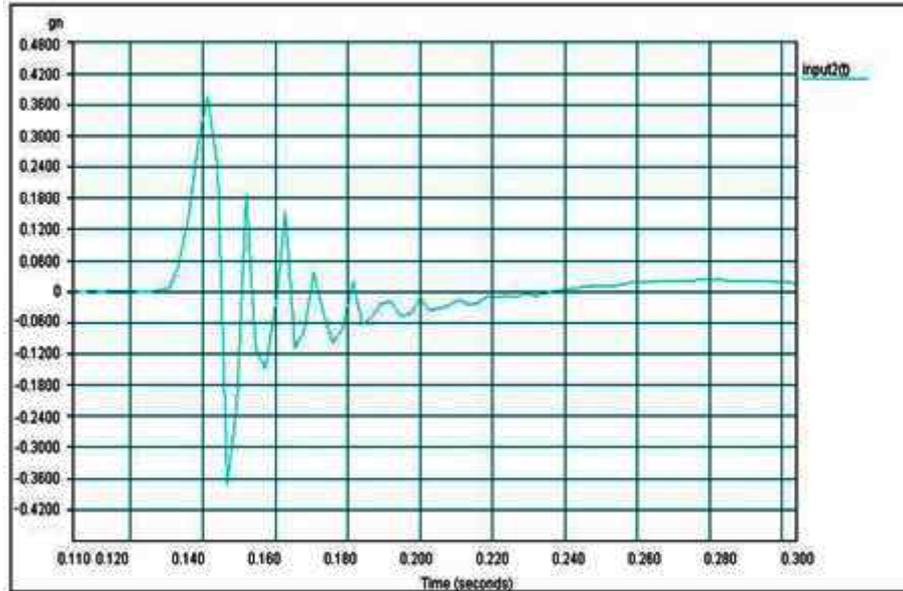


圖 4-77 新竹砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 150N

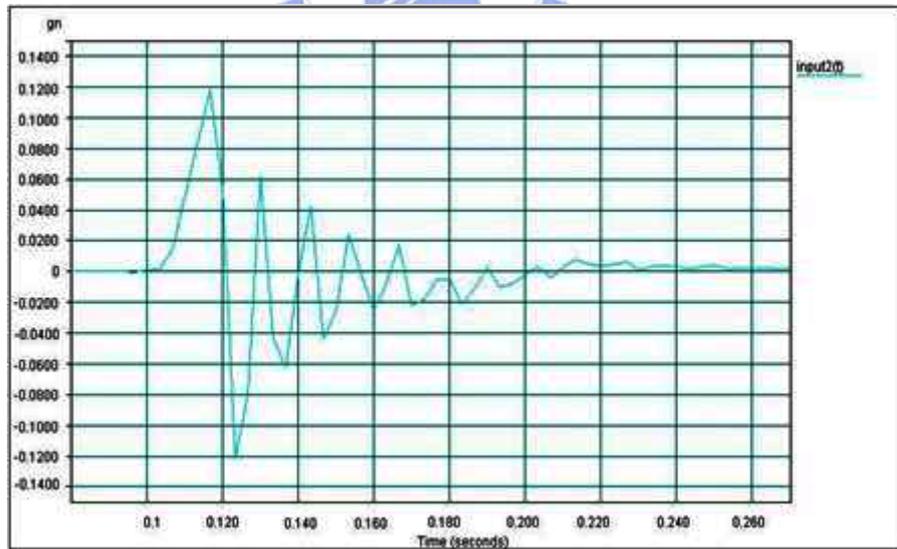


圖 4-78 新竹砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 50N

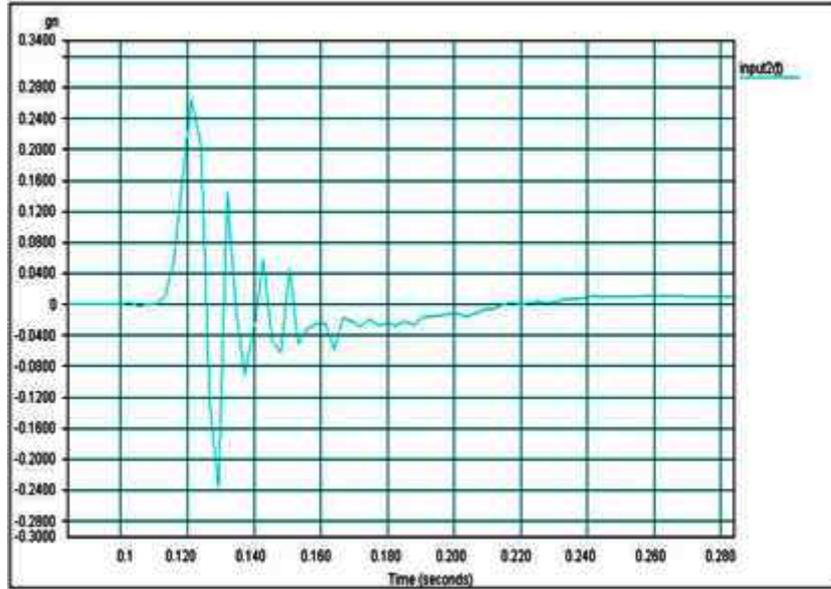


圖 4-79 新竹砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 100N

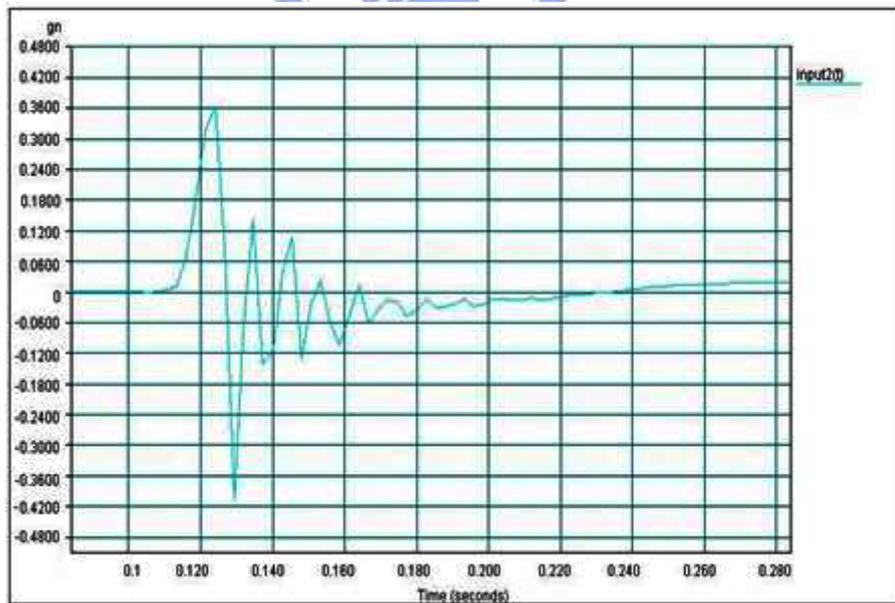


圖 4-80 新竹砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 150N

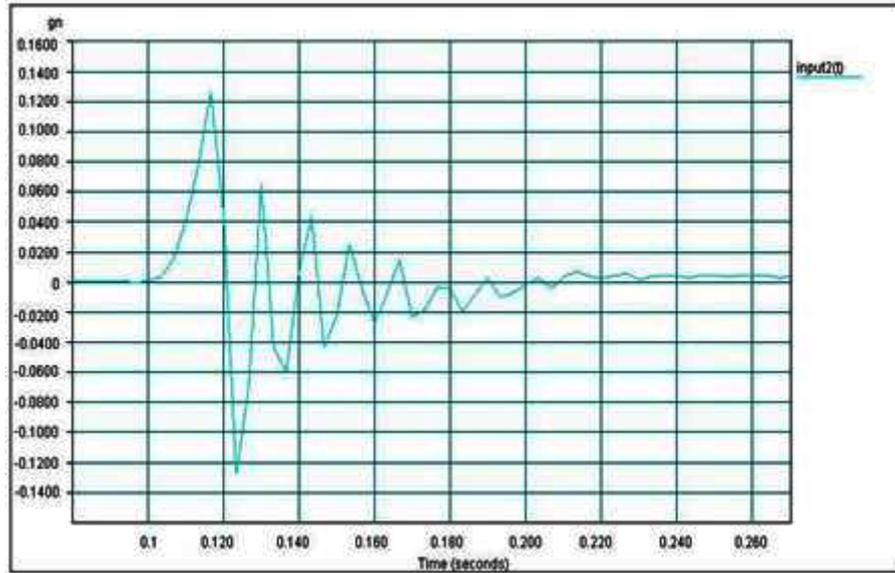


圖 4-81 新竹砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 50N

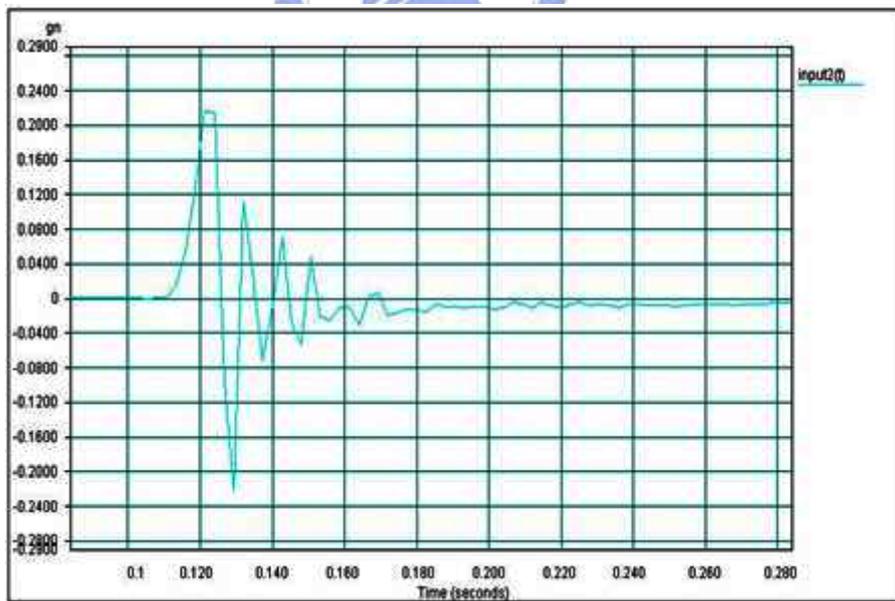


圖 4-82 新竹砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 100N

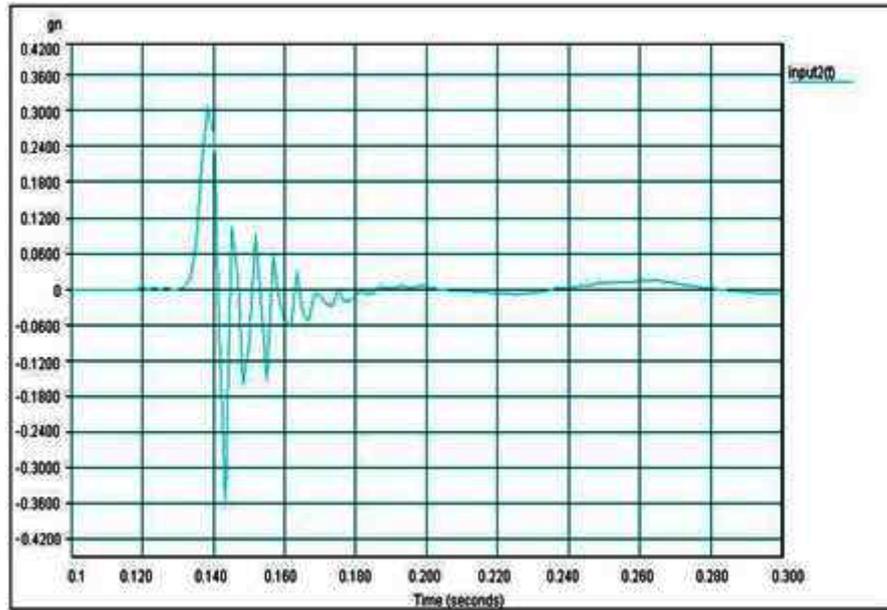


圖 4-83 新竹砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 150N

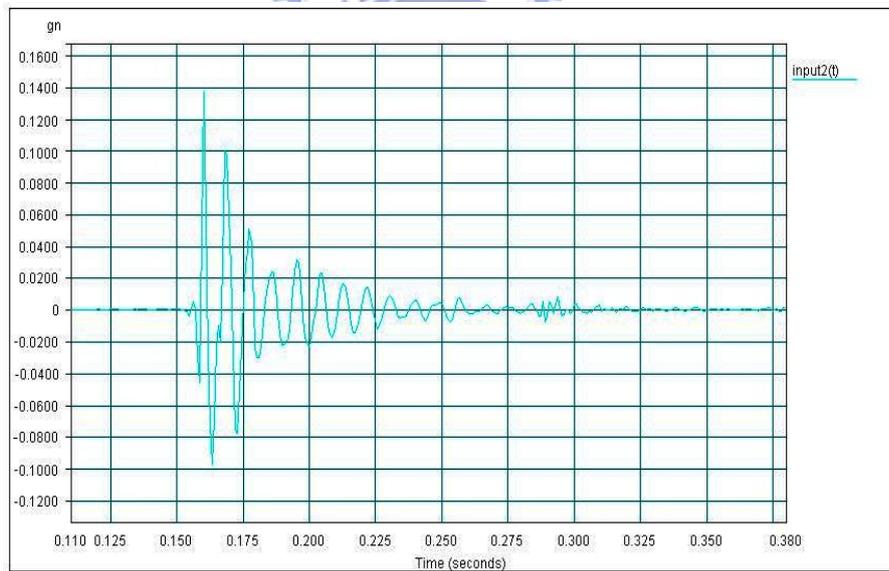


圖 4-84 渥太華砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 50N

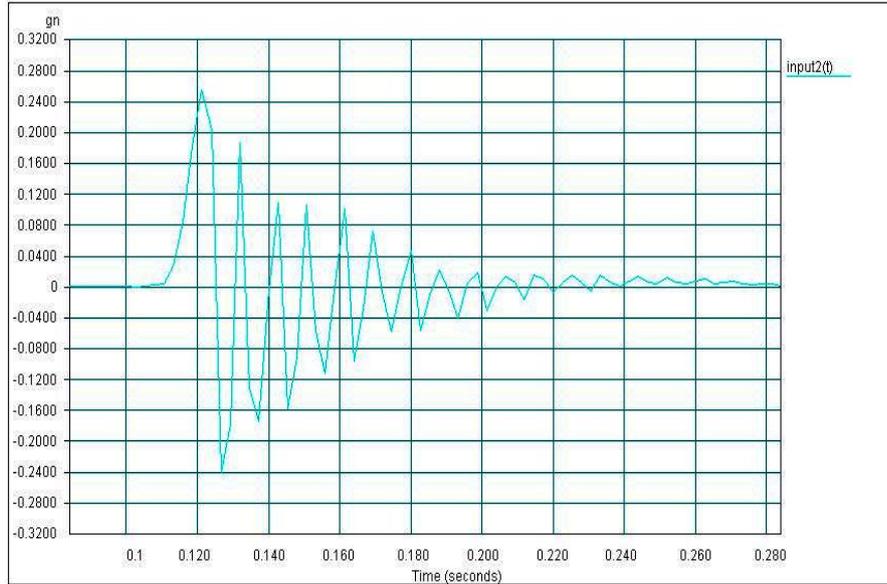


圖 4-85 渥太華砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 100N

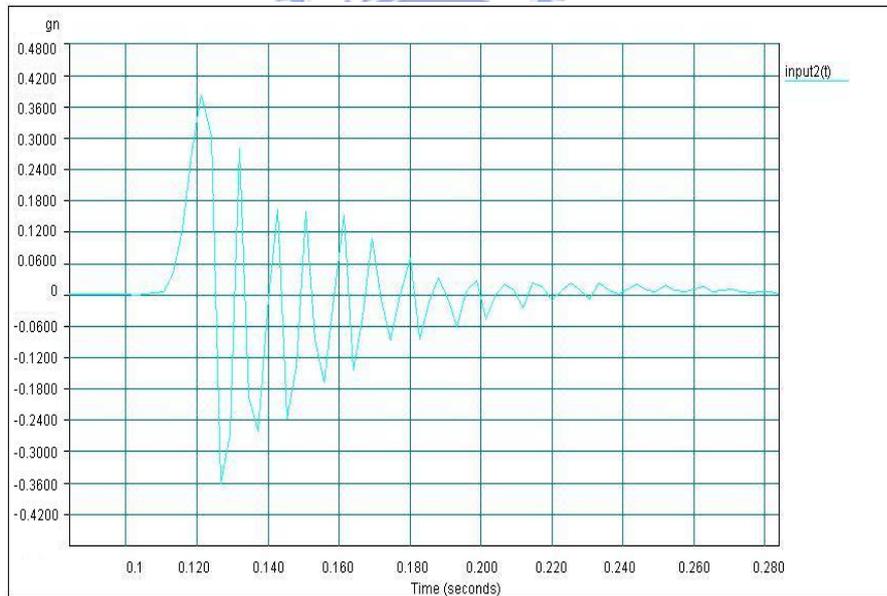


圖 4-86 渥太華砂相對密度為 30%，飽和度為 0%，施力大小 150N

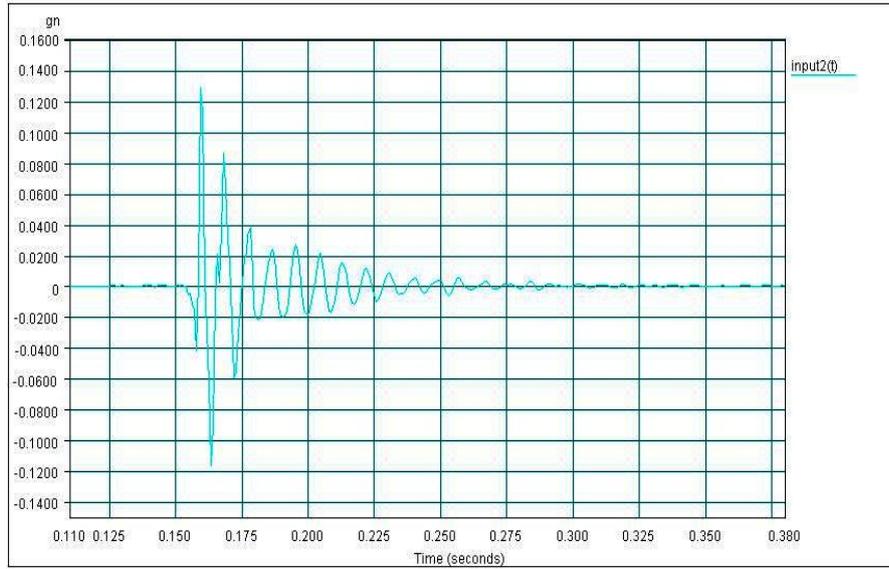


圖 4-87 渥太華砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 50N

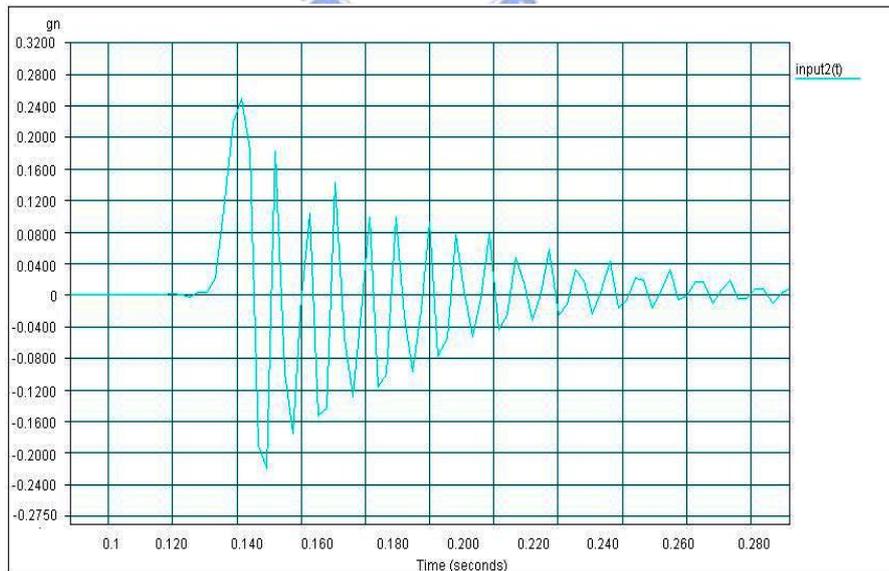


圖 4-88 渥太華砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 100N

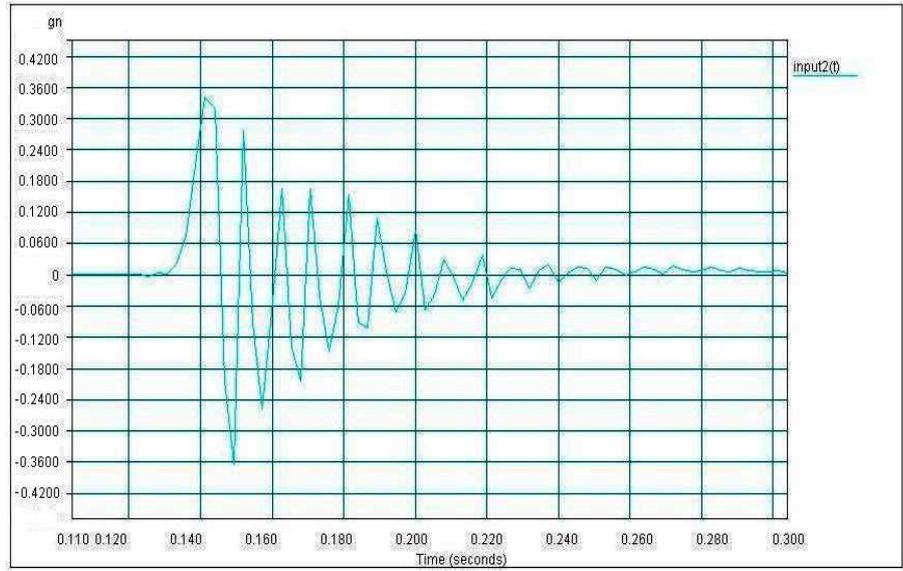


圖 4-89 渥太華砂相對密度為 50%，飽和度為 0%，施力大小 150N

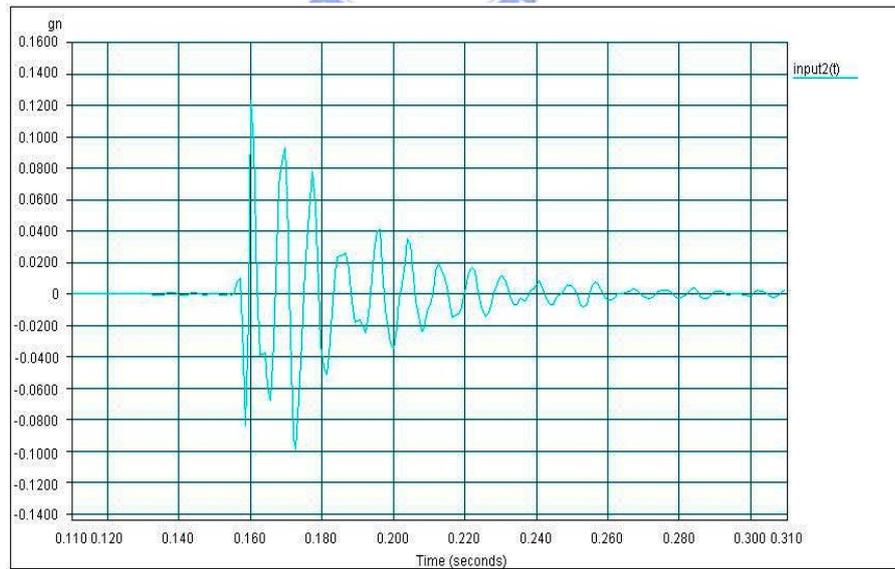


圖 4-90 渥太華砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 50N

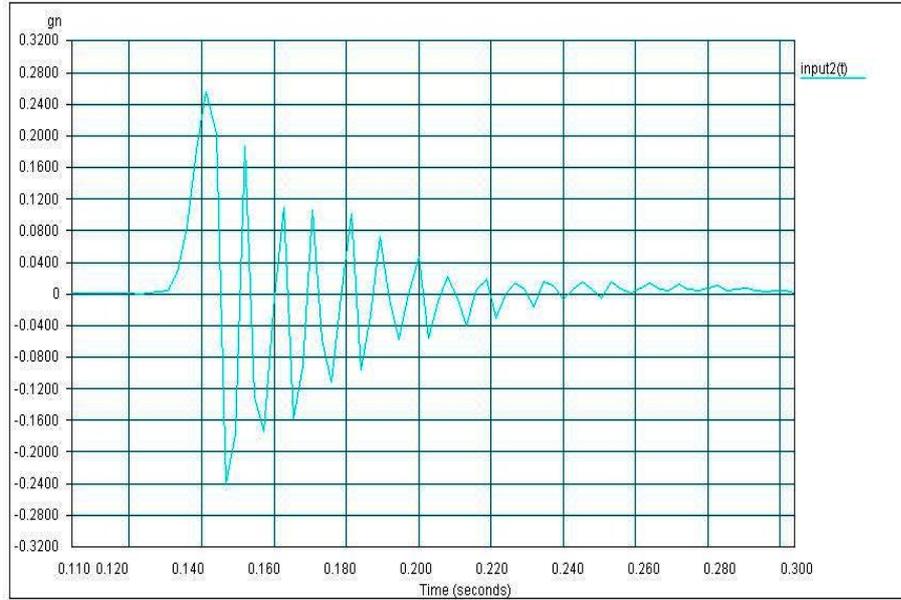


圖 4-91 渥太華砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 100N

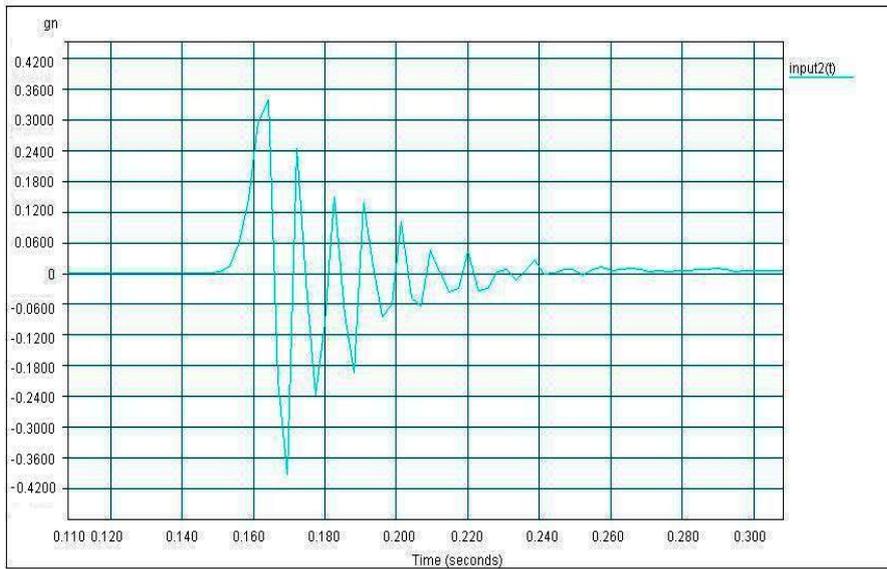


圖 4-92 渥太華砂相對密度為 70%，飽和度為 0%，施力大小 150N

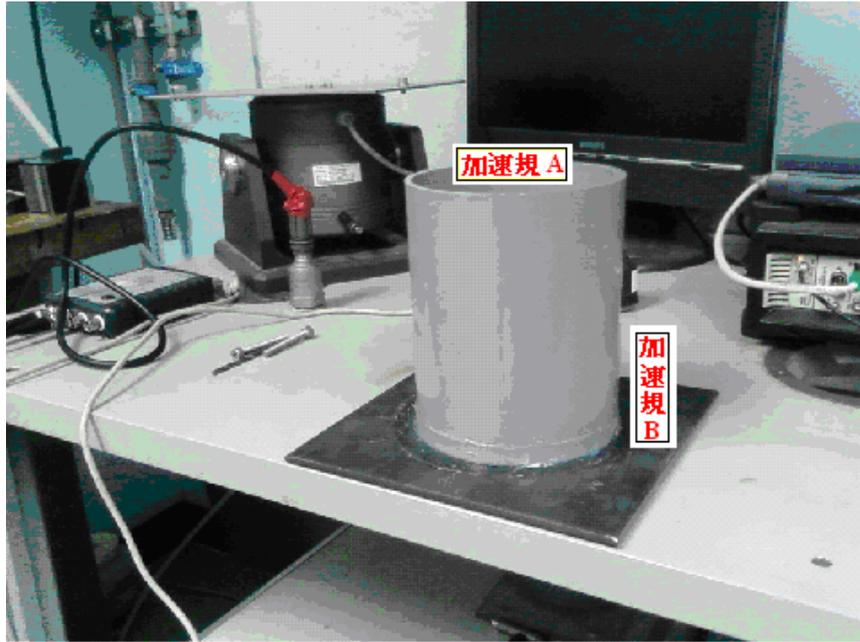


圖 4-93 試驗盒加速規裝置圖

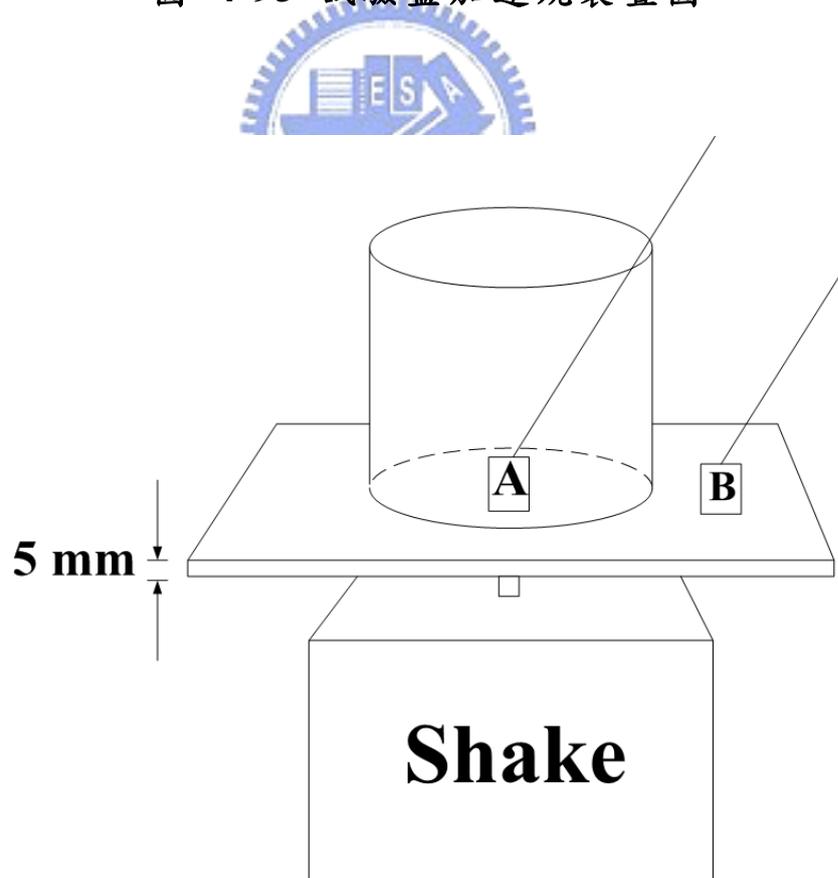


圖 4-94 二個加速規在鐵片上不同處量測其加速度值証明鐵片無擾動

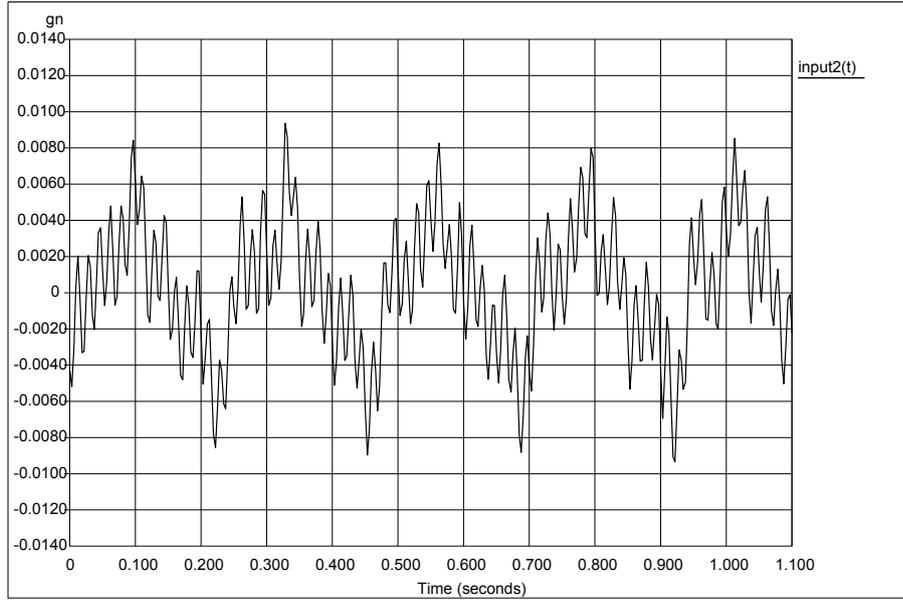


圖 4-95 加速規在裝置底部、5HZ 時之加速度歷時

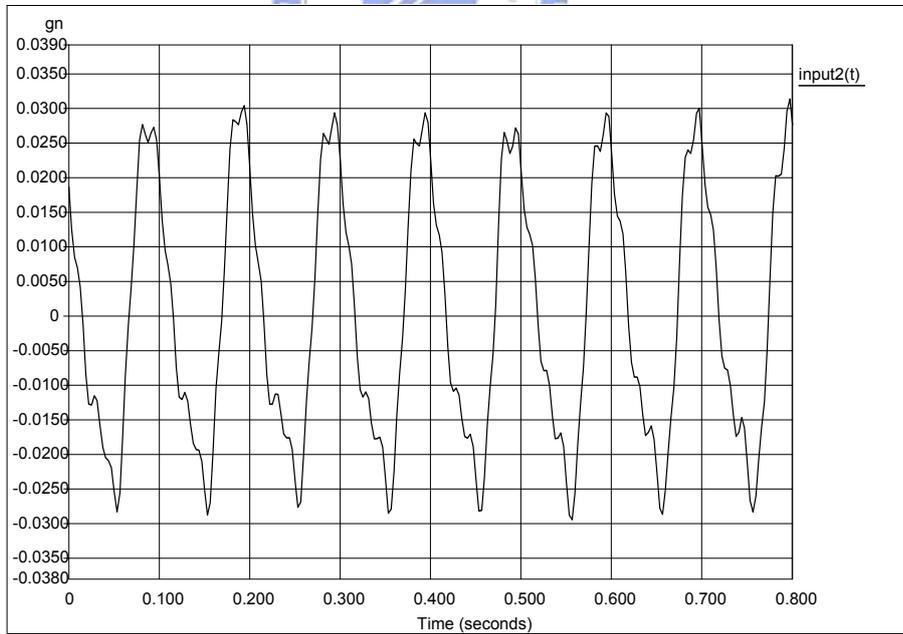


圖 4-96 加速規在裝置底部、10HZ 時之加速度歷時

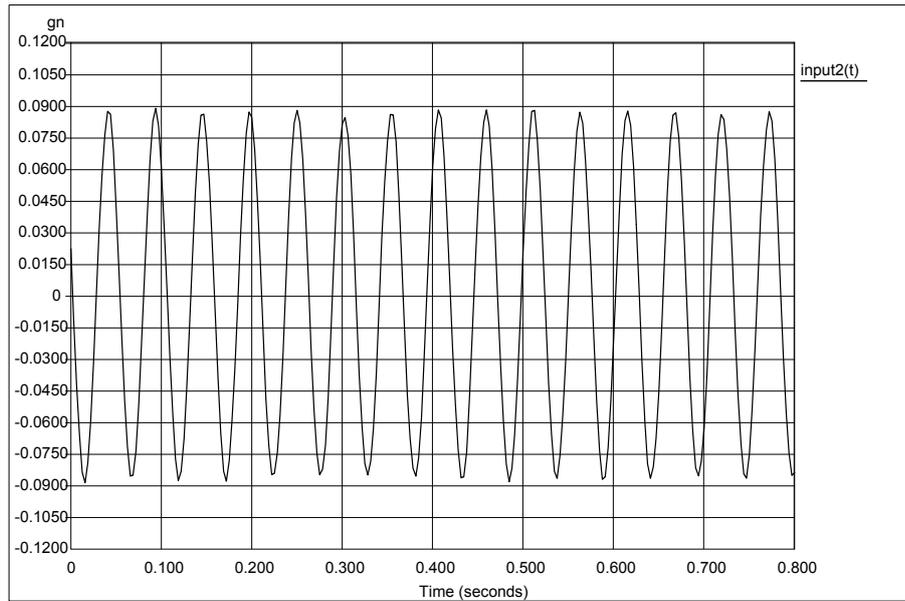


圖 4-97 加速規在裝置底部、20HZ 時之加速度歷時

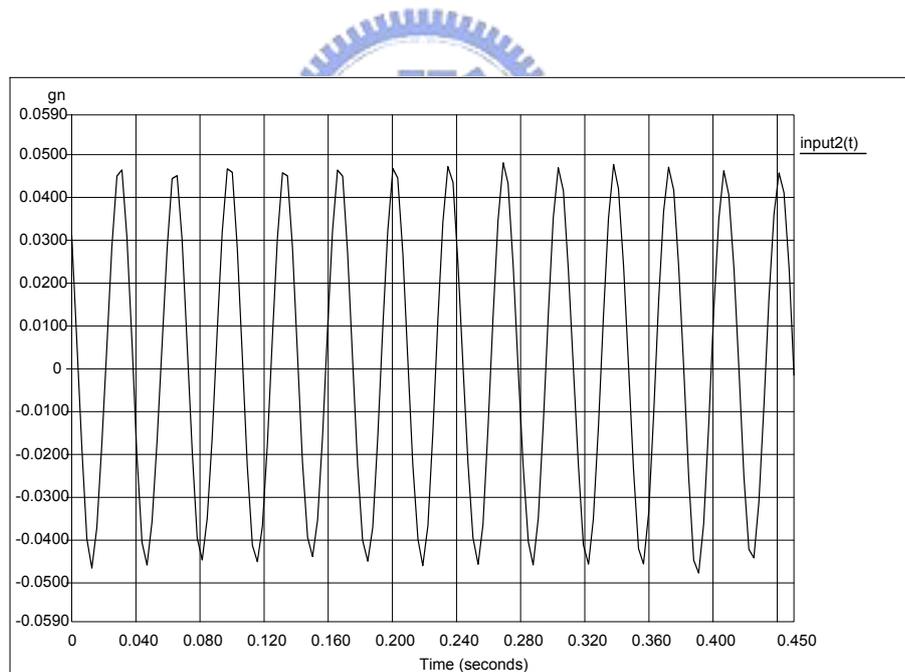


圖 4-98 加速規在裝置底部、30HZ 時之加速度歷時

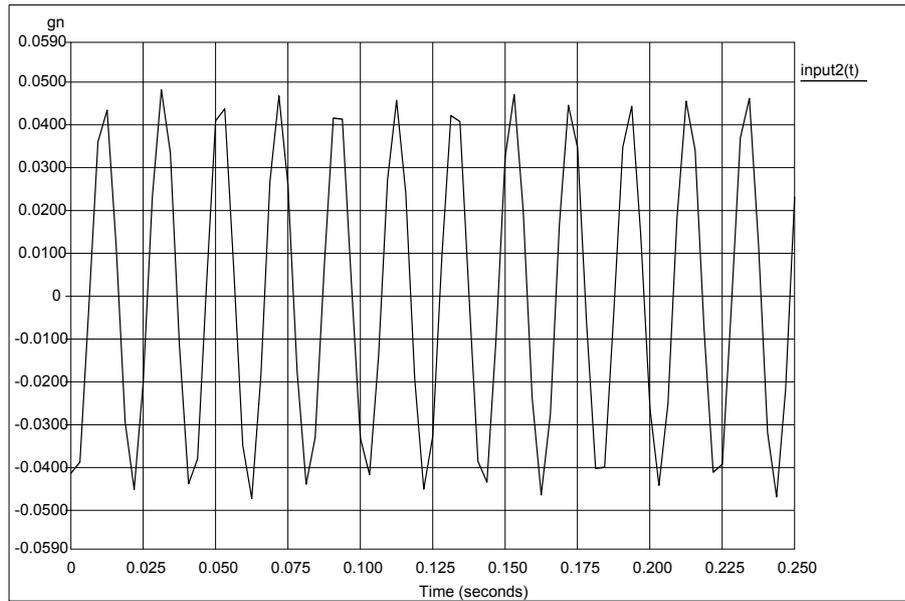


圖 4-99 加速規在裝置底部、40HZ 時之加速度歷時

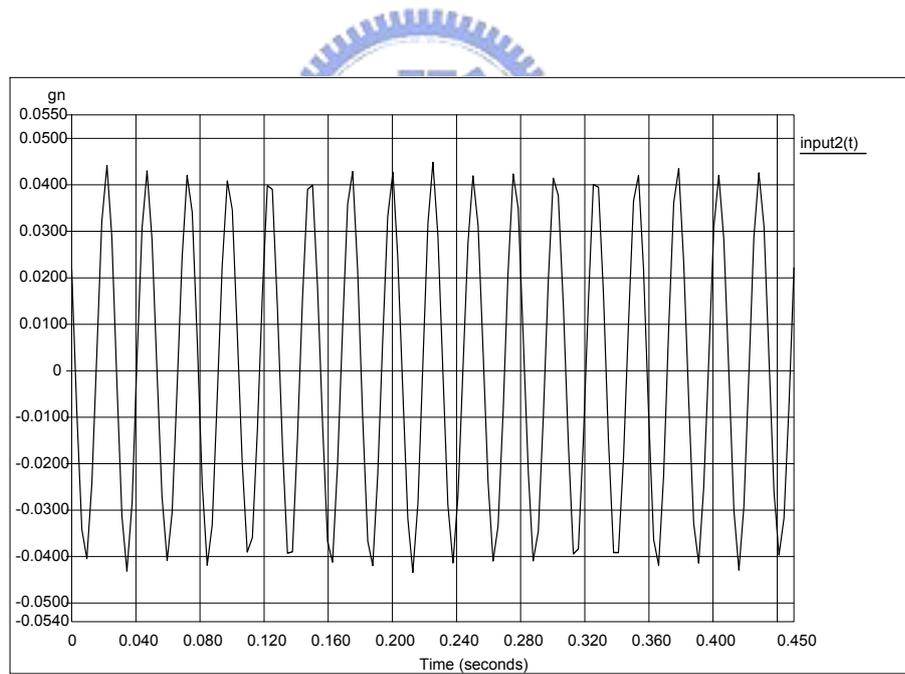


圖 4-100 加速規在裝置底部、50HZ 時之加速度歷時

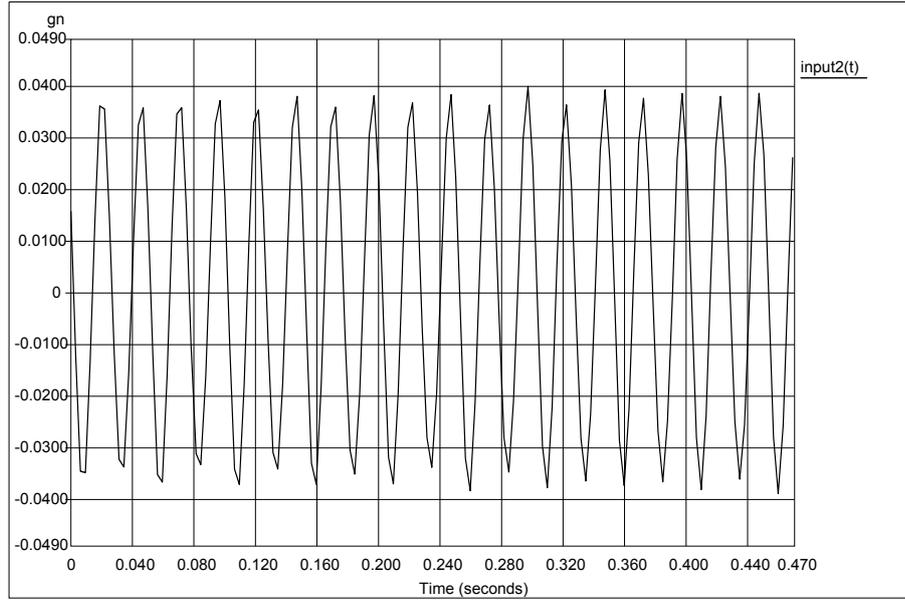


圖 4-101 加速規在裝置底部、60HZ 時之加速度歷時

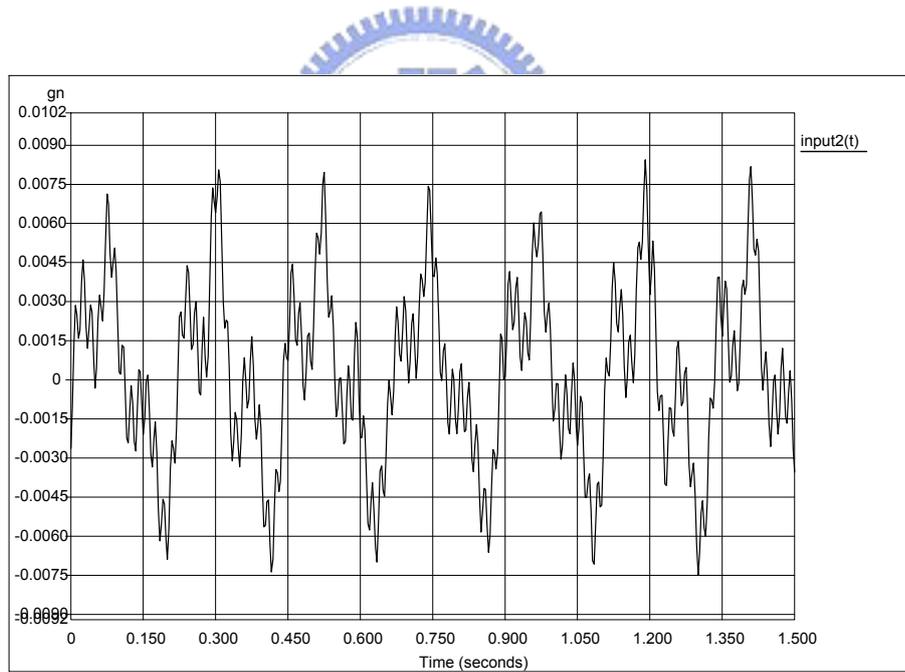


圖 4-102 新竹海岸砂，5HZ、飽和度 0% 垂直振動之加速度歷時

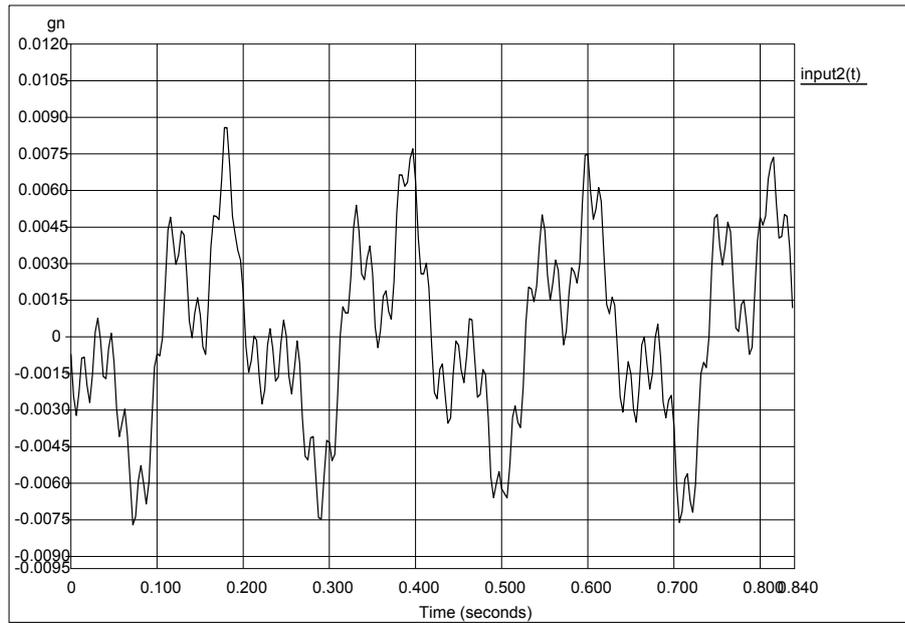


圖 4-103 新竹海岸砂，5HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

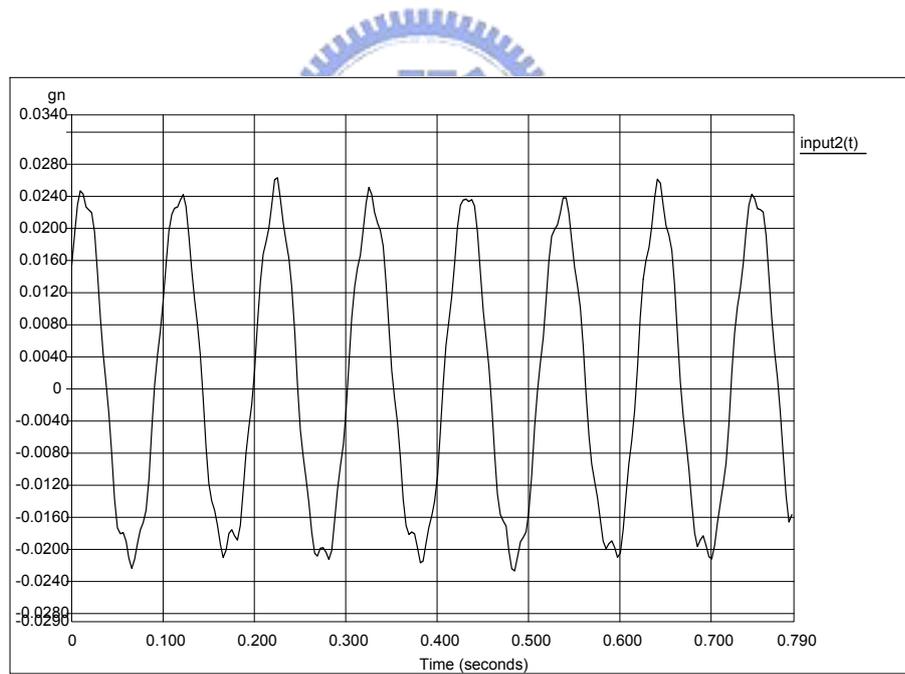


圖 4-104 新竹海岸砂，10HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

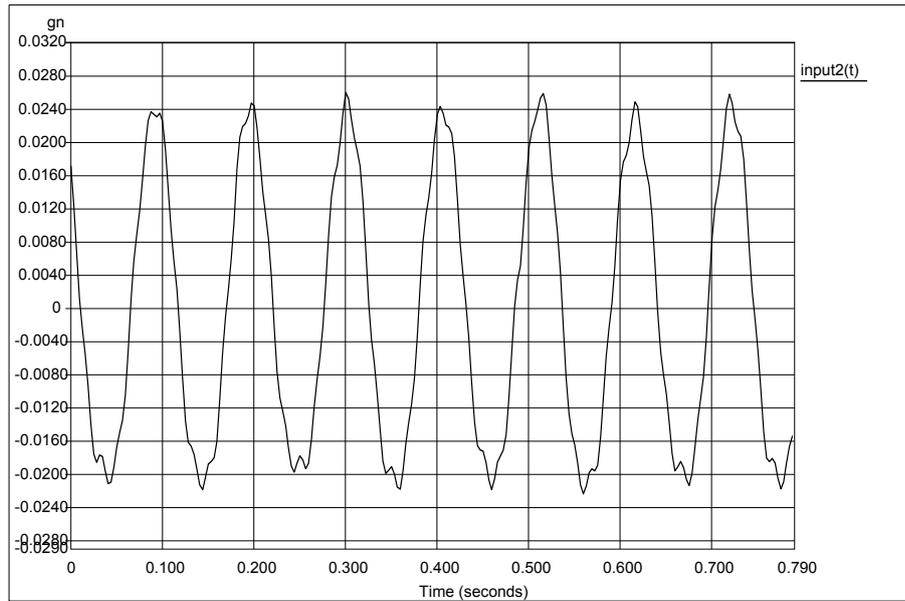


圖 4-105 新竹海岸砂 10HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

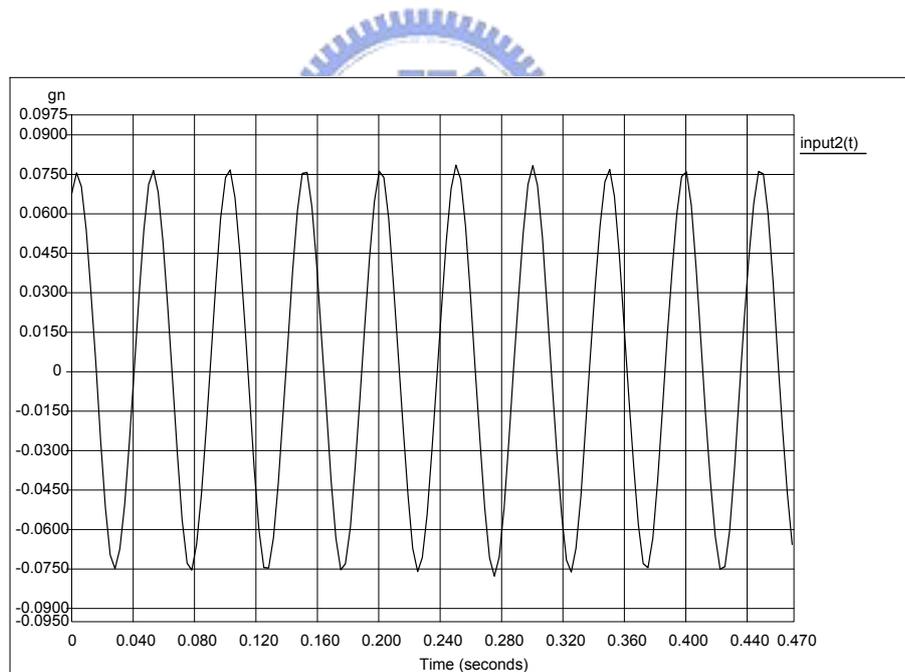


圖 4-106 新竹海岸砂，20HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

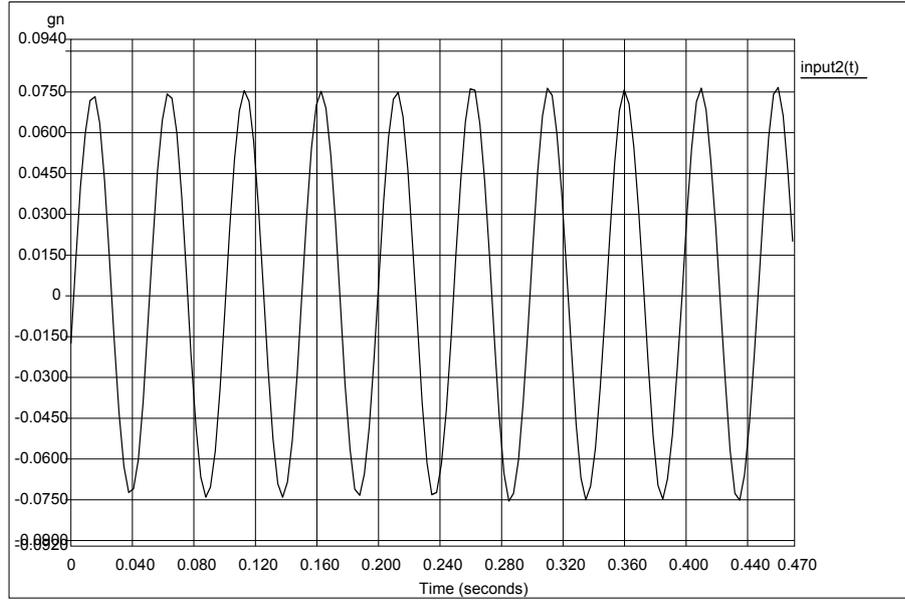


圖 4-107 新竹海岸砂 20HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

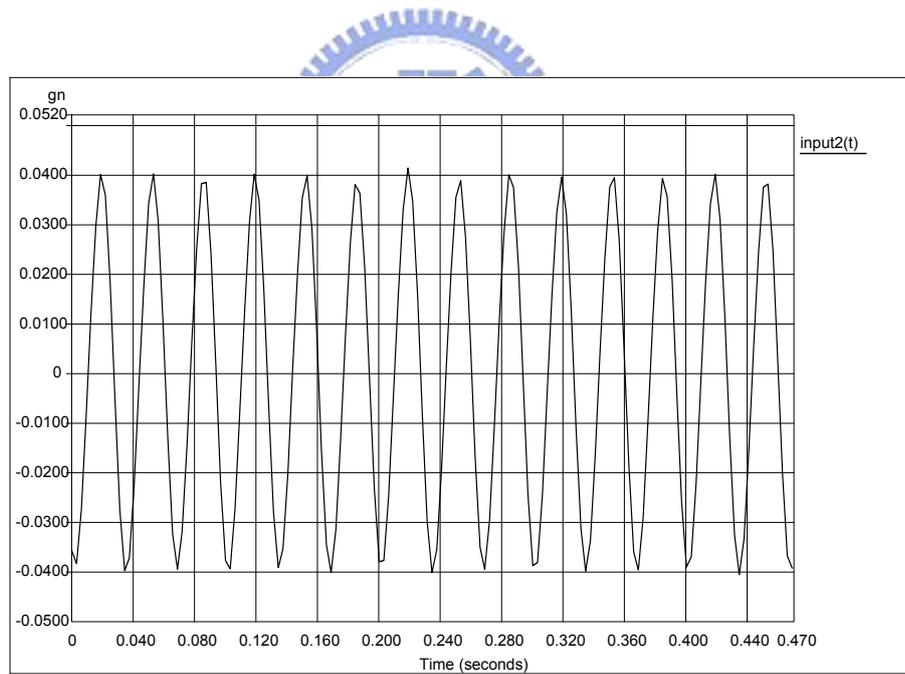


圖 4-108 新竹海岸砂 30HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

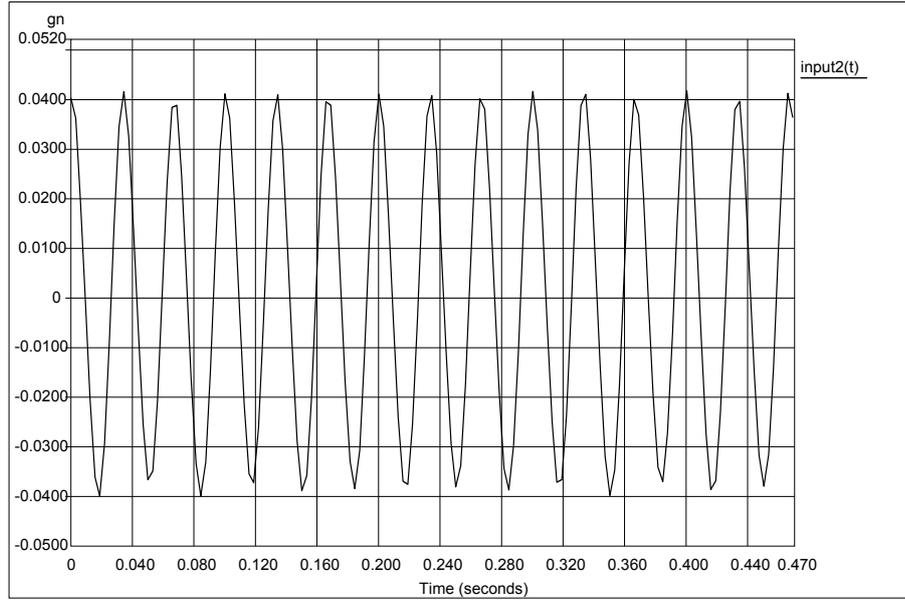


圖 4-109 新竹海岸砂 30HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

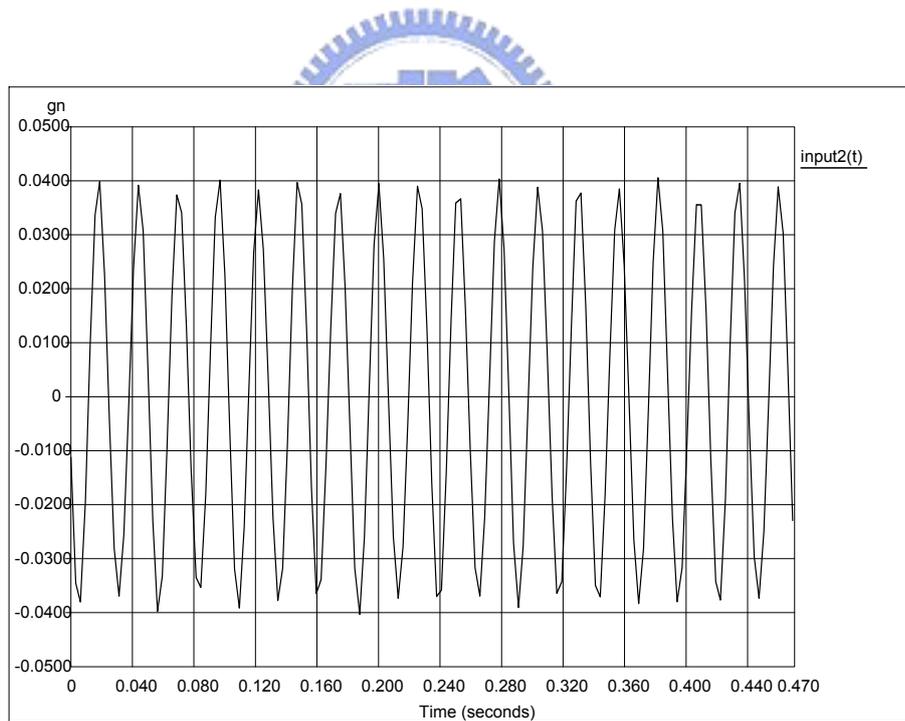


圖 4-110 新竹海岸砂 40HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

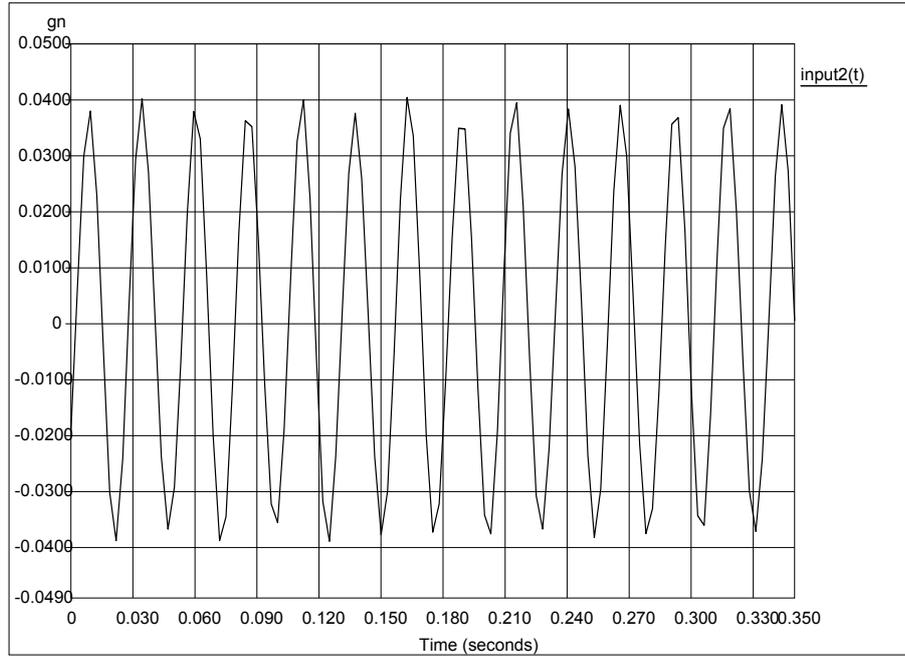


圖 4-111 新竹海岸砂 40HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

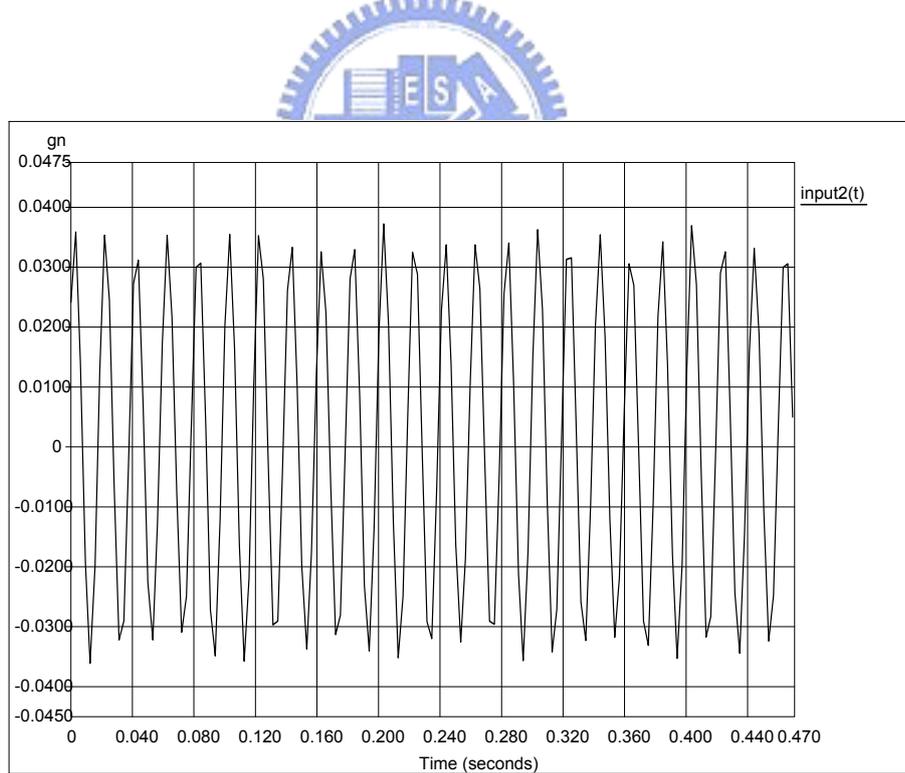


圖 4-112 新竹海岸砂 50HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

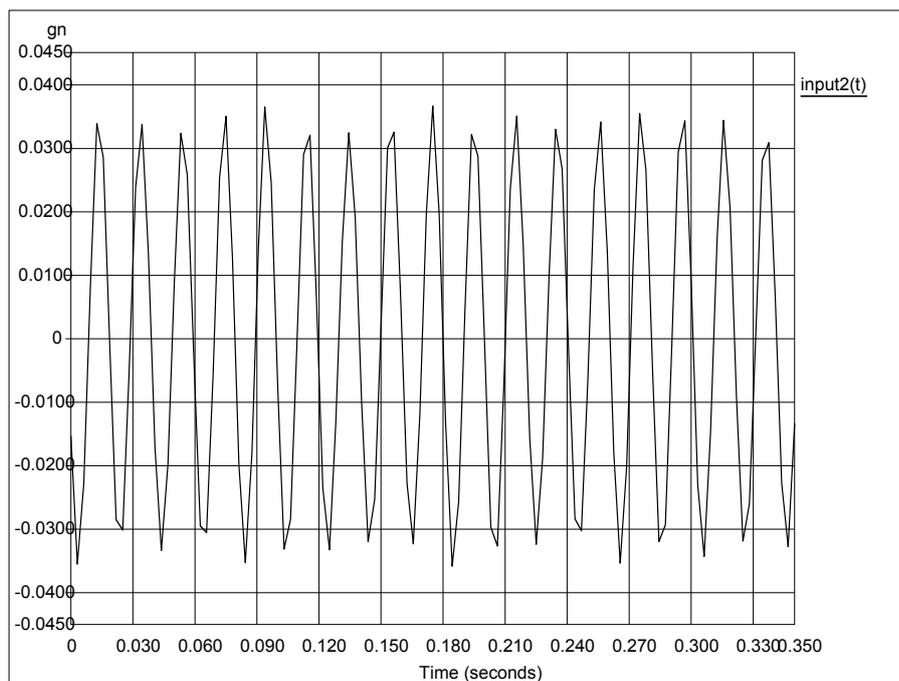


圖 4-113 新竹海岸砂 50HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

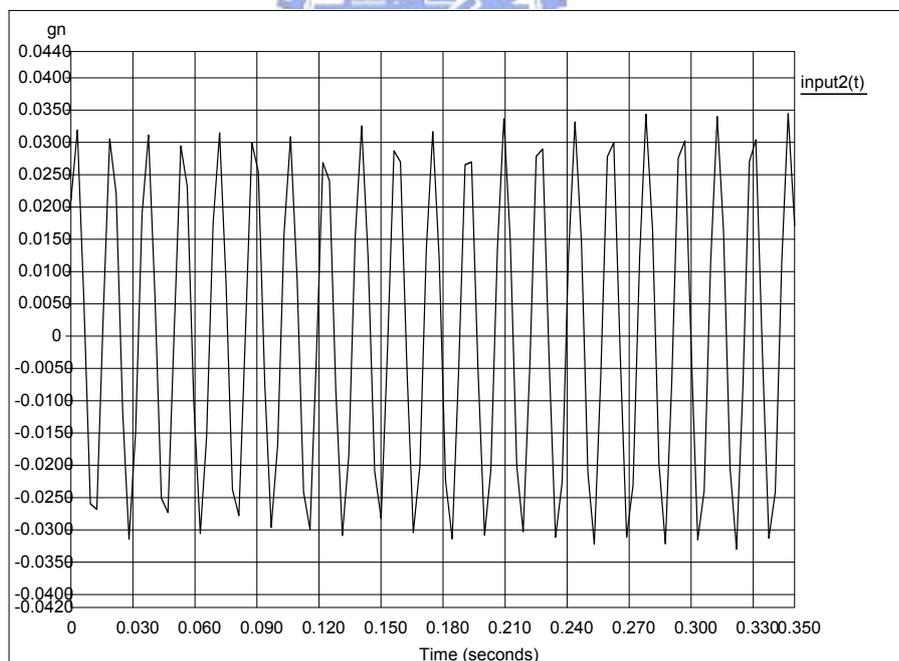


圖 4-114 新竹海岸砂 60HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

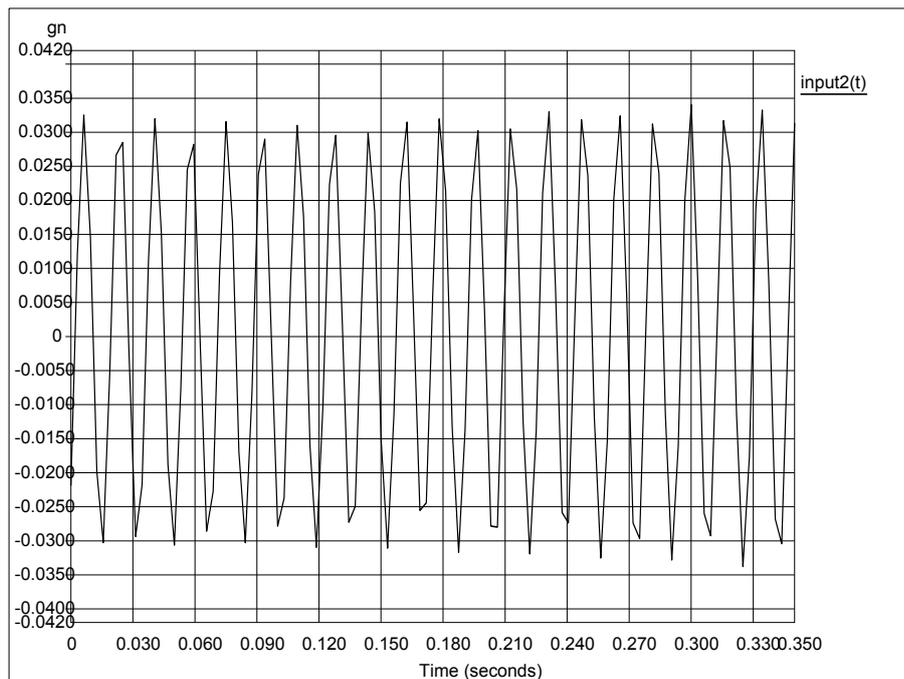


圖 4-115 新竹海岸砂 60HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

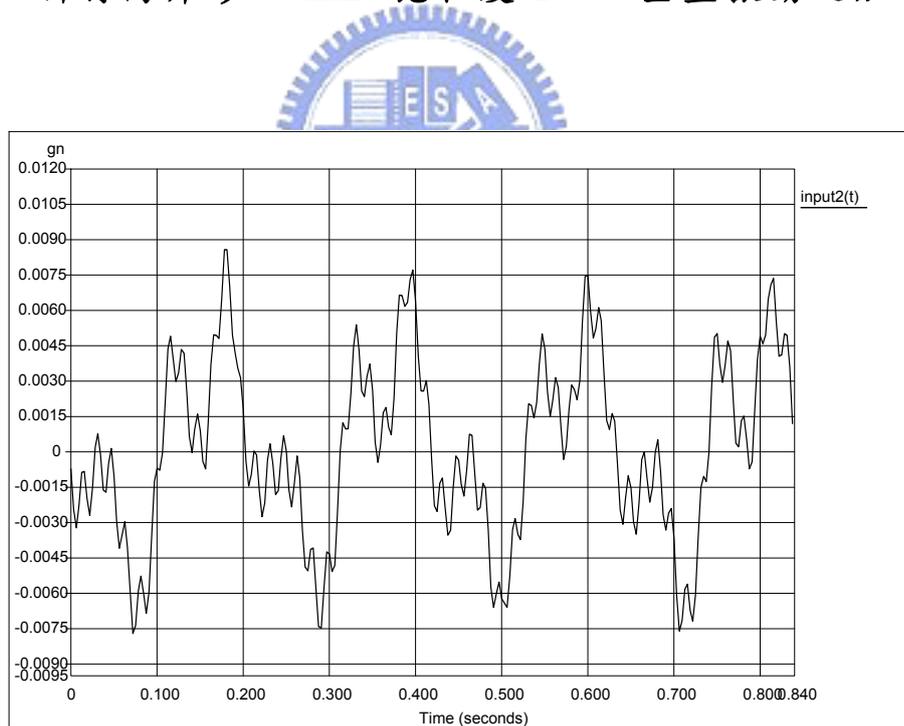


圖 4-116 渥太華標準砂 5HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

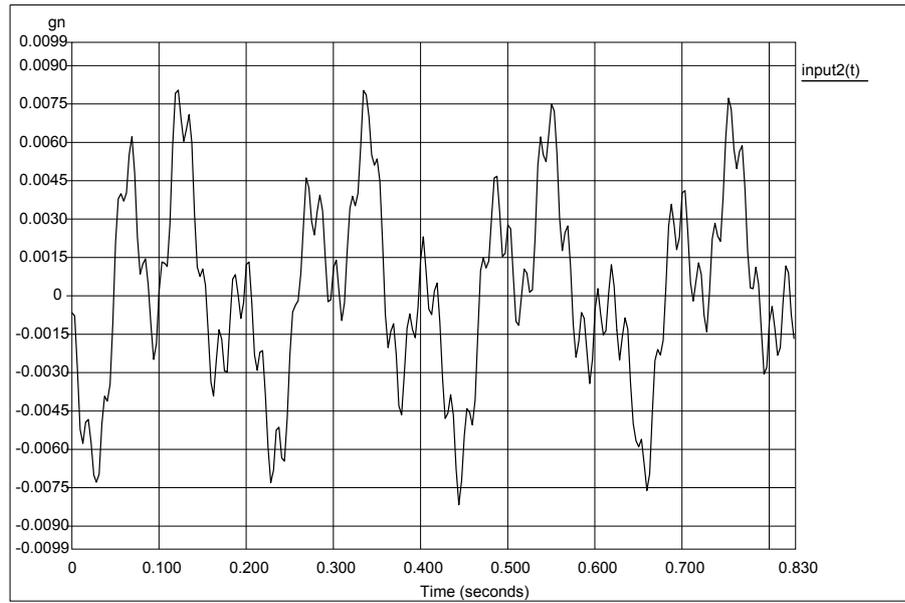


圖 4-117 渥太華標準砂 5HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

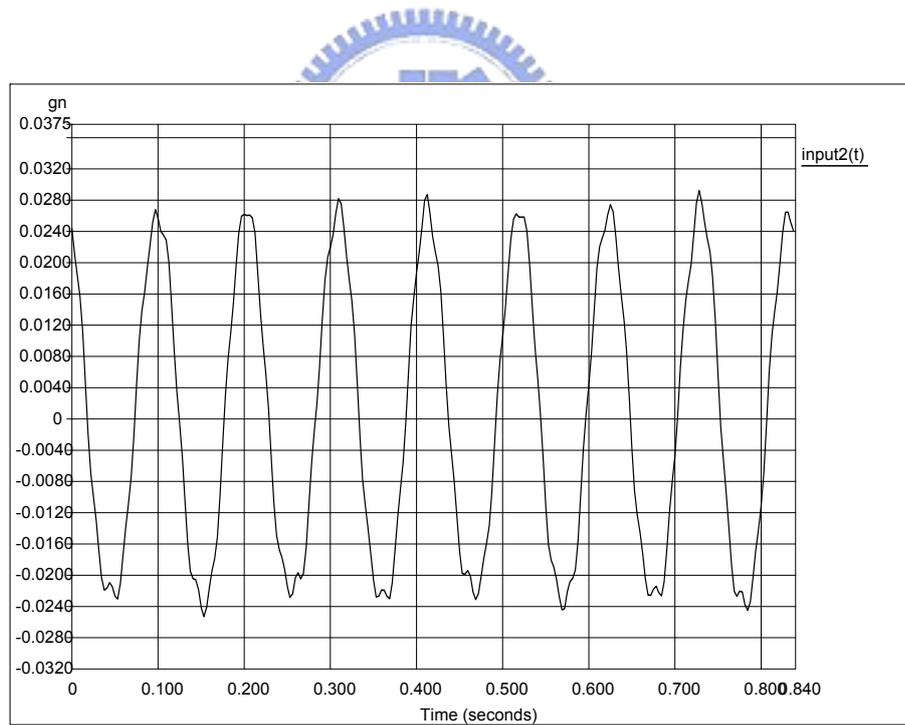


圖 4-118 渥太華標準砂 10HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

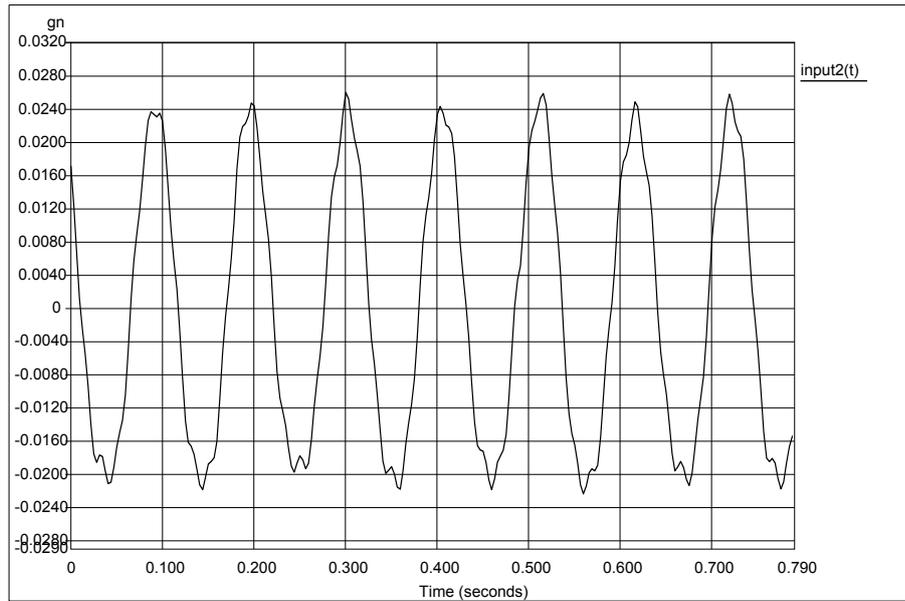


圖 4-119 渥太華標準砂 10HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

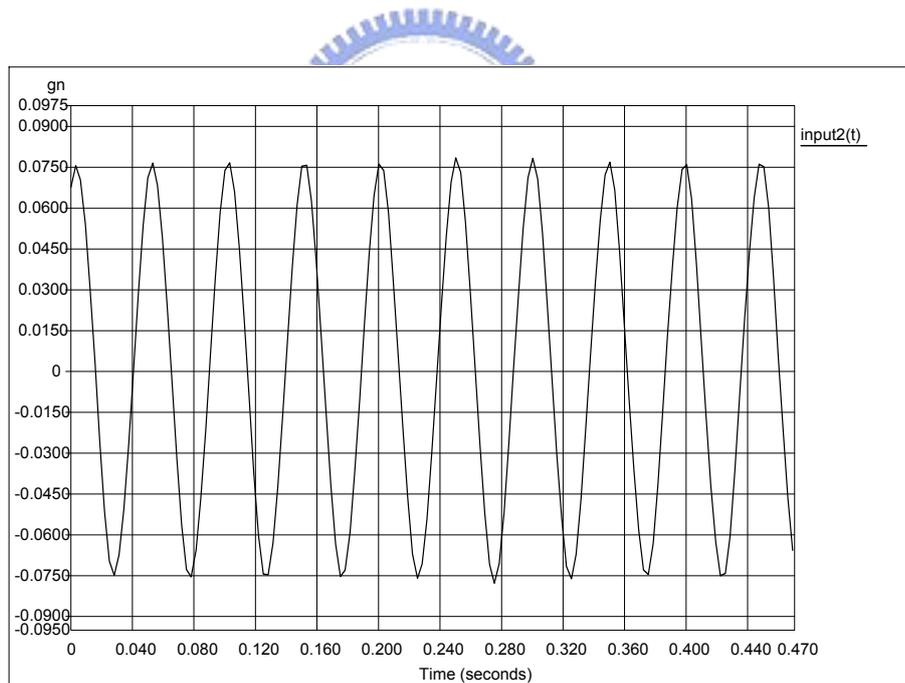


圖 4-120 渥太華標準砂 20HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

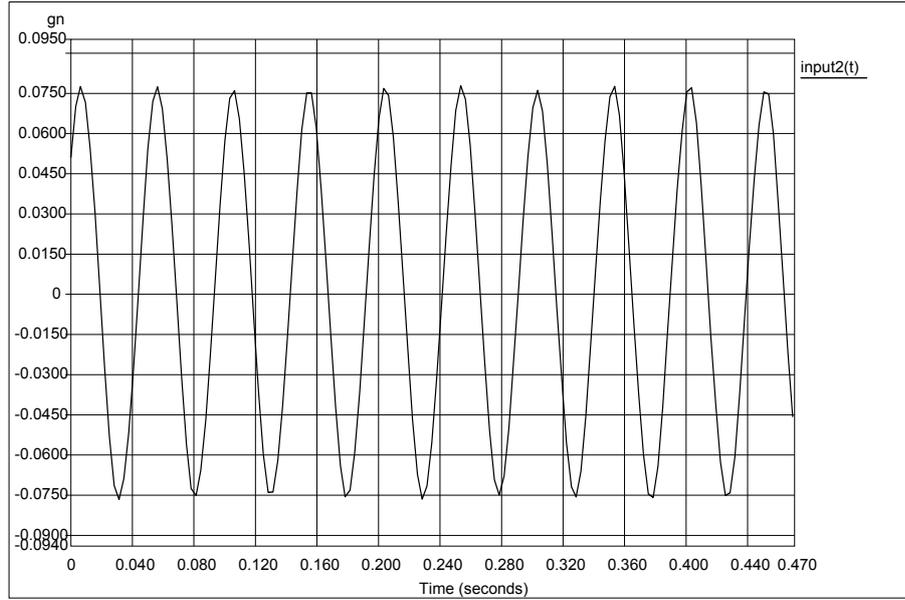


圖 4-121 渥太華標準砂 20HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

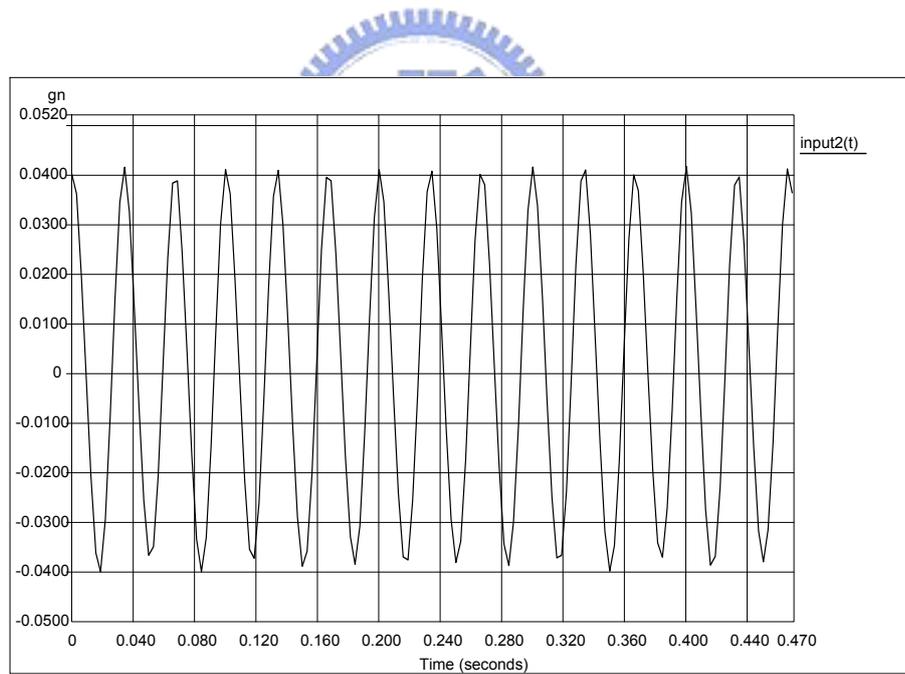


圖 4-122 渥太華標準砂 30HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

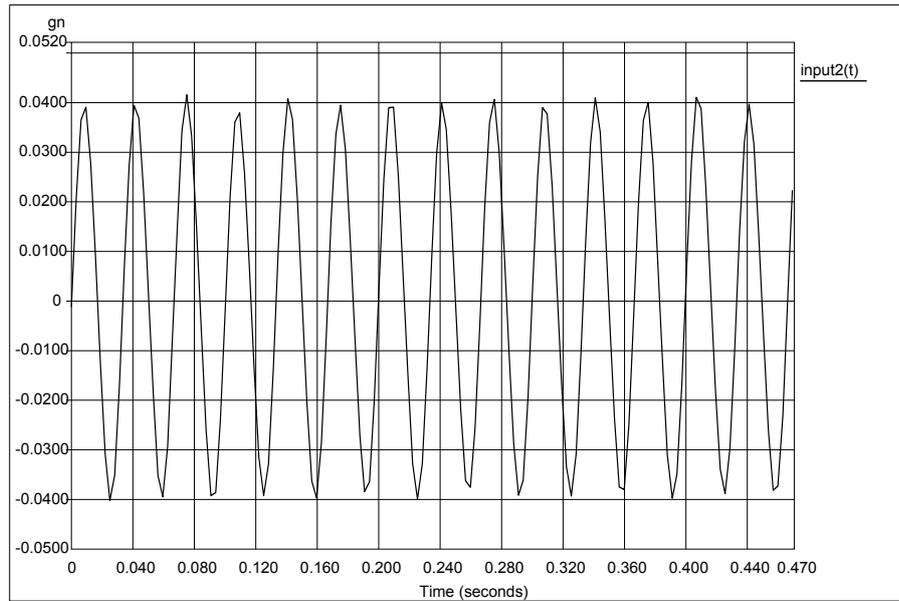


圖 4-123 渥太華標準砂 30HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

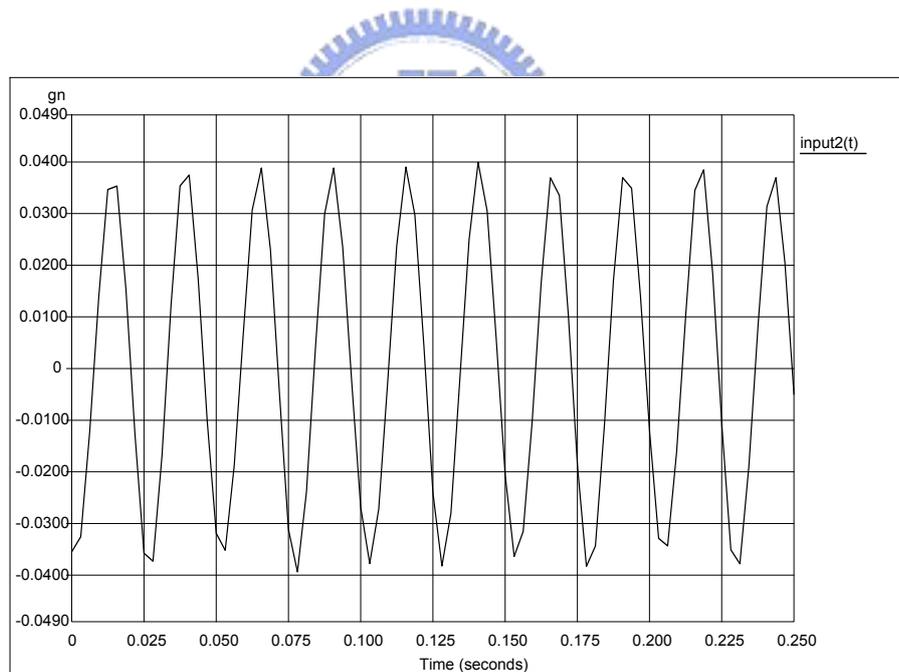


圖 4-124 渥太華標準砂 40HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

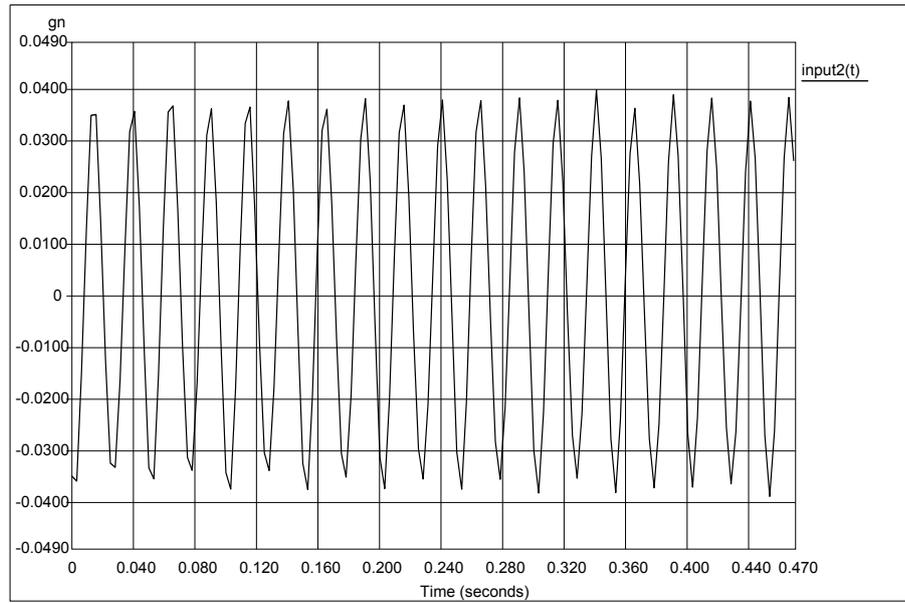


圖 4-125 渥太華標準砂 40HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

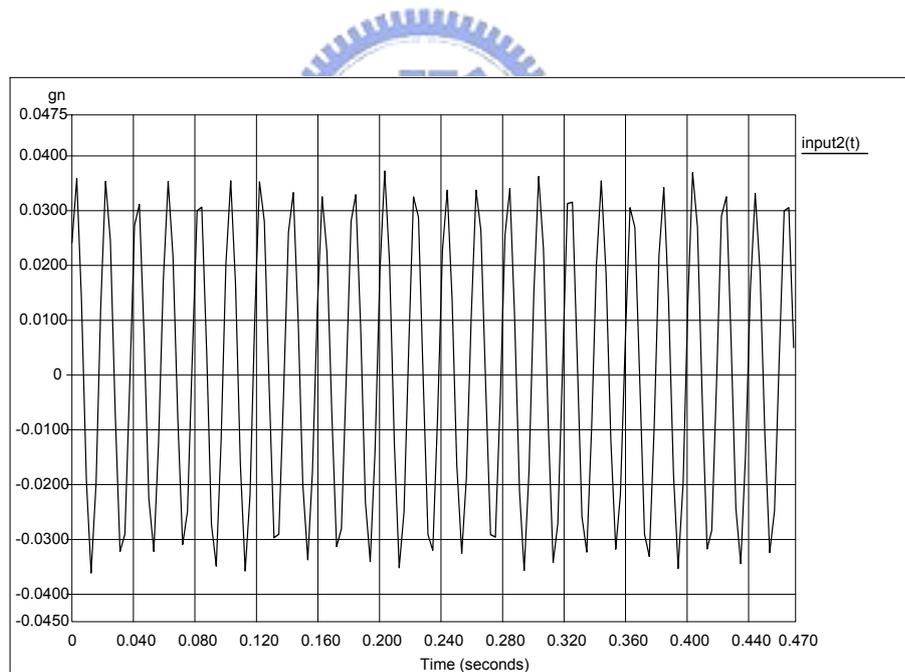


圖 4-126 渥太華標準砂 50HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

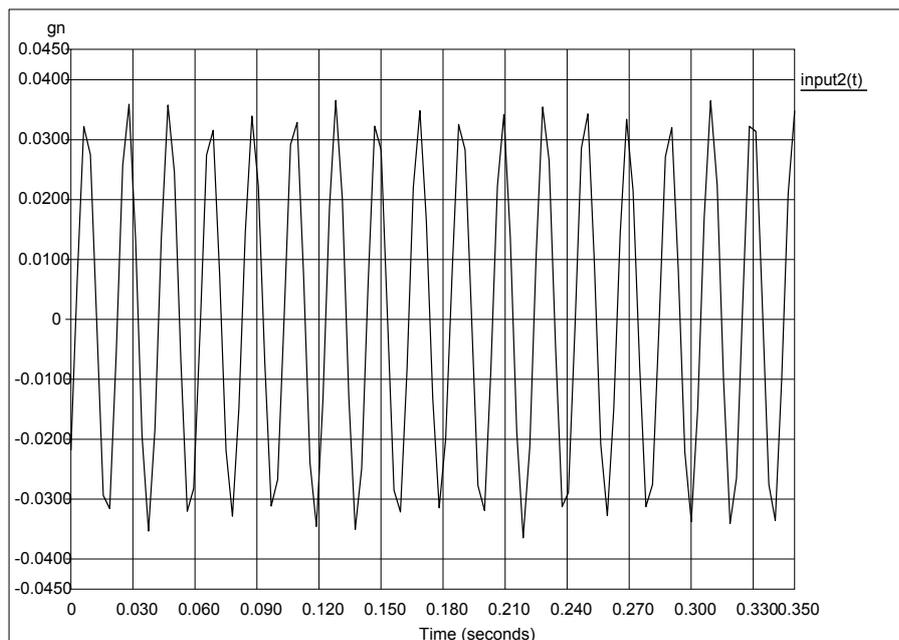


圖 4-127 渥太華標準砂 50HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

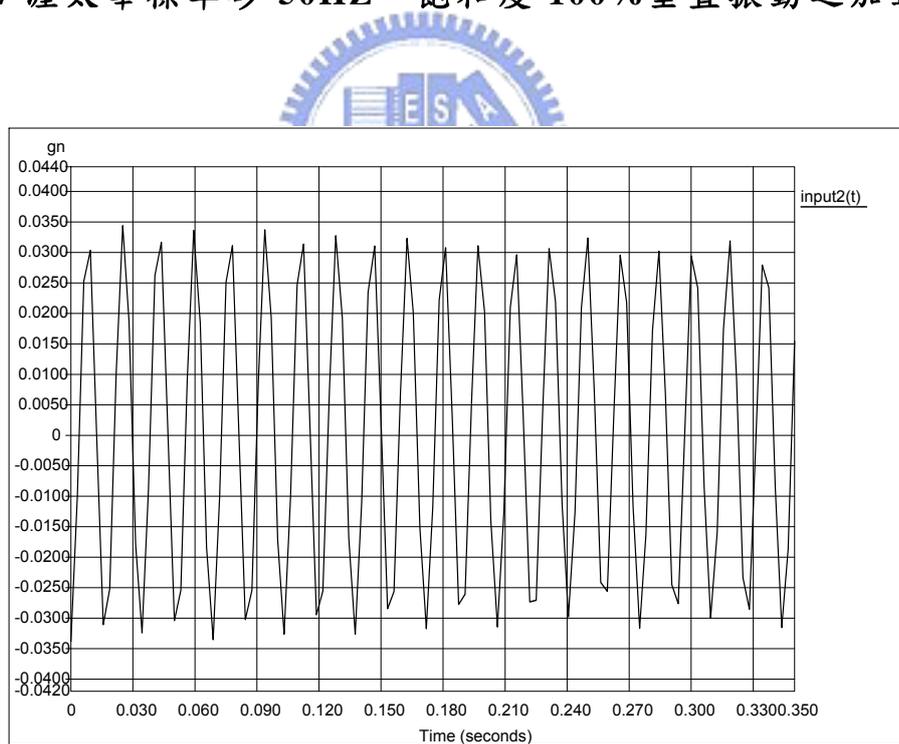


圖 4-128 渥太華標準砂 60HZ、飽和度 0%垂直振動之加速度歷時

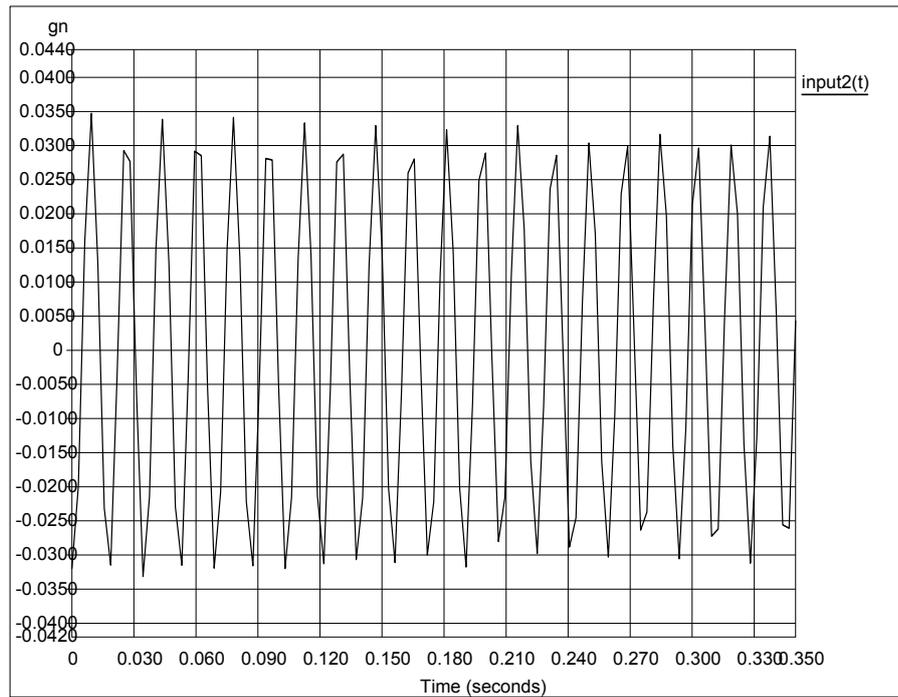


圖 4-129 渥太華標準砂 60HZ、飽和度 100%垂直振動之加速度歷時

