

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

混凝土拱壩之系統識別與結構動力分析

**System Identification and Dynamic Analysis of
RC Arch Dam**

研究生：紀俊成

指導教授：王彥博 博士

李建良 博士

中華民國九十六年七月

混凝土拱壩之系統識別與結構動力分析

研究生：紀俊成

指導教授：王彥博 博士

李建良 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

本研究旨在建立混凝土拱壩結構之系統識別分析方法，利用強震儀實測之地表加速度及壩體振動反應歷時資料，識別拱壩之振動頻率與阻尼比等結構動力特性，並探討蓄水深度及水庫淤泥深度對於壩體頻率之影響，作為壩體結構安全診斷之依據。國內目前僅翡翠水庫及德基水庫兩座混凝土拱壩，其中以翡翠水庫之地震記錄資料較為完整。本文根據翡翠水庫歷年強震資料之系統識別結果顯示，拱壩之基本自然頻率與原設計之理論預測值相近，且振動頻率有隨著蓄水位高度及淤泥深度增加而降低。本研究之分析結果與羅等人根據 1994 年地震資料所得之識別分析結果差異不大(經水位影響修正後誤差小於 10%)，顯示壩體之振動特性於歷次地震事件—特別是九二一地震後，並無顯著的變化，因此研判翡翠水庫壩體目前應無結構性損傷。此外，本研究亦利用有限元素軟體 ANSYS 進行翡翠水庫之靜力與動力分析，並與實測之大壩動力特性比較以確認分析模型之合理性，進而檢核壩體在常態下(蓄水壓及淤泥土壓)及地震時之應力分佈情形。

關鍵字:系統識別、混凝土拱壩、翡翠水庫、ANSYS

Sytem Identification and Dynamic Analysis of RC Arch Dam

Student : Chun-Cheng Chi

Advisor : Dr.Yen-Po Wang

Dr.Chieng-Liang Lee

Institute of Civil Engineering

College of Engineering

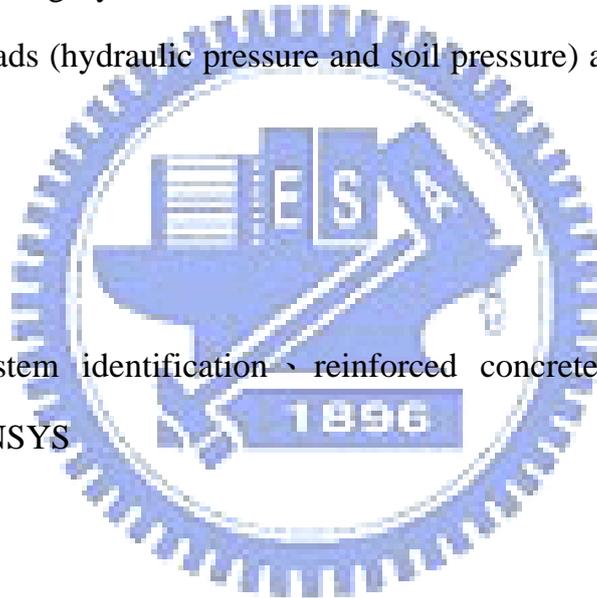
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The objective of this study is to develop a system identification scheme for reinforced concrete arch dams based on site measurements of seismic ground acceleration and dynamic structural responses of the dam. Dynamic characteristics such as natural frequencies and damping ratios are to be identified, and the effects of water storage depth and the accumulated mud depth in the reservoir on natural frequencies of the arch dam investigated. The information will be served as the basis for diagnosis of structural safety of the dam. There are two reinforced concrete arch dams in Taiwan, namely the Fei-Tsui and Techu dams, while only the Fei-Tsui dam is well instrumented with complete sets of seismic records available for system identification analysis. Based on the seismic data of the Fei-Tsui dam over the years, results indicate that the identified natural frequencies and modal shapes of the dam agree very well with the analytical

predictions of the original design. Moreover, the vibration frequency becomes lower as the water storage level or the accumulated mud depth increases. The results, with compensation of storage level effect, are also consistent with those obtained by Loh using the seismic records in 1994, implying no damage of the dam after the earthquakes in the past years, in particular the 1999 Ji-Ji earthquake. In addition, this study also conducts static and dynamic analyses of the Fei-Tsui dam using ANSYS. Dynamic characteristics by the analytical model are compared with those identified from the measured data to verify adequacy of the analytical modeling by ANSYS. The stress distributions in the dam under both the working loads (hydraulic pressure and soil pressure) and earthquake are then investigated.

Keywords: system identification 、 reinforced concrete arch dam 、 Fei-Tsui Reservoir 、 ANSYS



誌謝

兩年碩士生活隨著論文結束而終止，還記得當初剛進入交大土木研究所的我，心情是多麼忐忑不安，一路走來除了憑靠著自己的堅毅與努力，很幸運地也得到許多人的幫助，使我能夠順利走到這裡。對我而言，雖然這段旅程已經結束，但是學習的路途是如此的無窮無盡，此階段的結束象徵著另一個階段的到來，期許自己在下個階段能夠更加精進。

首先，最要感謝在背後默默支持我的雙親、姊姊、弟弟，謝謝你們多年來給予我精神上最大的支持，使我能夠心無旁騖的進行研究，對你們的感恩無法言喻。

感謝我的恩師王彥博教授，引領我進入學術的殿堂，一窺這個領域的奧妙，兩年時光中，除了給予我研究上的指導外，也教導了許多做人處事的道理，而王老師更是我人生的轉捩點。每當我遇到瓶頸時，王老師總是給我最大的支持，對待我視如己出、諄諄善誘，使我能下定決心、一路到底，對王老師您的感恩，學生永誌於心。同時也要感謝一直給予我很多幫助的李建良博士，謝謝您在這兩年內指導學生的辛勞。

論文口試期間，承蒙國立高雄第一科技大學 盧煉元教授、國立中興大學 林其璋教授、國立交通大學 陳誠直教授、國立交通大學 趙文成教授撥冗指正，並提供寶貴意見，使得論文疏漏之處得以改進，特別在此表示感激之意。

感謝研究室諸學長李建良博士、嘉賞學長、逸軒學長在論文上之指導，並感謝同門師兄弟欣晏、志軒、羅開、哲維、建華、家杰等在學業及生活上

之切磋討論及各方面的協助與支援；以及那些曾經幫助或關心我的同學與朋友，在此一併致上最誠摯之謝意。

最後，我要感謝對我最重要的人——怡柔，謝謝妳一路辛苦陪我走來，我的喜、怒、哀、樂，妳一直陪我分享，在我低潮時，妳總是給我鼓勵，使我能夠再站起來；也因為有妳，我在研究路上並不寂寞，藉由此論文，我想與妳分享論文完成的喜悅。

一篇論文的完成，往往是一間研究室、一群不怕辛苦的研究人員共同努力的成果，此篇論文亦然，謝謝你們。



謹誌於交大工程二館 2007 年 7 月

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
誌謝.....	IV
目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 本文內容.....	3
第二章 系統識別理論.....	4
2.1 前言.....	4
2.2 系統識別理論介紹.....	5
2.3 含噪音系統模型與預測誤差.....	7
2.4 遞迴預測誤差法.....	9
第三章 翡翠水庫之系統識別分析.....	12
3.1 前言.....	12
3.2 拱壩實測紀錄之系統識別分析.....	12
3.2.1 翡翠水庫強震儀之配置.....	13
3.2.2 固定淤泥深度時壩體頻率與蓄水位高度之關係.....	13
3.2.3 固定蓄水位時壩體頻率與淤泥深度之關係.....	15
第四章 翡翠水庫之ANSYS分析.....	18
4.1 ANSYS簡介及發展流程.....	18

4.2 ANSYS分析流程之建立.....	20
4.3 翡翠水庫之ANSYS模型建立.....	22
4.3.1 翡翠水庫幾何外型之建立.....	22
4.3.2 網格元素種類的選取及描述.....	23
4.3.3 定義材料參數.....	24
4.3.4 建立網格.....	24
4.3.5 邊界條件的設定.....	25
4.4 翡翠水庫之分析.....	25
4.4.1 模態分析.....	26
4.4.2 翡翠水庫之常態載重分析.....	27
4.4.2.1 靜水壓力及淤泥土壓.....	27
4.4.2.2 分析結果與討論.....	30
4.4.3 地震歷時反應分析.....	32
第五章 結論與建議.....	35
參考文獻.....	37
附錄A 重力壩之系統識別.....	135
A.1 前言.....	135
A.2 重力壩實測紀錄之系統識別分析.....	135

表目錄

表 3.2.1-1 強震儀規格及設置高程	39
表 3.2.2-1 翡翠水庫各地震儀之地震加速度峰值	39
表 3.2.2-2 翡翠水庫諸地震事件發生時之蓄水位高度對應表	40
表 3.2.2-3 翡翠水庫諸地震事件發生時之蓄水位高度與自然頻率、阻尼比之關係	40
表 3.2.3-1 翡翠水庫各地震儀之地震加速度峰值	41
表 3.2.3-2 翡翠水庫諸地震事件發生時之蓄水位高度與對應之淤泥高度	42
表 3.2.3-3 水庫淤泥高度與自然振動頻率及阻尼比之關係	43
表 4.3.5-1 翡翠水庫結構模型材料參數	44
表 4.4.1-1 翡翠水庫ANSYS模型振態頻率與文獻【14】之比較	44
表 4.4.2.1-1 設計用靜止土壓係數參考值	45
表 4.4.2.1-2 發生主動及被動土壓狀態需要之移動量	45
表 4.4.2.2-1 壩體應力和XY平面主應力之最大值及最小值統計表	46
表 4.4.3-1 靜力及動力分析比較表	46
表A.2-1 天輪壩諸地震事件峰值統計表	137
表A.2-2 天輪壩諸地震事件蓄水位高度對應表	137
表A.2-3 天輪壩諸地震事件之識別結果	138

圖目錄

圖 3.1-1 翡翠水庫之地理位置示意圖	47
圖 3.1-2 翡翠水庫拱壩下游照片	47
圖 3.1-3(a) 翡翠水庫下游面之立面圖	48
圖 3.1-3(b) 翡翠水庫之上視圖	48
圖 3.1-3(c) 翡翠水庫之側視圖	49
圖 3.1-4 強震儀及資料擷取系統	49
圖 3.1-5 拱壩典型之振動模態示意圖	50
圖 3.2.1-1 翡翠水庫大壩強震儀佈設位置	50
圖 3.2.2-1 歷年淤泥深度	51
圖 3.2.2-2 決定淤泥深度之示意圖	52
圖 3.2.2-3 淤泥深度之比較圖	53
圖 3.2.2-4(a)2002 年 03/31 地震加速度歷時曲線(上下游向).....	54
圖 3.2.2-4(b)2002 年 05/15 地震加速度歷時曲線圖(上下游向).....	55
圖 3.2.2-4(c)2002 年 09/07 地震加速度歷時曲線圖(上下游向).....	56
圖 3.2.2-4(d)2002 年 11/10 地震加速度歷時曲線圖(上下游向).....	57
圖 3.2.2-5(a)2002 年 03/31 地震各測站傅氏頻譜(上下游向).....	58
圖 3.2.2-5(b)2002 年 05/15 地震各測站傅氏頻譜(上下游向).....	59
圖 3.2.2-5(c)2002 年 09/07 地震各測站傅氏頻譜(上下游向).....	60
圖 3.2.2-5(d)2002 年 11/10 地震各測站傅氏頻譜(上下游向).....	61
圖 3.2.2-6(a)2002 年 03/31 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位角	62
圖 3.2.2-6(b)2002 年 03/31 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位角	63

圖 3.2.2-6(c)2002 年 03/31 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	64
圖 3.2.2-7(a)2002 年 05/15 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位 角.....	65
圖 3.2.2-7(b)2002 年 05/15 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位 角.....	66
圖 3.2.2-7(c)2002 年 05/15 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	67
圖 3.2.2-8(a)2002 年 09/07 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位 角.....	68
圖 3.2.2-8(b)2002 年 09/07 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位 角.....	69
圖 3.2.2-8(c)2002 年 09/07 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	70
圖 3.2.2-9(a)2002 年 11/10 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位角	71
圖 3.2.2-9(b)2002 年 11/10 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位角	72
圖 3.2.2-9(c)2002 年 11/10 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	73
圖 3.2.2-10 蓄水位深度與壩體第一自然振動頻率之關係.....	74
圖 3.2.2-11 蓄水位深度與阻尼比之關係.....	74
圖 3.2.2-12 2002/03/31 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應.....	75
圖 3.2.2-13 2002/05/15 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應.....	75
圖 3.2.2-14 2002/09/07 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應.....	75

圖 3.2.2-15 2002/11/10 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應	76
圖 3.2.3-1(a)2000 年 09/10 地震加速度歷時曲線(上下游向).....	77
圖 3.2.3-1(b)2001 年 12/18 地震加速度歷時曲線(上下游向).....	78
圖 3.2.3-1(c)2002 年 01/08 地震加速度歷時曲線(上下游向).....	79
圖 3.2.3-1(d)2003 年 12/10 地震加速度歷時曲線(上下游向).....	80
圖 3.2.3-1(e)2004 年 05/09 地震加速度歷時曲線(上下游向).....	81
圖 3.2.3-2(a)2000 年 09/10 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位 角	82
圖 3.2.3-2(b)2000 年 09/10 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位 角	83
圖 3.2.3-2(c)2000 年 09/10 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	84
圖 3.2.3-3(a)2001 年 12/18 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位 角	85
圖 3.2.3-3(b)2001 年 12/18 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位 角	86
圖 3.2.3-3(c)2001 年 12/18 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	87
圖 3.2.3-4(a)2002 年 01/08 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位 角	88
圖 3.2.3-4(b)2002 年 01/08 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位 角	89
圖 3.2.3-4(c)2002 年 01/08 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	90
圖 3.2.3-5(a)2003 年 12/10 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位	

角	91
圖 3.2.3-5(b)2003 年 12/10 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位角	92
圖 3.2.3-5(c)2003 年 12/10 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	93
圖 3.2.3-6(a)2004 年 05/09 地震各輸入測站與SDA輸出之傳遞函數及其相位角	94
圖 3.2.3-6(b)2004 年 05/09 地震各輸入測站與SDB輸出之傳遞函數及其相位角	95
圖 3.2.3-6(c)2004 年 05/09 地震各輸入測站與SDC輸出之傳遞函數及其相位角	96
圖 3.2.3-7 淤泥深度與壩體第一自然振動頻率之關係	97
圖 3.2.3-8 淤泥深度與壩體第二自然振動頻率之關係	97
圖 3.2.3-9 淤泥深度與阻尼比之關係	98
圖 3.2.3-10 淤泥深度與阻尼比之關係	98
圖 3.2.3-11 2000/09/10 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應	99
圖 3.2.3-12 2001/12/18 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應	99
圖 3.2.3-13 2002/01/08 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應	99
圖 3.2.3-14 2003/12/10 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應	100
圖 3.2.3-15 2004/05/09 測站SDB所識別出的預估反應及真實反應	100
圖 4.3.1-1 翡翠水庫周圍岩盤示意圖	101
圖 4.3.1-2 壩體側面(area)	101
圖 4.3.1-3 壩體頂面特徵弧線建立	102
圖 4.3.1-4 壩體體積特徵建立(尚未修正體積).....	102
圖 4.3.1-5 岩盤體積特徵建立(正面投影完成).....	103

圖 4.3.1-6 岩盤體積特徵建立完成	103
圖 4.3.1-7 壩體體積特徵修正	104
圖 4.3.1-8 壩體體積特徵修正完成	104
圖 4.3.2-1 SOLID45 Element	105
圖 4.3.3-1 壩體材料參數設定	105
圖 4.3.3-2 壩體材料參數設定	106
圖 4.3.3-3 岩盤材料參數設定	106
圖 4.3.3-4 岩盤材料參數設定	107
圖 4.3.4-1 壩體網格大小設定	107
圖 4.3.4-2 岩盤網格大小設定	108
圖 4.3.4-3 壩體網格建立完成	108
圖 4.3.4-4 岩盤網格建立完成	109
圖 4.3.4-5 水庫建立網格完成圖	109
圖 4.3.4-6 網格元素資料視窗圖	110
圖 4.3.5-1 模型邊界條件圖示	110
圖 4.4.1-1 降階法模態示意圖	111
圖 4.4.1-2 降階法模態示意圖	111
圖 4.4.1-3 模態分析參數設定	112
圖 4.4.1-4 模態分析結果摘要	112
圖 4.4.1-5 翡翠水庫第一模態(2.02Hz)	113
圖 4.4.1-6 翡翠水庫第二模態(2.21Hz)	113
圖 4.4.1-7 翡翠水庫第三模態(2.32Hz)	114
圖 4.4.1-8 翡翠水庫SAPIV模態圖	114
圖 4.4.2.1-1 ANSYS施加水壓力視窗	115
圖 4.4.2.1-2 擋土結構之移動	115

圖 4.4.2.1-3 土壓力分佈情形示意圖	116
圖 4.4.2.1-4 ANSYS施加淤泥土壓力視窗	116
圖 4.4.2.1-5 壩體施加土壓及水壓示意圖(向量表示圖).....	117
圖 4.4.2.1-6 壩體施加土壓及水壓示意圖(等高線標示圖).....	117
圖 4.4.2.1-7 壩體施加土壓及水壓示意圖(等高標示圖).....	118
圖 4.4.2.2-1 壩體座標示意圖	118
圖 4.4.2.2-2 壩體基礎之X方向最大反力(壓應力).....	119
圖 4.4.2.2-3 壩體基礎之Y方向最大反力(壓應力).....	120
圖 4.4.2.2-3 壩體基礎之Y方向最大反力(拉應力).....	121
圖 4.4.2.2-4 壩體結構位移圖	122
圖 4.4.2.2-5 壩體結構位移圖(壩身截面).....	122
圖 4.4.2.2-6 壩體結構位移等高線圖(X軸方向).....	123
圖 4.4.2.2-7 壩體結構位移等高線圖(Y軸方向).....	123
圖 4.4.2.2-8 壩身截面位移等高線圖(X軸方向).....	124
圖 4.4.2.2-9 壩身截面位移等高線圖(Y軸方向).....	124
圖 4.4.2.2-10 壩體結構應力等高線圖(X軸方向).....	125
圖 4.4.2.2-11 壩體結構應力等高線圖(Y軸方向).....	125
圖 4.4.2.2-12 壩身截面應力等高線圖(Y軸方向).....	126
圖 4.4.2.2-13 壩體結構主應力等高線圖(XY平面).....	126
圖 4.4.2.2-14 壩體結構主應力等高線圖(XY平面).....	127
圖 4.4.3-1 壩體結構動態歷時之位移極值(X軸方向).....	127
圖 4.4.3-2 壩體結構X軸方向位移歷時曲線(max=19.3mm)	128
圖 4.4.3-3 壩體結構Y軸方向位移歷時曲線(max=1.4mm)	128
圖 4.4.3-4 壩體基礎之X方向最大反力(壓應力；t=30 秒)	129
圖 4.4.3-5 壩體基礎之Y方向最大反力(壓應力；t=30 秒)	130

圖 4.4.3-6 壩體基礎之Y方向最大反力(拉應力；t=30 秒)	131
圖 4.4.3-7 壩體結構應力等高線圖(X軸方向；t=30 秒)	132
圖 4.4.3-8 壩體結構應力等高線圖(Y軸方向；t=30 秒)	132
圖 4.4.3-9 壩身截面應力等高線圖(Y軸方向；t=30 秒)	133
圖 4.4.3-10 壩體結構主應力等高線圖(XY平面；t=30 秒)	133
圖 4.4.3-11 壩體結構主應力等高線圖(XY平面；t=30 秒).....	134
圖A.1-1 天輪壩強震儀測站佈置圖	139
圖A.2-1(a)天輪壩地震加速度歷時曲線圖(上下游向)	140
圖A.2-1(b)天輪壩地震加速度歷時曲線圖(上下游向).....	141
圖A.2-2 天輪壩諸地震事件傅氏頻譜(上下游向).....	142
圖A.2-3(a)天輪壩諸地震事件之傳遞函數及其相位角	143
圖A.2-3(b)天輪壩諸地震事件之傳遞函數及其相位角.....	144



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

台灣地區雖然雨量豐沛，惟由於豐枯水期分配不均，因此有賴各大小水庫及水工結構物之調蓄水源，以滿足農業、民生及工業等用水需求，目前台灣地區現有水庫設施達近百座，由於台灣地區颱風與地震頻繁，加上近年來氣候異常頻率增高，水庫之安全有賴於定時之安全評估，其中安全監測為水庫安全評估極重要之一環外，亦為平時安全檢查之重要依據。由於台灣地區許多重要水庫隨著庫齡逐漸增加，監測儀器亦因屆齡損壞至安全監測資料逐漸減少，實有必要進行水庫安全監測之問題平溪及提升非破壞性檢測技術在水庫安全評估之應用，以強化水庫安全評估及平常安全檢查工作之落實。

常見有關水庫安全監測之問題包括儀器損壞比例偏高及監測資料常出現不合理現象，以致監測資料無法真實回饋數值模擬進行綜合評估；在現地檢查方面，一般以目視檢查為主，而數值校核分析所需要之材料參數則必須採用破壞性之補充鑽探，未能有效利用非破壞性監測之技術，以檢查壩體內部之情形並提供數值分析所需之參數。非破壞性檢測方法以系統識別方法最被廣泛應用，以往所發展之許多系統局部檢驗方法，必需預測損壞位置及結構桿件，但實際上這些條件並不容易達到，因此，發展非破壞檢測技術，應從整體結構及廣域非破壞檢測技巧著手較為可行。本文之目的是根據實測地震反應資料，利用系統識別方法(ARX)，配合 ANSYS 分析軟體評估翡翠水庫(混凝土拱壩)之靜力及動力特性，以瞭解壩體在地震作用後是否發生破壞，俾能及時進行安全補強措施。

1.2 文獻回顧

壩體-庫水系統之動力分析對於水工試驗是一項重要的工作；近年來，眾多研究被提出，也有許多有限元素分析軟體被發展出來，用於壩體-庫水系統之分析，並討論基礎岩盤、水、壩體及水庫中淤泥之間的互制效應。分析基礎岩盤的動態行為(壩體-庫水系統反應的線性模式)及混凝土壩體之應力乃相當困難，確有其必要。相關文獻顯示，大部份的研究皆利用有限元素法進行分析。近年有 J.Nasserzare 【1】 等人將水壩模擬為懸臂樑，推導其運動方程式，並加入外力因素、地震力、庫水靜壓力及庫水在地震後的動態水壓，進而求出壩體的振動頻率。

以往有關水壩的分析，多以有限元素為主，且只考慮二維之重力壩，而不考慮壩體及蓄水之互制作用。至 1933 年，H.W.Westergaard 【2】 發表水波方程式，始考慮庫-水互制作用；1967 年，A.K.Chopra 【3】 以速度位能方程式推導壩體-庫水互制作用的水壓，證明 H.W.Westergaard 之方程式僅能適用於外力振動頻率小於壩體-庫水系統之基本振動頻率時，以上所述皆未考慮壩體之柔性(flexibility)，直至 1968 年 A.K.Chopra 【4】 才考慮到利用壩體之基本振態，以瞭解庫水與壩體互制作用之影響；至 1973 年 【5】，A.K.Chopra 完成了壩體為柔性時，其壩體-庫水作用之關係。

於 1974 【6】、1975 年 【7】，A.K.Chopra 成功地解出燈塔與水互制作用時之水壓關係，但只考慮對稱構架之影響，且其解較為繁雜。1980 【8】，蔡崇興提出以有限元素法及副構架法，以探討拱壩受震時，考慮庫水、淤泥與壩體互制作用對於壩體自然振動頻率及振態之影響。至 1996 年，羅俊雄等人 【9】，利用系統識別方法(多重輸入-單一輸出)分析翡翠水庫，期探討蓄水位高及壩體自然振動頻率之關係，藉此作為評估水壩結構安全之依據，惟該

研究並未考慮淤泥的影響。2005 年，蔡政任【10】利用 SRIM 系統識別技巧，識別水庫壩體-庫水系統之自然頻率及振態，並探討有庫水與無庫水對於壩體自然頻率之影響，且建立一數學公式，以萃取不含庫水之壩體頻率。

本研究將利用 ARX 系統識別技巧(多重輸入-多重輸出)，根據實測之壩體地震反應，識別翡翠水庫之自然振動頻率，並探討蓄水位深及淤泥深度對壩體頻率之影響，作為水庫安全性評估的依據。此外，並利用 ANSYS 建構翡翠水庫結構分析模型，以進行靜力及動力分析，進而探討壩體受震前及受震後之安全性。最後於本文附錄介紹利用「無輸入-單一輸出」之 AR 識別技巧針對重力壩進行識別分析。

1.3 本文內容

本文共分五章，第一章為緒論，介紹研究動機與目的及文獻回顧。第二章介紹系統識別理論。第三章將對翡翠水庫進行識別分析以得知頻率及阻尼比，並探討蓄水位高及淤泥深度對壩體基本振動頻率之影響。第四章將利用 ANSYS，嘗試以翡翠水庫為藍本，建構拱壩模型，探討拱壩受震前及受震後之應力分佈狀況。第五章結論與建議。附錄將簡介利用「無輸入-單一輸出」之 AR 識別技巧，針對重力壩進行識別分析，以得知其頻率內涵及阻尼比。

第二章 系統識別理論

2.1 前言

由於數位記錄與電子科技之迅速發展，在建築結構上裝設感應器監測其動態反應已非難事。利用系統識別的技術可由量測到的結構反應推算結構的動力特性(頻率、阻尼比及振態)或其數學模式之結構參數(質量、阻尼及勁度矩陣)。結構的動態反應可由地震、環境擾動、強迫微動、強迫振動試驗等途徑得到。惟環境擾動極可能因雜訊之污染而影響識別結果。此外，土木結構多龐大而笨重，要完成有效之強迫振動試驗並不容易，且有可能造成受損結構之二度傷害。其實地震發生的過程已提供吾人最佳之結構動力試驗，若能由蒐集到之監測訊號進行識別，其結果將最為直接、真實，且毋須於事後進行額外之試驗，可減少人力、資源的浪費。

在識別分析中，吾人可輸入地震波，再根據量測到的結構反應進行系統識別，從而求出結構參數，以進行數值模擬分析。由於進行大型結構試驗的成本極高，若吾人能夠證實數值模擬分析可以精確地預測出試驗結果，則往後即無必要進行類似之試驗，僅根據先前發展之分析模式便能充分了解結構之耐震行為，足以作為決策之依據。另一方面，理論分析與試驗結果之相互印證，亦可檢核試驗結果之合理性，避免人為疏失造成試驗結果之誤導及繆誤之解讀。

本文採用推測-適應過濾法進行系統識別。推測-適應過濾法屬於時域分析法，係根據適應過濾(Adaptive filtering)與預測近似(Stochastic approximation)的觀念推導而來【11、12】。它整合了非參數識別與參數識別的內涵，先於時間域中建立系統之輸入與輸出間的時序性關係(ARX, ARMA,...等)，由預測誤差之遞迴最小平方準則求出每一瞬間之最佳系統參數，從而求出結構振頻、模態阻尼比等

結構動力特性。系統之模式可以由最簡單的單一輸入-單一輸出(SISO)延伸至單一輸入-多重輸出(SIMO)，甚至多重輸入-多重輸出(MIMO)的形式。其主要之優點為：(1)毋須建立預期之結構參數式模型；(2)只須處理少量的資料(對線性結構而言收斂速率極快)；(3)可識別出時變性系統。

2.2 系統識別理論介紹【13】

線性動力系統之等效離散時間模式，以單一輸入與單一輸出(SISO)的情況為例，可以線性差分方程表示為：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (2.1)$$

其中， $y(\cdot)$ 代表系統之輸出， a_i 's為輸出訊號係數， n_a 為其維度； $u(\cdot)$ 代表系統之輸入， b_i 's為輸入訊號係數， n_b 為其維度。

應用後移運算子(backward shift operator)，則可將(2.1)式表示為

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) = H(q) u(k) \quad (2.2)$$

其中，

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (2.3)$$

$$B(q) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (2.4)$$

若對式 (2.2) 取 z 轉換，得

$$y(z) = H(z)u(z) \quad (2.5)$$

$$\text{其中，頻率響應函數 } H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (2.6)$$

$y(z)$ 與 $u(z)$ 分別為 $y(k)$ 與 $u(k)$ 之 z -轉換， $A(z)$ 、 $B(z)$ 的定義類似於式(2.3)及式(2.4)，只是將 q 改為 z 。頻率響應函數的分子多項式 $B(z)=0$ 之根稱為其零點(zeros)，而頻率響應函數的分母多項式 $A(z)=0$ 之根稱為其極點(poles)。系統的自然頻率與阻尼比僅與傳遞函數的極點有關，而零點則決定振態反應的大小。當 $n_a \leq n_b$ 時，假設頻率響應函數 $H(z)$ 的極點無重根且均為共軛複數根，根據部份分式展開可將式(2.6)改成

$$H(z) = \sum_{j=1}^{n_a/2} H_j(z) \quad (2.7)$$

其中，

$$H_j(z) = \frac{2R(q_j) - 2R(q_j \bar{p}_j)z^{-1}}{1 - 2R(p_j)z^{-1} + |p_j|^2 z^{-2}} \quad (2.8)$$

p_j 為分母多項式 $A(z)=0$ 的第 j 個複數根；

$$q_j = \lim_{z=p_j} (1 - p_j z^{-1}) H(z) = \frac{b_1 p_j^{-1} + \dots + b_{n_b} p_j^{-n_b}}{\prod_{k=1, k \neq j}^{n_a} (1 - p_k p_j^{-1})} \quad (2.9)$$

系統的自然頻率 f_j 及阻尼比 ξ_j 可計算如下：

$$f_j = \frac{1}{2\pi T} \sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2} \quad (2.10)$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2}} \quad (2.11)$$

其中，

$$r_j^2 = p_j \bar{p}_j, \phi_j = \tan^{-1} \left[\frac{I(p_j)}{R(p_j)} \right] \quad (2.12)$$

T 為取樣週期。只要將式(2.1)中之係數 a_j 's, b_j 's 識別出來，即可得知結構之自然頻率、阻尼比以及頻率響應函數。

2.3 含噪音系統模型與預測誤差

式(2.1)所示為理想化之動力系統。實際量測之訊號中多少會有雜訊存在，因此我們可將系統模式修正為

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (2.13)$$

其中， $e(k)$ 代表雜訊，通常假設其為零均值(zero mean)之白雜訊(white noise)。多項式 $C(q)$ 之定義為

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \quad (2.14)$$

其中， c_i 's 為雜訊係數， n_c 為其維度。實際應用時，並不一定須要利用到每一多項式，可視情況予以簡化。例如

$$\text{AR 模型: } A(q)y(k) = e(k) \quad (2.15)$$

$$\text{ARX 模型: } A(q)y(k) = B(q)u(k) + e(k) \quad (2.16)$$

$$\text{ARMAX 模型: } A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (2.17)$$

$$\text{ARMA 模型： } A(q)y(k) = B(q)u(k) \quad (2.18)$$

根據式(2.14)，ARX 模型可進一步表示成

$$y(k) = \boldsymbol{\psi}^T(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (2.19)$$

其中，

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = [-y(k-1)\cdots -y(k-n_a), u(k)\cdots u(k-n_b)] \quad (2.20)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \cdots a_{n_a}, b_0 \cdots b_{n_b}]^T \quad (2.21)$$

若為單一輸入多重輸出(SIMO)模式時，

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(k) & \mathbf{u}(k) & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{y}_2(k) & \mathbf{0} & \mathbf{u}(k) & \cdots & \mathbf{1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{y}_m(k) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

其中，

$$\mathbf{y}_m = [-y_m(k-1)\cdots -y_m(k-n_a)] \quad (2.23a)$$

$$\mathbf{u}(k) = [u(k)\cdots u(k-n_b)] \quad (2.23b)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \cdots a_{n_a}, b_{10} \cdots b_{1n_b}, b_{20} \cdots b_{2n_b}, \cdots, b_{m0} \cdots b_{mn_b}]^T \quad (2.23c)$$

對式(2.19)取期望值，並利用白雜訊之零均值性質，可得

$$\bar{\mathbf{y}}(k, \theta) = \boldsymbol{\psi}^T(k) \boldsymbol{\theta} \quad (2.24)$$

輸出訊號期望值 $\bar{\mathbf{y}}(k, \theta)$ 代表已知之系統參數 $\boldsymbol{\theta}$ 下預測之輸出值。將其估測誤差定義為

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k, \theta) = \mathbf{y}(k) - \bar{\mathbf{y}}(k, \theta) \quad (2.25)$$

若識別出來之系統參數 $\boldsymbol{\theta}$ 完全正確，則 $\boldsymbol{\varepsilon}(k, \theta) = \mathbf{e}(k)$ 。

2.4 遞迴預測誤差法

今根據加權最小平方法之原理，定義系統之整體預測誤差為

$$V(k, \theta) = \frac{1}{2} \gamma(k) \sum_{s=1}^k \beta(k, s) \boldsymbol{\varepsilon}^2(s, \theta) \quad (2.26)$$

其中， $\beta(k, s)$ 為加權因子， $\gamma(k)$ 則為 $\beta(k, s)$ 之正規化因子(normalization factor)，其定義為

$$\gamma(k) \sum_{s=1}^k \beta(k, s) = 1 \quad (2.27)$$

若系統為非時變性時可令加權因子為 1，此時即相當於最小平方法。對於時變性系統而言，加權因子可以追蹤系統參數隨時間變化的特性，愈接近瞬時 k 的資料所給予的權重愈大。選擇指數視窗

$$\beta(k, s) = \lambda(k)\beta(k-1, s) \quad (2.28)$$

其中，

$$\beta(k, k) = 1 \quad (2.29)$$

$$\lambda(k) = \lambda_0\lambda(k-1) + 1 - \lambda_0 \quad (2.30)$$

λ 稱為遺忘因子(forgetting factor)，通常採用 $\lambda_0 = 0.99$ ， $\lambda(0) = 0.95$ 。為避免識別結果因雜訊影響而隨時間改變，我們將極小化的標準以期望值表示為

$$E[V(k, \theta)] = 0 \quad (2.31)$$

或(2.31)可根據牛頓-瑞福森之迭代法，解出系統模型參數

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \alpha_i [V''[k, \theta(k-1)]]^{-1} V[k, \theta(k-1)] \quad (2.32)$$

上式中令 $\alpha_i = 1$ ，並經運算整理後可得到遞迴形式解

$$\theta(k) = \theta(k-1) + L(k)[y(k) - \psi^T(k)\theta(k-1)] \quad (2.33)$$

其中，

$$L(k) = \frac{P(k-1)\psi(k)}{\lambda(k) + \psi^T(k)P(k-1)\psi(k)} \quad (2.34)$$

$$P(k) = \frac{P(k-1)}{\lambda(k) + \psi^T(k)P(k-1)\psi(k)} \quad (2.35)$$

通常選擇初始條件 $P(0) = 10^8 \sim 10^{10}$ 以加速其收斂速度。

本研究識別翡翠水庫拱壩之振動特性時可採用多重輸入-單一輸出或多重輸入-多重輸出模式(輸入訊號數 r 、輸出訊號數 m)，因此(2.22)式可進一步改寫如下(多重輸入-多重輸出)：

$$\boldsymbol{\Psi}^T(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(k) & \mathbf{u}_1(k) & \cdots & \mathbf{u}_r(k) \\ \mathbf{y}_2(k) & \mathbf{u}_1(k) & \cdots & \mathbf{u}_r(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{y}_m(k) & \mathbf{u}_1(k) & \cdots & \mathbf{u}_r(k) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

其中，

$$\mathbf{y}_i = [-y_i(k-1) \cdots -y_i(k-n_a)] \quad i=1 \cdots m \quad (2.37a)$$

$$\mathbf{u}_j(k) = [u_j(k) \cdots u_j(k-n_b)] \quad j=1 \cdots r \quad (2.37b)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \cdots a_{n_a}, (b_{10} \cdots b_{1n_b}, b_{20} \cdots b_{2n_b}, \cdots, b_{r0} \cdots b_{rn_b})_1, (b_{10} \cdots b_{1n_b}, b_{20} \cdots b_{2n_b}, \cdots, b_{r0} \cdots b_{rn_b})_2 \cdots, (b_{10} \cdots b_{1n_b}, b_{20} \cdots b_{2n_b}, \cdots, b_{r0} \cdots b_{rn_b})_r]^T \quad (2.37c)$$

利用(2.33)式至(2.35)式之遞迴預測誤差法即可求得未知數 $\boldsymbol{\theta}$ ，進而求得拱壩之自然振動頻率((2.10)與(2.11)式)。

第三章 翡翠水庫之系統識別分析

3.1 前言

本章將針對翡翠水庫(圖 3.1-1)強震儀實測之地震加速度歷時資料進行系統識別分析，俾便了解拱壩結構之自然振動頻率等特性。翡翠水庫拱壩乃一三心雙向彎曲變厚度拱壩(圖 3.1-2)，壩高為 122.5m，蓄水量為四億六百萬立方公尺，壩體內部並設置動態及靜態監測儀器，其擷取或回授之資料及訊號可作為水庫安全評核分析之用。圖 3.1-3 為拱壩結構之立面圖、上視圖及側視圖。本研究將利用拱壩基礎所設置之五組強震儀記錄(圖 3.1-4)作為輸入訊號，將壩體所設置之三組強震儀記錄作為輸出，再利用多重輸入-多重輸出之識別模式識別拱壩結構之自然振動頻率，俾便瞭解壩體之動力特性是否有異常變化的情況及歷次地震分析結果之差異程度，以評估系統識別模式應用於拱壩安全診斷之可行性。圖 3.1-5 為拱壩典型之變形模態(mode shape)示意圖，其結果顯示，拱壩變形以徑向最為顯著。

3.2 拱壩實測紀錄之系統識別分析

本節將依據第二章所述之系統識別理論撰寫 MATLAB 程式，並針對翡翠水庫強震儀實測之地震記錄進行分析。由於拱壩結構之振動特性可能與蓄水位高度及淤積深度有關，因此本研究亦將探討識別所得之振動頻率與蓄水位高度及淤泥深度間之關係。

3.2.1 翡翠水庫強震儀之配置

翡翠水庫拱壩及其周邊共設置 20 部強震儀，其中壩體上安裝 11 部強震儀(圖 3.2.1-1)，另有 9 部強震儀則分佈於庫區周邊。有關強震儀安裝位置及其型號整理如表 3.2.1-1。本文進行系統識別分析時將以拱壩底部所設置之五組強震儀記錄作為輸入訊號(即 SD1~SD5)，壩頂所設置的三組強震儀作為輸出訊號(即 SDA~SDC)，再利用多重輸入—多重輸出之識別模型識別翡翠水庫拱壩結構之自然振動頻率，俾瞭解壩體之動力特性是否有異常變化的情形及歷次地震分析結果之差異程度，以評估系統識別模式應用於壩體安全診斷之可行性，並探討壩體振動頻率與蓄水位高度及淤泥深度之關係。由於壩體振動反應以上、下游方向(Y 向)最大，因此本文將利用各測站 Y 向(上下游向)之地震歷時進行系統識別分析。

3.2.2 固定淤泥深度時壩體頻率與蓄水位高度之關係

淤泥深度定義方式

由於本節將會利用到淤泥深度，所以在此先介紹本研究對淤泥深度所做的定義。圖 3.2.2-1 為翡翠水庫歷年量測之淤泥高程曲線，其中，水平軸為沿著壩軸之距離，垂直軸則為淤積高程。圖中每條曲線代表不同年度之淤積曲線，共有 12 條曲線(民國 83 年~民國 94 年)。本研究定義壩上強震儀 SDA、SDB 及 SDC 三處之正下方所對應之淤泥高程取平均值代表該年度之淤泥深度(如圖 3.2.2-2)。圖 3.2.2-3 為吾人取每年度全部淤積高程值之平均數與只取上述三測站之平均的比較，由圖可知，2 種方式所得之趨勢大致吻合。

系統識別分析結果(淤泥深度固定)

為探討蓄水位與拱壩振動頻率之關係，本研究選取同為 2002 所測得之四筆地震加速度歷時資料，進行系統識別分析，諸地震之加速度歷時如圖 3.2.2-4(a)~3.2.2-4(d)所示，其加速度峰值統計如表 3.2.2-1 所示。此外，2002 年量測所得之淤泥高度為 90.49m(取三測站之平均值)，且四筆地震歷時所對應之蓄水位高度如表 3.2.2-2 所示，最高蓄水位為 2002/11/10 時之 150.75m，最低蓄水位則是 2002/05/15 時之 127.25m。

本研究亦針對各地震歷時進行頻域分析，主要是要瞭解時域振動訊號之頻率內涵(frequency content)，包括地表及結構(壩體)之振動頻率等特性。頻域分析主要是進行傅式轉換(Fourier Transform)，各測站上下游向之加速度反應傅氏頻譜如圖 3.2.2-5(a)~圖 3.2.2-5(d)所示。其結果顯示，頻率內涵集中在 10Hz 以內之頻寬範圍，且峰值出現之位置即為地表或壩體的主要振動頻率。由於壩體振動加速度振動頻譜之峰值可能同時包含地表及壩體本身之振動頻率，因此有必要再利用系統識別之方法求得壩體結構系統之傳遞函數(Transfer Function)，以確認壩體實際之振動頻率。

本文於系統識別分析係採用多重輸入-多重輸出識別模式，係以 SD1 至 SD5 測站之 Y 向(上下游向)加速度作為輸入訊號，SDA 至 SDC 之 Y 向(上下游向)加速度作為輸出訊號，識別階數採用 60。由於壩基有五處強震儀輸入訊號，壩體則有三處強震儀輸出訊號，因此壩體之傳遞函數將有 15 種組合(如 SD1 與 SDA 至 SDC 之傳遞函數、SD2 與 SDA 至 SDC 之傳遞函數等)。本節四筆地震事件之各種傳遞函數組合如圖 3.2.2-6(a)~圖 3.2.2-9(c)所示。其結果顯示，傳遞函數之峰值所對應之頻率即為拱壩之主要振動頻率，本文取各傳遞函數峰值所對應頻率之平均值作為拱壩之振動頻率，阻尼比亦取其平均

之值來代表。蓄水高度與識別所得之頻率及阻尼比整理如表 3.2.2-3 所示，其結果顯示，當蓄水位高度越高時，可視為壩體之系統質量(M)增加，造成系統之頻率降低；而阻尼比則與振動頻率呈現正比之關係—當振頻較低時，阻尼比亦隨著降低；當振頻較高時，阻尼比則隨之增加。惟阻尼比與振動頻率之關係變異性較大，其關係曲線如圖 3.2.2-10 及圖 3.2.2-11 所示。此識別結果與羅等人【9】之研究結果趨勢一致，惟二者採用之地震記錄及識別模式不同，羅【9】採用之地震記錄集中在 1992 年，而本研究則是擷取 2002 年之地震歷時。此外，羅【9】採用之識別模型為多重輸入-單一輸出模型，本研究則為多重輸入-多重輸出模型。此外，識別預測所得之 SDB 測站加速度歷時量測反應之比較如圖 3.2.2-12~圖 3.2.2-15 所示，其結果顯示，預測值與實測值相當一致，說明本文識別所得之拱壩振動頻率十分精確可靠，識別分析之模式相當合理。

由於拱壩之振動頻率與蓄水位高度間有一近似線性關係存在，識別所得之頻率分佈十分逼近迴歸之直線方程式。因此，吾人研判翡翠水庫拱壩於 2002 年歷次地震事件下應無結構性損傷發生。

3.2.3 固定蓄水位時壩體頻率與淤泥深度之關係

系統識別分析結果(蓄水位高度固定)

本節將探討淤泥深度對於壩體振動頻率之影響。為能達到固定蓄水位高度而又能看出顯著淤泥深度之變化，吾人遂挑選 2000 年至 2004 年期間，水位高度差異不大之五筆地震歷時進行分析，其地震加速度如圖 3.2.3-1(a)~圖 3.2.3-1(e)所示，其加速度峰值統計如表 3.2.3-1 所示。此外，五筆地震歷時所對應之蓄水位高度及淤泥深度如表 3.2.3-2 所示，最高蓄水位為 2003/12/10

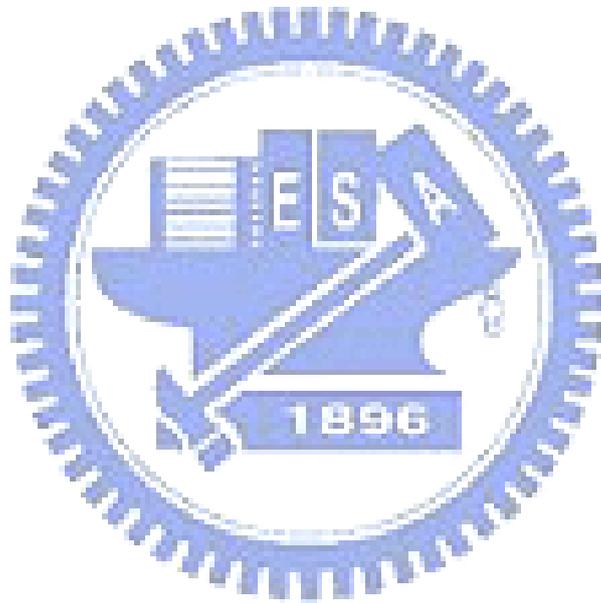
時之 160.78m，最低蓄水位則是 2004/05/09 時之 159.71m，相差僅約 1.07m，可視為固定蓄水位高度，由表 3.2.3-2 亦可得知，五筆地震所對應之當年度淤泥深度最高者為 2002/01/08 時之 90.49m，最低者為 2000/09/10 時之 87.64m，此高度係採用前述三測站(SDA、SDB 及 SDC)正下方所對應之淤泥深度總和再取平均值所得。

同樣地，利用多重輸入-多重輸出識別模式進行系統識別分析，所得之各種傳遞函數組合如圖 3.2.3-2(a)~圖 3.2.3-6(c)所示。傳遞函數峰值所對應之頻率即為拱壩之主要振動頻率，本文取各傳遞函數峰值所對應頻率之平均值，作為拱壩之振動頻率，阻尼比亦取其平均值。淤泥深度與識別所得之頻率及阻尼比整理如表 3.2.3-3 所示，由表 3.2.3-3 可知，當水庫的淤泥越高時，壩體系統之第一振頻及第二振頻都隨之降低，而阻尼比亦隨著系統頻率的降低而減少，惟阻尼比與振動頻率之關係變異性較大，其關係曲線如圖 3.2.3-7~圖 3.2.3-10 所示。當水庫中的淤泥增高時，壩體之振動頻率，隨著淤泥深度增加而降低，因水庫沉積淤泥之性質較接近黏稠的液體，當地震發生晃動時，水庫中的淤泥會和庫水一併依附壩體產生振動，造成壩體之振動頻率降低(週期變大)，此一結果與蔡【8】於 1979 年所得之結論相符。蔡之研究係以簡化之拱壩模型，利用有限元素及副構架法進行分析，而本研究則以實測地震歷時資料進行識別分析，並配合管理局所提供的之水庫淤泥高度資料進行探討。

同樣地，識別預測所得之 SDB 測站加速度歷時與量測反應比較如圖 3.2.3-11~圖 3.2.3-15 所示，其結果顯示，預測值與實測值相當一致，顯示識別所得之拱壩振動頻率十分可靠，再次驗證識別分析模式之合理性。

綜上所述，採用多重輸入-多重輸出識別模式可識別翡翠水庫拱壩之振

動頻率。拱壩之振動頻率與蓄水位高度及淤積深度相關，拱壩之振動頻率有隨著蓄水位高度及淤積深度增加而降低之趨勢。



第四章 翡翠水庫之ANSYS分析

本章旨在嘗試利用 ANSYS 以翡翠水庫為藍本，建構拱壩模型，探討拱壩之結構動力特性及應力分析，以期了解拱壩之動態特性及應力分佈情形。惟本研究掌握資訊有限，某些條件係自行假設(如邊界條件、水壓力等)，因此分析結果未必全然反映翡翠水庫之真實行為。

4.1 ANSYS 簡介及發展流程

半個世紀以來，隨著計算機科學與應用技術的飛速發展，有限元素理論日益完善，發展出眾多的通用和專業的有限元素計算軟體。其中，最常見者包括 ANSYS、ABAQUS、MARC、ALGOR、ADINA、ASKA、COSMOS 和 SYSTUS 等商用軟體。

ANSYS 是最為通用和有效的商用有限元素軟體之一，本研究即選用 ANSYS 為分析工具。它融合結構、傳熱學、流體、電磁、聲學和爆破等問題之分析於一體，具有強大的前後處理器及計算分析能力，自八零年代引進台灣以來，ANSYS 以其強大的功能、可靠的精度、全面的培訓及良好的市場開拓，廣泛應用於我國的土木工程、機械製造、材料加工、水利工程、航空航天、鐵路運輸業、石油化工、能源、汽車、電子、造船、生物醫學、地礦等各方面，為各領域的產品設計、研發和前瞻性研究提供了重要的分析工具。

許多工程技術及研究人員在面對極其龐大的系統時往往無所適從，有時又迫切須要利用有限元素軟體的某些功能快速解決特定領域的工程問題。如今，ANSYS 已經發展成為一個多元性的分析軟體。為科學研究和工程實務

提供了巨大的便利性。大多數 ANSYS 使用者初次面對層疊眾多的指令選單時常感到束手無策，或許他們可以了解指令選單的詳細功能和宏觀構架，但未必能快速掌握實際操作的技巧和分析問題的能力。即使是經驗豐富的工程技術人員，也要經常查閱相關的工具書。惟目前有關 ANSYS 的使用指導工具書仍不多見，殊為可惜。

ANSYS 公司於 1970 年成立，其總部位於美國的賓州的匹茲堡。ANSYS 是目前世界上 CAE 行業最大的公司，其創始人 John Swanson 博士為匹茲堡大學力學系教授，有限元素分析領域的權威。John Swanson 洞察到計算機模擬工程商品化的發展，創立了 ANSYS 公司。30 多年來，ANSYS 公司致力於有限元素解析模組的開發，不斷汲取新的計算方法和計算技術，引領世界有限元素技術的發展，為全球業界所推崇。如今，ANSYS 的用戶已遍佈全世界眾多的眾多科研院校和單位。

最初，ANSYS 軟體僅是一個批次處理程序，提供了熱分析及線性結構分析功能，只能在大型計算機上使用。20 世紀 70 年代，ANSYS 為了滿足廣大用戶的需求，融入了非線性、子結構以及更多的結構單元類型，使得 ANSYS 的功能大幅增加；20 世紀 70 年代末，圖形技術和交換操作方法的應用，促使 ANSYS 在模型建立和輸出結果均大為簡化。在進行分析之前，可以利用交互式圖形(前處理)來驗證模型的生成過程、邊界條件和材料屬性；分析求解完畢，計算結果的圖形顯示(後處理)可用來檢驗分析結果的合理性。

如今，ANSYS 軟體已更趨完善，功能日益強大，使用更加方便快捷。ANSYS 分析模擬工具易於使用，支援多種工作平台，且在不同平台間的相容性極佳。此外，選單功能的拓展，使 ANSYS 能涵蓋大多數的工程應用領

域。ANSYS 利用參數設計語言 APDL，可快速產生有效的分析及處理文件。

4.2 ANSYS 分析流程之建立

一個典型的 ANSYS 分析流程主要包含前處理、加載與求解及後處理等三個步驟，茲敘述如下；

1. 前處理

- 定義元素、截面、及材料性質(Elements、Sections and Materials)：此步驟主要在定義元素型式(Element Type)、幾何常數(Real Constants)、及材料性質(Material Properties)。
- 繪出幾何圖形(Geometry)：可由軟體提供之功能或 CAD 系統繪出，幾何圖形包括點(Keypoint)、線(Line)、面積(Area)及體積(Volume)。
- 網格畫分(Meshing)：網格分愈細，計算結果之誤差愈小，但所需時間愈長。網格產生方式有直接分格及自動分格兩種；要提高分析之精確度有網格細分法(h-Method)、高次元素法(p-Method)、混合並行法(hp-Method)等三種調適網格(Adaptive Mesh)的方式。

2. 加載及求解

- 荷重及束制(Loads and Constraints)：荷重可包含集中力、分佈力、加速度及預應變(Pre-strain)等；束制則是定義一個結構固定的部份，或稱為邊界條件(Boundary Conditions)。

- 分析(Analysis)：本步驟包含大量的電腦運算，在完成前處理(Pre-Processing)後進行之求解(Solution)程序。

3.後處理

後處理是指檢查及分析結果的相關操作。分為 POST1(通用後處理器)和 POST26(時間歷時處理器)。在 POST1 是查看整體模型在一荷載步(load step)或子步(substep)的結果。而 POST26 可查看模型某一結點(node)的某一結果相對於時間、頻率或其他結果項之變化。其重要之指令如下：

- PLNSOL,Item,Comp,KUND,Fact,FilID:可顯示整體模型之節點(node)平滑應力圖
- PLESOL,Item,Comp,KUND,Fact: 可顯示整體模型之元素(element)過渡不平滑應力圖
- PLVECT,Item,Lab2,Lab3,LabP,Mode,Loc,Edge,KUND: 可用向量方式顯示模型結果某個向量之大小和方向。例如結構之平移、轉動溫度梯度及主應力等。
- NSOL,NVAR,NODE,Item,Comp,Name:保存某一節點時間歷時結果數據。NVAR 為向量編號; NODE 為節點編號; Item,Comp 為所取之數據項; Name 為變數名。
- DERIV,IR,IY,IX,--,Name,--,--,FACTA:對變數進行微分運算。IR 為運算結果之編號; IY, IX 為微分運算變數之編號; FACTA 為比例係數。

4.3 翡翠水庫之ANSYS模型建立

本節將利用 ANSYS10.0 泛用型有限元素軟體嘗試進行拱壩之建模以及靜力與動力分析。主要是探討壩體結構靜態及動態特性。本文建模過程中，做了以下假設：不考慮拱壩下游面之水深、動力分析時未考慮互制效應。

4.3.1 翡翠水庫幾何外型之建立

翡翠水庫之結構設計乃一三心雙向彎曲變厚度混凝土拱壩，該壩體是由二種不同曲率及三個圓心角之弧線所構成，其曲率半徑分別為：500M、220M 及 500M，期對應之圓心角則分別為：14.6 度、61.2 度及 16.9 度。另外，壩基到壩頂是由數段不同曲率的線段所組成，可見翡翠水庫幾何外形之複雜程度，此亦增加建模的難度。

本研究在利用 ANSYS 建模前，先做了一些假設及規劃工作如後：翡翠水庫周邊岩盤的分析範圍係取其上下游及兩岸各延伸一公里，而高程差則取壩頂向下至 360 公尺處，如圖 4.3.1-1 所示。決定周圍岩盤的尺寸相當重要，因為將會影響到 ANSYS 的分析結果，例如壩體的頻率就會因岩盤考慮範圍的不同而改變，進而影響分析結果。經多次的試誤後，發現當翡翠水庫的分析範圍採河谷兩岸及上下游的岩盤延伸一公里(1000m)，而高程差從壩頂往下延伸 360 公尺之分析結果，最接近實測的結果。後續的動態分析將依據此一模型。

周圍岩盤尺寸確定後，接著就進入 ANSYS 的建模環境下進行水庫的幾何外觀建模。ANSYS 的建模過程隨個人主觀好惡而不同，吾人採用點(Keypoint)、線(Line)、面積(Area)及體積(Volume)循序漸進的方法配合 ANSYS

內建的分割(Divide)、黏貼(Glue)、擠壓(Extrude)等功能進行細部之建模，建模步驟如圖 4.3.1-2~圖 4.3.1-8 所示。

4.3.2 網格元素種類的選取及描述

本研究進行翡翠水庫建模分析時採用 SOLID45 元素進行分析。SOLID45 是用來建構 3D 實體結構的最基本元素，也是 ANSYS 最早發展的元素，如圖 4.3.2-1 所示。此一元素有八個位於頂點的節點(編號為 I, J, K, L, M, N, O, P)，屬於線性元素；每一個節點有 3 個自由度，分別為 UX, UY, UZ, 亦即 X, Y, Z 三個方向的變位。這個元素的形狀通常是一個六面體(hexahedron)，但是當某些節點重疊在一起時，這個元素可以退化(degenerate)成三角柱(prism)或是四面體(tetrahedron)，如圖 4.3.2-1 所示。當 ANSYS 在自動切割網格，需採用三角柱或四面體時，會把某些節點重疊在一起。

SOLID45 除了支援 linear elasticity 問題外，還可支援 plasticity、creep 等非線性力學模式，及 large deflection、large strain 等幾何非線性的問題；其他支援的功能包括 strain hardening 等。SOLID45 雖然包含很多功能，但並未包含較新發展的理論，導致分析精確度不佳，尤其是大變形理論及新的材料模式，所以後來又發展其他元素來支援這些問題。這些較新的元素編號都是以 18 開頭(例如 SOLID45 所相對應的 SOLID185 元素)，因此統稱為 18X elements。不過對線性分析或一般的非線性分析而言，用 SOLID45 或 SOLID185，其結果是一致的。

4.3.3 定義材料參數

水庫解析模型主要分包括壩體及岩盤兩部分，在建模時必須定義兩種材料模式，以便後續在建立網格(mesh)時，能對不同的對象定義其對應的材料模型。岩盤材料參數方面，係取楊氏模數為 $2.9E10 \text{ N/m}^2$ ($2.9E9 \text{ kg/m}^2$)，波松比(poisson's ratio)為 0.3，密度取 2600 kg/m^3 。壩體材料參數方面，楊氏模數為 $2.85E10 \text{ N/m}^2$ ($2.85E9 \text{ kg/m}^2$)，波松比(poisson's ratio)為 0.167，密度取 2400 kg/m^3 。材料參數設定如圖 4.3.3-1~圖 4.3.3-4 所示。

4.3.4 建立網格

完成水庫模型的幾何外形及元素種類與材料性質參數後，接著就建立網格(mesh)。網格切割越細，分析結果就會越趨近於收斂值，不過相對也會增加電腦運算的時間，有時甚至需要運用多台電腦做平行運算。ANSYS 內建的切割網格功能相當強大，使用者只要依需求做一些簡單設定後，ANSYS 就會自動對模型進行劃分網格的動作，而且亦會對模型中較不易建立網格的地方(例如:不連續面、破裂面等)自動做適當的修正，增加使用之便利與效率。

以本研究所分析之翡翠水庫來說，壩體之元素邊長設定為 60m，如圖 4.3.4-1 所示；而岩盤部分則設定為 100m，如圖 4.3.4-2 所示。壩體網格大小設定得比岩盤小是可以理解的，因為壩體的尺寸相對於岩盤而言要小很多，所以必須用更緻密的網格來分析。此外，壩體之動態反應及應力分析結果較為吾人所關注，所以用較小的網格切割以提高其精確性。建立網格的各項步驟如圖 4.3.4-3~ 圖 4.3.4-5 所示。另外，由圖 4.3.4-6 所示，此翡翠水庫模型中的網格元素總共有 2076 個，在分析上並不會花費太多的 CPU 時間，分析的效率尚稱理想。

進行單元網格劃分時有兩種方法，包括 Mapped(映射)法及 Free(自由)法。映射法是將面劃分成規則的四邊形單元，而自由法是將面劃分成四邊形單元及三邊形單元。映射法劃分的單元在計算上較為理想，不容易出現奇異點，能夠進行正常的求解；自由法劃分的單元較不利於計算，容易出現奇異點，有時將導致無法成功求解。因此，在進行力學分析時，建議採用映射法來劃分單元。

4.3.5 邊界條件的設定

水庫的模型及網格劃分完成後，接著就可決定邊界條件。本研究對水庫模型做了一些邊界條件的設定：在水庫上下游方向對 X 方向束制，而兩岸則對 Z 方向做束制，壩底模型底部則對全部自由度都加以束制，如圖 4.3.5-1 所示。邊界條件的設定，主要是參考市售 ANSYS 專書之類似範例，不過參考書籍中的範例邊界條件的設定條件不盡相同，因此本研究在 ANSYS 環境中考慮幾種邊界條件進行分析測試，並由分析結果的合理性決定採用前述的邊界條件。

以上敘述利用 ANSYS 建立翡翠水庫結構分析模型的過程及設定；建模過程中較重要的資訊及參數整理如表 4.3.5-1。

4.4 翡翠水庫之分析

本節進行翡翠水庫之各項力學分析，包括特徵分析及應力分析，目的在於瞭解本研究所建立之拱壩結構的振動特性及其分析結果是否合理。

4.4.1 模態分析

本節將對水庫數值模型進行模態分析，以驗證其動態特性是否合乎預期，確認該解析模型能反映真實的結構行為。

模態分析僅適用於線性系統，因此任何非線性元素如塑性和接觸單元在模擬分析時將被忽略。ANSYS 提供 6 種模態提取方法：

- Subspace(子空間)法:子空間法通常用於大型結構中，僅探討前幾個之振動頻率，所得到之結果較準確，不需定義主自由度，但需要較多的硬碟空間及 CPU。
- Reduce(降階)法:該方法為一般結構最常用的方法之一，其原理係選取原結構某些重要的節點為自由度，稱為主自由度(master degree of freedom)，藉由該主自由度，先行簡化系統成較少的自由度，並以此主自由度定義結構之質量矩陣及勁度矩陣，並求取頻率及振動模態，進而將其結果擴展至整體結構，如圖 4.4.1-1~圖 4.4.1-2 所示。
- Unsymmetrical(非對稱)法:該方法使用於質量矩陣或剛性矩陣為非對稱，例如轉子系統。其 eigenvalue 為複數，實數部份為自然頻率，虛數部分與系統之穩定度有關，正值表示不穩定，負值表示穩定。
- Damp(阻尼)法:結構系統具有阻尼特性時，其 eigenvalue 為複數，虛數部分為自然頻率，實數部份為系統之穩定度，正值表示不穩定，負值表示穩定。

- QR damp(QR 阻尼)法:該方法也是使用於結構系統具有阻尼之條件，其計算的效率比阻尼法快，可在模態座標系統求其自然頻率。
- Block lanczos(區塊 lanczos)法: 該方法也是使用於結構系統具有阻尼之條件，計算的效率比阻尼法快。可在模態座標系統求其自然頻率。

本研究將採用 Subspace(子空間)法進行拱壩模型模態分析，並設定展開模態之個數為 10 個，如圖 4.4.1-3 所示。ANSYS 的模態分析結果摘要如圖 4.4.1-4 所示，包括了前 10 個模態的頻率資訊，前三振頻分別為 2.02 Hz、2.21 Hz 及 2.32 Hz。此外，前三模態的振形如圖 4.4.1-5~ 圖 4.4.1-7 所示。

為了驗證 ANSYS 分析之合理性，因此將其結果與文獻【14】中用 SAPIV 之分析結果(詳圖 4.4.1-8)做比較，如表 4.4.1-1 所示。由結果顯示，本研究與文獻【14】SAPIV 計算之頻率接近，驗證此一翡翠水庫模型之合理性，分析結果應能真實反映水庫的力學行為。此外，本研究除第一模態之振形與 SAPIV 所得之第一模態振形有差異外，第二及第三模態振形之趨勢則大致符合。

4.4.2 翡翠水庫之常態載重分析

4.4.2.1 靜水壓力及淤泥土壓

作用於水庫壩體上的外力包括靜水壓及淤泥產生的壓力，由於本研究所取得的相關資料有限，因此在設定作用外力時，對於無法確切得知的參數或性質，乃參考其他書籍後決定適當的數值代入分析。關於 ANSYS 的各項施

加外力過程及方式敘述如下。

水壓力

本例施加之水壓力是考慮翡翠水庫蓄水位高程為 144.29m(絕對高程)之情況。根據流體力學，水壓力是「水深」乘以「水的比重」，因此就本案例而言，水的比重為 1000 kg/m^3 ；水位深度則為「水位高」減去「壩底高程」，亦即「144.29」減去「53」得到水深 91.29m，最後可得到壩底最大水壓力為 $91.29 \times 1000 = 91290 \text{ kg/m}^2 (9.1E5 \text{ N/m}^2)$ 。在 ANSYS 中施加水壓力之鍵入指令流程如下：

SFGRAD →ENTER

SFGRAD,PRES,0,Y,0,-1000 →ENTER

SFE,P,3,PRES,91290,,,, →ENTER

點選 PICK ALL 後，於顯示之視窗中鍵入 VAL2~4=91290；LKEY=3

上述指令視窗如圖 4.4.2.1-1 所示。

淤泥壓力

水庫中作用於壩體之外力除了儲存的庫水外，還有淤泥作用在壩體之土壓力，所以分析時須考慮淤泥作用於壩體之土壓力，其施加方式及設定敘述如下：

決定靜止土壓之前，要先決定靜止土壓係數 K_0 。在此吾人假設翡翠水

庫底淤泥之內摩擦角為 20 度(假設淤泥為正常壓密土壤)，如表 4.4.2.1-1，代入土壤力學公式

$$k_0 = 1 - \sin \varphi \quad (4.1)$$

可得到靜止土壓係數 K_0 為 0.66。

就壩體而言，產生主動土壓力及被動土壓力之先決條件為土體必須有足夠的變形。根據實際觀測，若擋土牆高度為 H 如圖 4.4.2.1-2 所示，各類土壤發生主動及被動土壓所需之移動值如表 4.4.2.1-2 所示。

擋土設施背後之土壓力分佈，依其移動狀況的不同而有所不同，如圖 4.4.2.1-3 所示，其中

- 圖(a)所示者，為擋土設施剛性極大而允許頂端移動、下端轉動的情況，牆後主動土壓力分佈的情形。一般之重力式擋土牆、懸臂式擋土牆、無支撐版樁等背後之土壓力分佈情況均屬之。
- 圖(b)所示者，為只允許下端移動而頂端轉動時，牆後主動土壓分佈情形，一般深開挖擋土設施之土壓力分佈情況屬之。
- 圖(c)所示者，為具柔性而上下固定之擋土牆土壓力分佈，土壓力的最小值發生在擋土牆中點的附近。撓曲性極大的鋼板樁屬於此型。

因翡翠水庫之壩體變形量相對於壩高(172m)而言非常微小，根據表 4.4.2.1-2 之條件衡量之，吾人可合理假設本例不需考慮到主動或被動土壓力。

根據式(4.1)靜止土壓力係數，並忽略壩體之主動及被動土壓力，即可由土壤力學中的基本公式($\sigma = K_0 \gamma h$)得出靜止土壓力。

在 ANSYS 中施加土壓力之鍵入指令流程如下：

SFCUM, PRES, ADD, 1, 1 →ENTER(重複區域加載壓力指令)

SFGRAD, PRES, 0, Y, 0, -773.52 →ENTER

SFE, P, 3, PRES, 13683,,, →ENTER

點選 PICK ALL，於顯示之視窗中鍵入 VAL1~4=13683；LKEY=3

上述指令視窗如圖 4.4.2.1-4 所示。

壩體上的外力(水壓力及淤泥土壓力)施加完成之示意圖如圖 4.4.2.1-5~圖 4.4.2.1-7，圖示中模型下方的光棒代表施力之大小，越往右邊的紅色區塊，表示應力越大；反之，越往左邊則越小。應力之最大值為 104973 kg/m²(1.0E6 N/m²)，乃土壓及水壓相加之結果。

4.4.2.2 分析結果與討論

表 4.4.2.2-1 摘錄了位移、應力及 XY 平面主應力等(座標詳圖 4.4.2.2-1)之極值，其中位移之單位為 m，應力之單位為 Pa。由圖 4.4.2.2-1 可知，此模型之 X 軸方向為上下游向，Y 軸方向為壩體高程之方向(壩高方向)，Z 軸方向為壩體兩岸之方向(壩軸方向)。此外，由圖 4.4.2.2-2~圖 4.4.2.2-4 可知，壩體基礎之反力在 X 軸方向大部份是受壓，且最大壓應力為 12.8MPa；Y 軸

方向最大拉應力為 7.4MPa，最大壓應力為 23.3 MPa。

位移及應力分析

1. 位移檢核

由表 4.4.2.2-1 顯示，壩體結構最大之 X 軸方向位移為 6.5 mm，Y 軸方向位移為 1.1 mm。由圖 4.4.2.2-4~圖 4.4.2.2-9 可知，其最大變形量為 6.5 mm。由於翡翠水庫壩高為 172m，因此在常態載重下其變形相對於壩高為僅為 0.003%，故從容許變形的角度來看，翡翠水庫壩體結構安全無虞。

2. 壩底基礎之應力檢核

由圖 4.4.2.2-2~圖 4.4.2.2-4 可知，大壩基礎於 X 軸方向承受之反力，大都是受壓的狀態，最大壓應力為 12.8MPa；Y 方向之最大拉應力為 7.4MPa，最大壓應力為 23.3MPa。其結果顯示，壩底基礎之應力通常較大，平時之壩體結構安全檢查時可將壩底(基)列為優先檢查項目。由於本案分析時未考慮下游面水壓力之作用，因此壩底混凝土拉應力分析的結果有稍大的現象。

3. 壩體應力檢核

壩體混凝土應力檢核如表 4.4.2.2-1 所示，其中 X 軸方向之最大壓應力為 0.16 MPa，最大拉應力為 0.145 MPa(圖 4.4.2.2-10)；Y 軸方向最大壓應力為 1.36 MPa，最大拉應力為 1.43 MPa(圖 4.4.2.2-11、圖 4.4.2.2-12)；XY 平

面主應力(座標詳圖 4.4.2.2-1)之最大壓應力為 0.09MPa，最大拉應力為 1.4 MPa(圖 4.4.2.2-13、圖 4.4.2.2-14)。其控制因素為 Y 軸方向之應力，即最大壓應力為 1.36 MPa，最大拉應力為 1.43MPa。其結果顯示，壩體部份於常態載重下，相對於基礎而言，其所受之應力則較小。

4.4.3 地震歷時反應分析

本研究選取翡翠水庫 2002/03/31 地震事件之 SD3 測站加速度歷時資料(圖 3.2.2-4(a)、表 3.2.2-1)，輸入翡翠水庫 ANSYS 模型，期瞭解拱壩在受到地震力作用時，壩體內部應力之分佈情形及變形狀態。

1. 位移檢核

由圖 4.4.3-1 及圖 4.4.3-2 可知，翡翠水庫壩體受地震作用時，其 186 號節點(node)(位於壩頂中央位置)之最大之 X 軸方向位移為 19.3mm，最小之 X 軸方向位移為-8.7mm，Y 軸方向位移最大值為 1.4mm，最小值為-0.06mm(圖 4.4.3-3)，由拱壩之壩高為 172m，因此變形相對於壩高僅為 0.01%，故從變形的角度來看，拱壩結構於地震力作用下，壩體結構安全無虞。

2. 壩底基礎之應力檢核

吾人於動力分析完成後，經檢查壩底基礎附近諸節點之歷時資料，顯示 30 秒附近為應力極值所在，因此擷取第 30 秒時之數據資料，以檢驗壩體基礎於地震力作用下之受力情形。壩體基礎 X 軸方向承受之反力，以受壓情形較普遍，最大壓應力為 84.3MPa，Y 方向最大拉應力為 40.0MPa，最大壓應力為 86.3MPa(圖 4.4.3-4~圖 4.4.3-6)。其結果顯示，壩底基礎於地震力作

用下，其所受之應力可為靜力結果的 5 倍以上，尤以拉應力增幅最大，因此壩底(基)為拱壩較易產生破壞之區域。同樣地，由於本案分析時未考慮下游面水壓力之作用及水與壩體結構之互制效應，因此壩底混凝土拉應力分析的結果有稍大的現象。

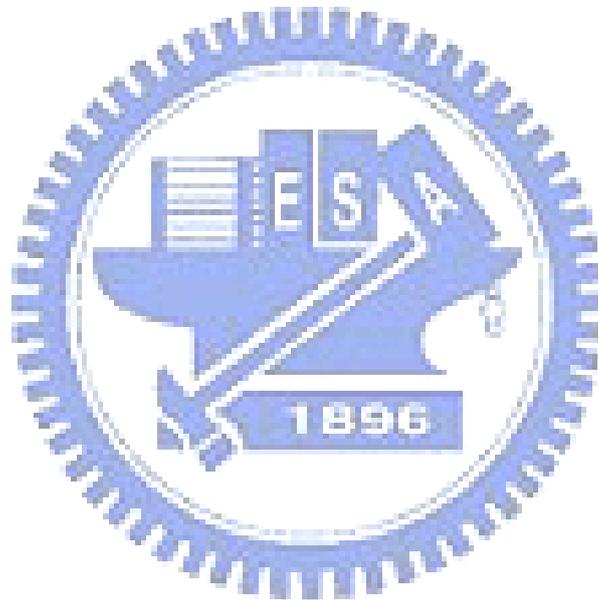
3. 壩體應力檢核

一般來說，壩身強度主要檢核其 X 軸方向應力、Y 軸方向應力及 XY 平面之主應力(座標定義詳圖 4.4.2.2-1)。吾人同樣擷取第 30 秒時之歷時資料進行分析。壩身 X 軸方向最大壓應力為 0.2MPa，最大拉應力為 0.2MPa(圖 4.4.3-7)；Y 軸方向最大壓應力為 1.74 MPa，最大拉應力為 1.88 MPa(圖 4.4.3-8、圖 4.4.3-9)；XY 平面之主應力(座標詳圖 4.4.2.2-1)之最大壓應力為 0.1MPa，最大拉應力為 1.88MPa(圖 4.4.3-10、圖 4.4.3-11)。其控制因素為 Y 軸方向之應力，即最大壓應力為 1.74 MPa，最大拉應力為 1.88MPa。其結果顯示，壩體於動力之條件下，其所受之應力較壩底(基)小，惟上述結果係未考慮動態水壓力作用下所得之結果，未來可將動態水壓力納入分析模型，以求得壩體更真實之受力情況。

4. 靜力及動力分析結果比較

由上述結果顯示(表 4.4.3-1)，拱壩結構於靜力或地震力作用下，壩底基礎部份皆是受拉應力最為顯著之處，為拱壩結構較為脆弱的區域，平時或年度進行安全檢查時可多加留意。由表 4.4.3-1 可知，壩底基礎反力之動態分析值為靜態分析值 5 倍左右。由於本案分析時未考慮下游面水壓力與上游面動態水壓力作用之影響，因此壩體真實之應力分佈情形可能與本研究之分析結果有所差異，未來可將動態水壓力納入 ANSYS 分析模型，以求得壩體更

真實之受力情況，俾便進行更精確之壩體結構安全評估。此外，有關壩體之混凝土元素可嘗試採用 solid65 進行模擬，且設定混凝土之應力與應變關係，期使分析所得之應力結果符合混凝土材質之特性。



第五章 結論與建議

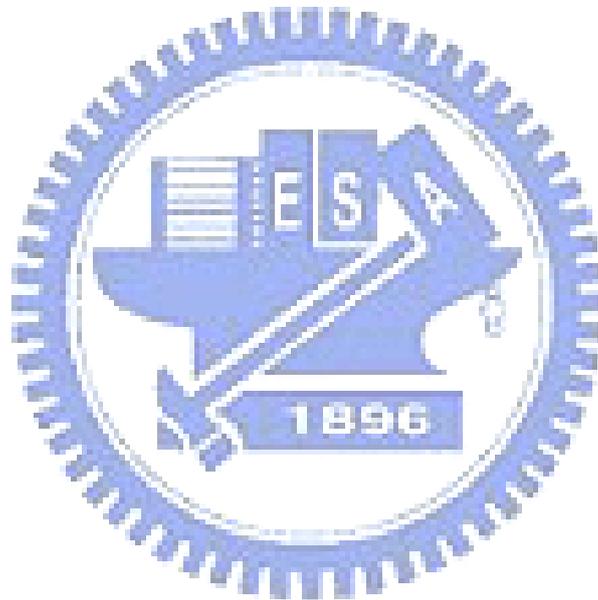
本研究利用翡翠水庫強震儀實測之地震記錄進行 ARX 「多重輸入-多重輸出」之結構系統識別，主要探討拱壩自然振動頻率與蓄水位高度及淤泥深度之關係。此外，本研究亦利用有限元素軟體 ANSYS 建構翡翠水庫之有限元素分析模型，並針對翡翠水庫進行靜力及動態反應分析，期能初步掌握混凝土拱壩之建模方式與進行動力歷時分析，以作為後續混凝土拱壩之詳細動力分析與安全評估之基礎。

茲根據本文之分析結果歸納結論如下：

1. 翡翠水庫之識別結果顯示，拱壩之振動頻率有隨著蓄水位愈高而降低之趨勢，分析結果之趨勢合理，且拱壩之振動頻率與相關文獻所得之結果差異不大(10%之內)，顯示壩體之振動特性於歷次地震事件並無顯著的變化，拱壩應無結構性的損傷。
2. 拱壩之振動頻率與淤泥之深度有關，拱壩之振動頻率有隨著淤泥深度增加而降低之趨勢。
3. 由 ANSYS 之靜力分析結果顯示，翡翠水庫於常態載重下，應力較大值主要集中於壩底基礎部份，平時或年度安全檢查時可針對此區域進行檢查。
4. 由 ANSYS 之動力分析結果顯示，在未考慮下游面水壓力與上游面動態水壓力作用之條件下，翡翠水庫於地震力作用時之壩底基礎反力較靜力作用時增加 5 倍以上，尤以拉應力增幅最大。此外，壩身於地震力作用下，內部應力之增幅則較壩底(基)小。

針對本研究之分析結果與心得提供建議如下：

本文針對翡翠水庫拱壩所建構之 ANSYS 有限元素分析模型並未考慮上游面動態水壓力與拱壩結構相互作用之影響，因此壩體真實之應力分佈情形可能與本研究之分析結果有所差異，未來可將動態水壓力或相關之外力納入 ANSYS 分析模型，以求得壩體真實之受力情況，俾便進行更精確之拱壩動力歷時分析與結構安全評估檢核分析。



參考文獻

- 【1】 J.Nasserzare , Y.Lei , S.Eskandari-Shiri(2000) “Computation of natural frequencies and mode shapes of arch dams as an inverse problem”
Advances in Engineering Software 31 827-836.
- 【2】 H.W.Westgaard(1993) “Water Pressure On Dams During Earthquake”
American Society of Civil Engineers.
- 【3】 A.K.Chopra(1967) “ Hydrodynamic Pressure On Dams During Earthquakes”
Journal of Engineering Mechanics Division , ASCE.
- 【4】 A.K.Chopra(1968) “ Earthquake Behavior of Reservoir-Dams System”
Journal of Engineering Mechanics Division , ASCE.
- 【5】 P.Chakrabarti , A.K.Chopra(1973) “Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction.”
Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- 【6】 C-Y Liaw , A.K.Chopra(1974) “Dynamics of Tower Surroundedb by Water.”
Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- 【7】 C-Y Liaw , A.K.Chopra(1975) “Earthquake Analysis of Axisymmetric Towers Partially Submerged in Water.”
Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- 【8】 蔡崇興(1980) “拱壩與水庫互制之初步數值探討” 國立台灣大學
土木工程研究所碩士論文(茅聲燾教授指導)。

- 【9】 Chin-Hsiung Loh , Tsu-Shiu Wu(1996) “Identification of Fei-Tsui arch dam from both ambient and seismic response data.” Solid Dynamics and Earthquake Engineering 15 465-483
- 【10】 蔡政任(2005) “拱壩之系統參數識別” 國立中興大學土木工程研究所碩士論文(林其璋教授、黃添坤教授、王哲夫教授指導)。
- 【11】 王彥博、卓建全(1996) “推測適應過濾法在系統識別之應用” 中華民國第三屆結構工程研討會，墾丁、台灣，pp2023-2032.
- 【12】 卓建全(1996) “非線性結構系統識別之研究” 國立交通大學土木工程研究所碩士論文(王彥博教授指導)。
- 【13】 李建良 (1998) “結構隔震控制之實驗與分析” 國立交通大學土木工程研究所碩士論文(王彥博教授指導)。
- 【14】 Chen , L.M. (1988) “Application of an alternative method including foundation effect for arch dam seismic analysis.” Proc. of 9th WCEE , Vol. 6 , Tokyo , August , 349-354.

表 3.2.1-1 強震儀規格及設置高程

測站	感震器型號	量測範圍	設置高程(m)
SD1	SV355T	±1g	162.5
SD2	SV355T	±1g	94.9
SD3	SV355T	±1g	57.5
SD4	SV355T	±1g	97.5
SD5	SV355T	±1g	162.5
SD6	SV355T	±1g	115
SD7	SV355T	±1g	115
SD8	SV355T	±1g	115
SDA	SV355T	±1g	151
SDB	SV355T	±1g	151
SDC	SV355T	±1g	151

表 3.2.2-1 翡翠水庫各地震儀之地震加速度峰值

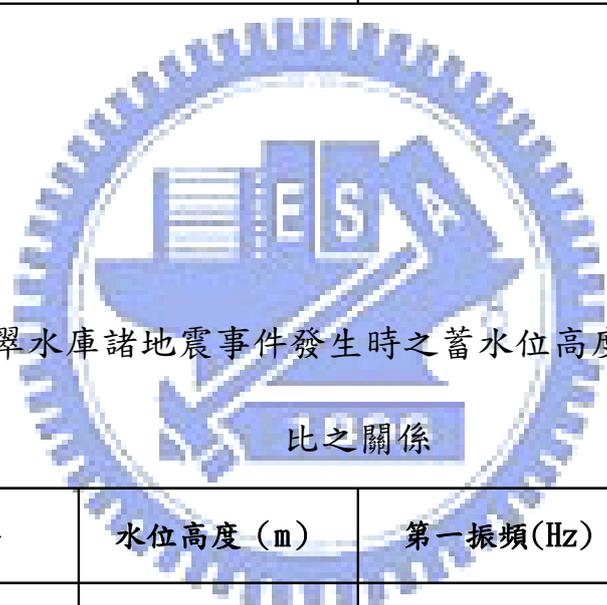
測 地 震	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SDA	SDB	SDC
2002/03/31	28.2	22.5	15.1	20.1	19.7	71.8	94.7	79.4
2002/05/15	18.7	12.3	16.5	14.8	8.7	52.7	77.7	43.8
2002/09/07	4.9	3.9	3.9	4.0	3.2	15.6	22.4	21.5
2002/11/10	3.4	2.8	2.5	3.0	2.8	9.5	13.5	8.2

Unit:gal

表 3.2.2-2 翡翠水庫諸地震事件發生時之蓄水位高度對應表

地震事件	水位高度(m)
2002/03/31	144.29
2002/05/15	127.25
2002/09/07	145.13
2002/11/10	150.75

表 3.2.2-3 翡翠水庫諸地震事件發生時之蓄水位高度與自然頻率、阻尼



地震事件	水位高度 (m)	第一振頻(Hz)	阻尼比
2002/05/15	127.25	3.6	7.0%
2002/03/31	144.29	2.9	6.7%
2002/09/07	145.13	2.8	5.6%
2002/11/10	150.75	2.6	3.7%

表 3.2.3-1 翡翠水庫各地震儀之地震加速度峰值

測 站 地 震	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SDA	SDB	SDC
2000/09/10	5.7	5.5	3.6	3.7	2.9	19.0	29.3	27.0
2001/12/18	5.2	3.8	3.6	3.7	2.8	13.4	19.1	15.7
2002/01/08	0.9	1.0	1.1	1.3	1.3	7.0	16.0	5.9
2003/12/10	1.6	1.2	1.7	1.3	1.4	7.5	8.8	5.9
2004/05/09	3.5	2.2	1.8	2.4	2.4	9.8	10.4	8.6

Unit:gal

表 3.2.3-2 翡翠水庫諸地震事件發生時之蓄水位高度與對應之淤泥高度

地震事件	水位高度(m)	淤泥高度(m)
2000/09/10	160.33	87.64
2001/12/18	159.94	88.89
2002/01/08	160.28	90.49
2003/12/10	160.78	87.98
2004/05/09	159.71	88.55

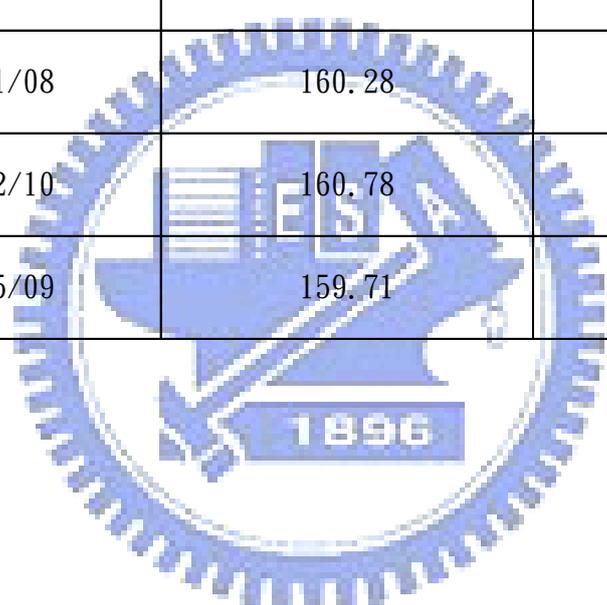


表 3.2.3-3 水庫淤泥高度與自然振動頻率及阻尼比之關係

地震 項目	2000/09/10	2003/12/10	2004/05/09	2001/12/18	2002/01/08
淤泥高度 (m)	87.64	87.98	88.55	88.89	90.49
第一振頻 (Hz)	2.64	2.54	2.49	2.40	2.35
阻尼比(%)	4.2	3.6	2.6	2.3	1.8
第二振頻 (Hz)	3.8	3.70	3.62	3.51	3.40
阻尼比(%)	11.6	9.4	9.3	9.2	8.2

表 4.3.5-1 翡翠水庫結構模型材料參數

	岩盤部分	壩體部分
元素種類	SOLID45	SOLID45
楊氏係數	2.9E10 N/m ²	2.85E10 N/m ²
密度	2600 kg/m ³	2400 kg/m ³
波松比	0.3	0.167
網格邊長大小(m)	100	60

表 4.4.1-1 翡翠水庫 ANSYS 模型振態頻率與文獻【14】之比較

	本研究(利用 ANSYS)	文獻【14】(利用 SAPIV)
第一振頻(Hz)	2.02	2.09
第二振頻(Hz)	2.21	2.15
第三振頻(Hz)	2.32	2.83

表 4.4.2.1-1 設計用靜止土壓係數參考值

土壤型式	K_0
正常壓密土壤	$1 - \sin \varphi$
人工夯實粘土	1.0-2.0
機械夯實粘土	2.0-6.0
過壓密粘土	1.0-4.0
疏鬆砂	0.5
夯實砂	1.0-1.5

表 4.4.2.1-2 發生主動及被動土壓狀態需要之移動量

土壤類別	壓力	移動型式	需要移動量
砂 土	主 動	平行移動	0.001H
		旋 轉	0.001H
	被 動	平行移動	0.05H
		旋 轉	0.1H
粘 土	主 動	平行移動	0.004H
		旋 轉	0.004H
	被 動		—

表 4.4.2.2-1 壩體應力和 XY 平面主應力之最大值及最小值統計表

位移		XY 平面之主應力	
X 方向最大值	Y 方向最大值	最大值	最小值
0.006533(m)	0.001028(m)	1.40E+06(Pa)	-94540(Pa)
發生節點	發生節點	發生節點	發生節點
141	97	44	32
應力			
X 方向最大值	X 方向最小值	Y 方向最大值	Y 方向最小值
1.45E+05(Pa)	-1.60E+05(Pa)	1.43E+06(Pa)	-1.36E+06(Pa)
發生節點	發生節點	發生節點	發生節點
23	32	44	27

表 4.4.3-1 靜力及動力分析比較表

—	—	靜力	動力(t=30(sec))
位移(中央壩頂)	X 向位移(max)(mm)	6.5	19.3
	Y 向位移(max)(mm)	1.1	1.4
壩底基礎反力	X 向壓應力(max)(MPa)	12.8	84.3
	Y 向壓應力(max)(MPa)	23.3	86.3
	Y 向拉應力(max)(MPa)	7.4	40
壩身應力	X 向壓應力(max)(MPa)	0.16	0.2
	X 向拉應力(max)(MPa)	0.145	0.2
	Y 向壓應力(max)(MPa)	1.36	1.74
	Y 向拉應力(max)(MPa)	1.43	1.88
最大主應力	XY 平面主應力(壓應力)(MPa)	0.09	0.1
	XY 平面主應力(壓應力)(MPa)	1.4	1.88



圖 3.1-1 翡翠水庫之地理位置示意圖

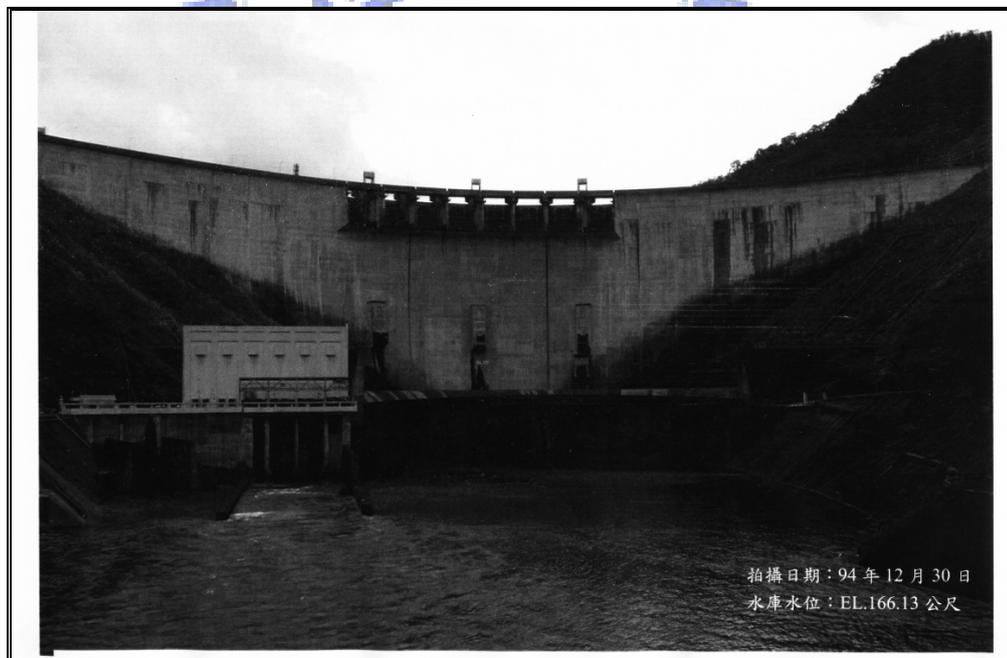


圖 3.1-2 翡翠水庫拱壩下游照片

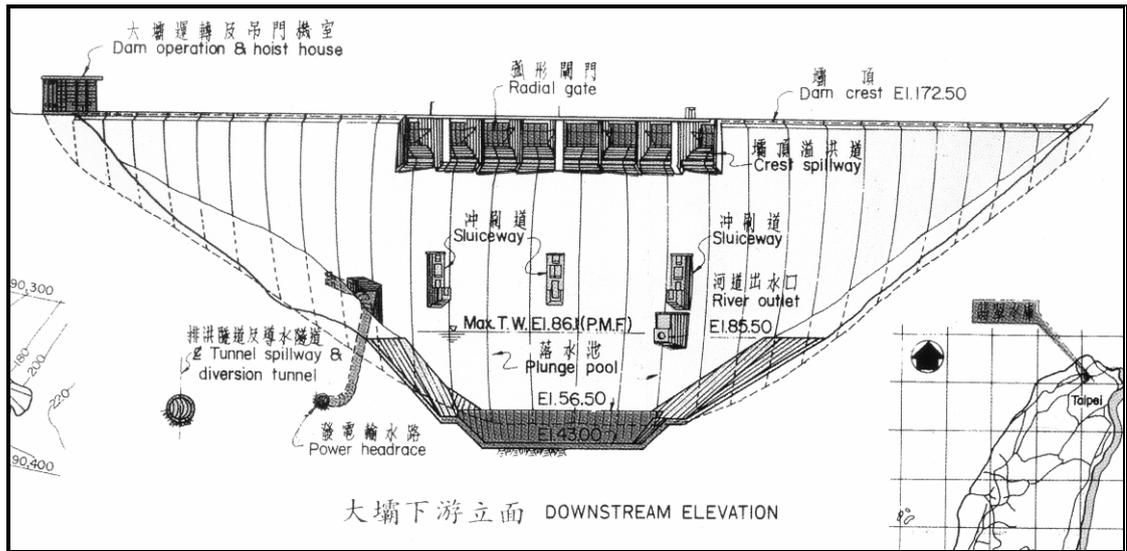


圖 3.1-3(a) 翡翠水庫下游面之立面圖

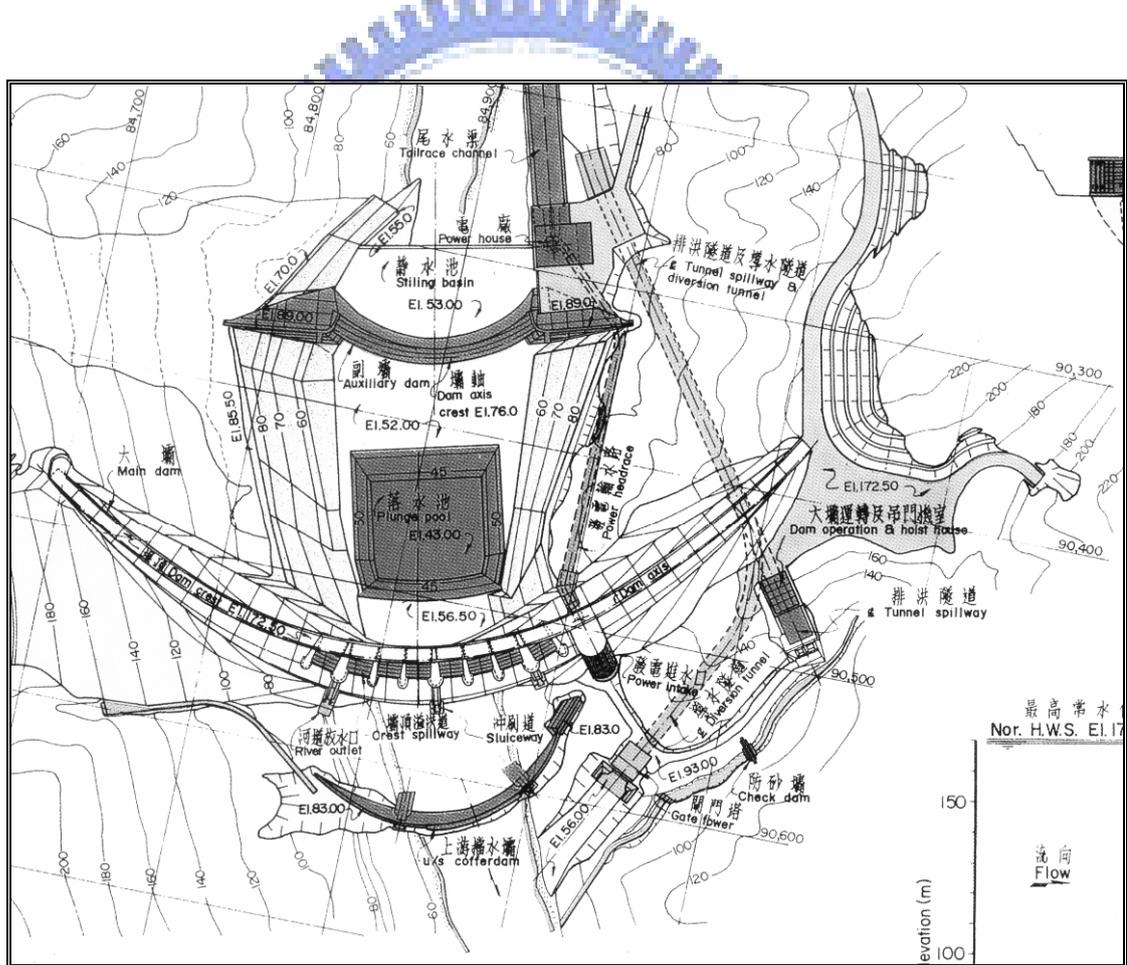


圖 3.1-3(b) 翡翠水庫之上視圖

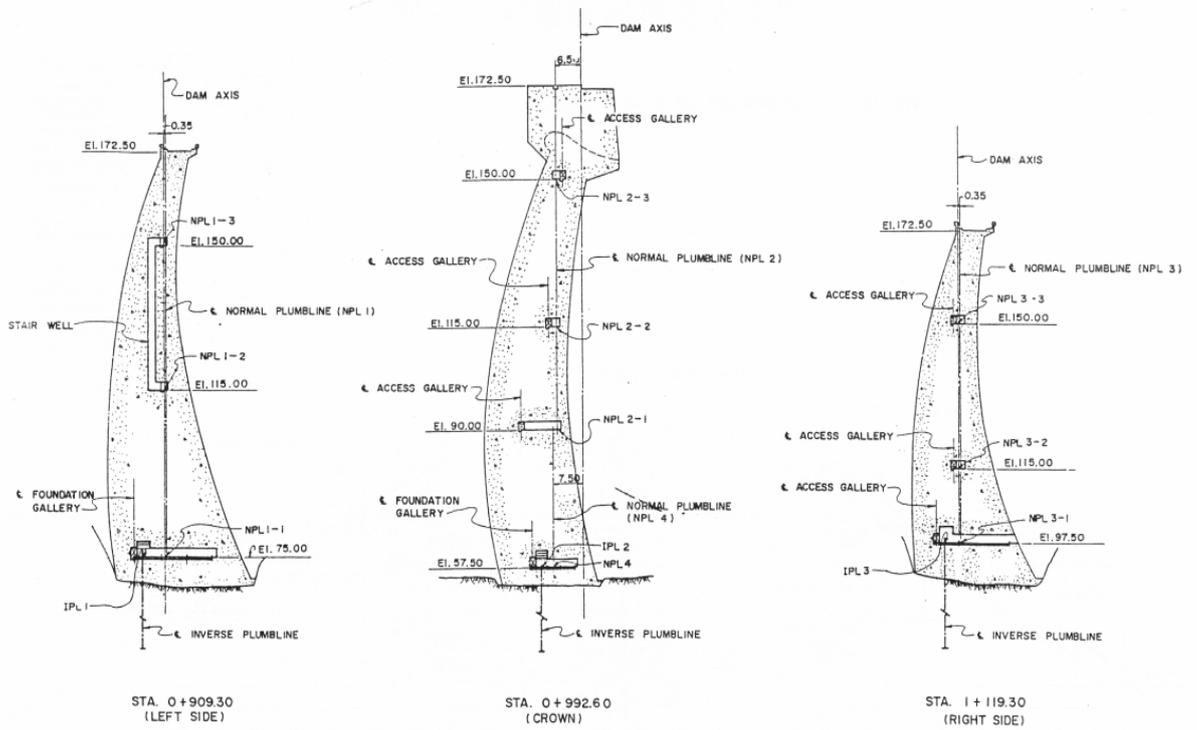


圖 3.1-3(c) 翡翠水庫之側視圖



圖 3.1-4 強震儀及資料擷取系統

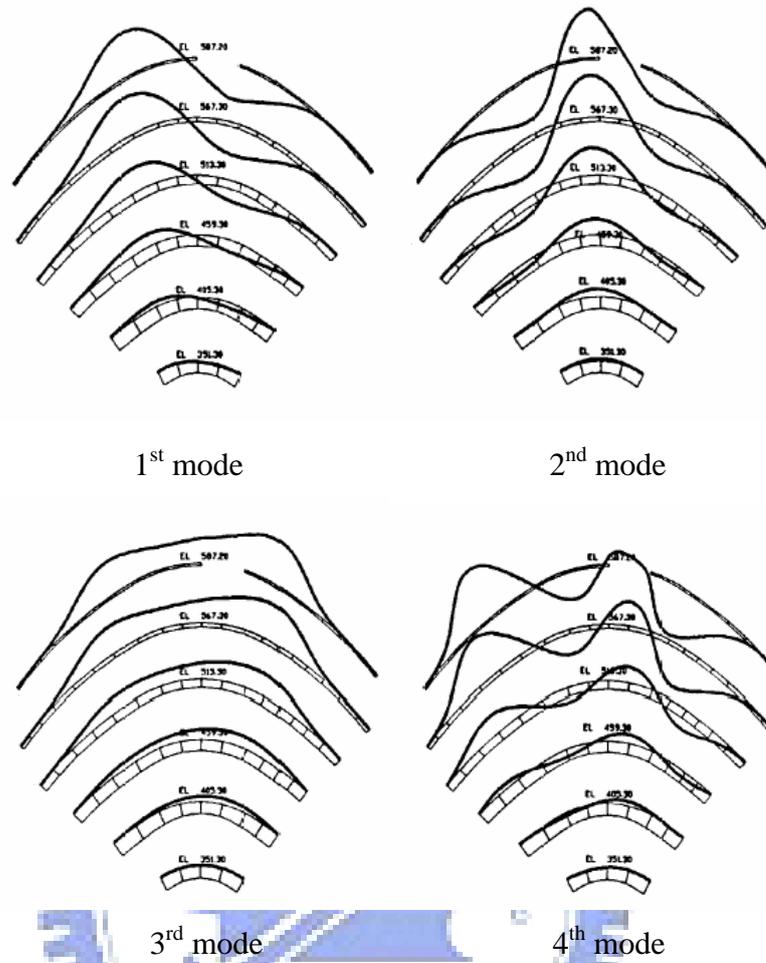


圖 3.1-5 拱壩典型之振動模態示意圖

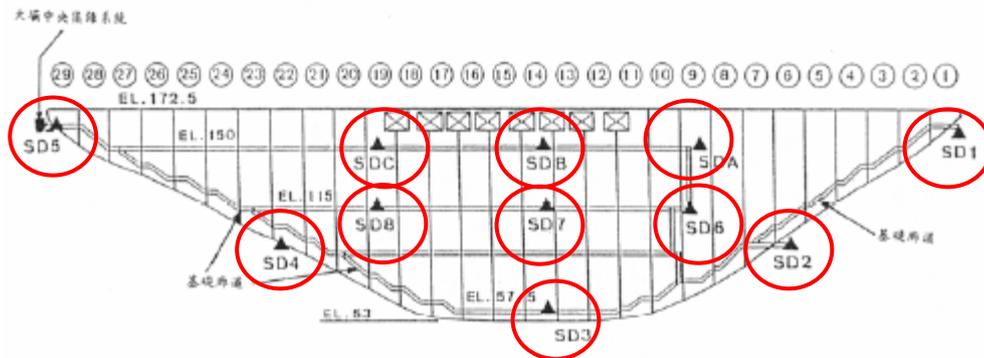


圖 3.2.1-1 翡翠水庫大壩強震儀佈設位置

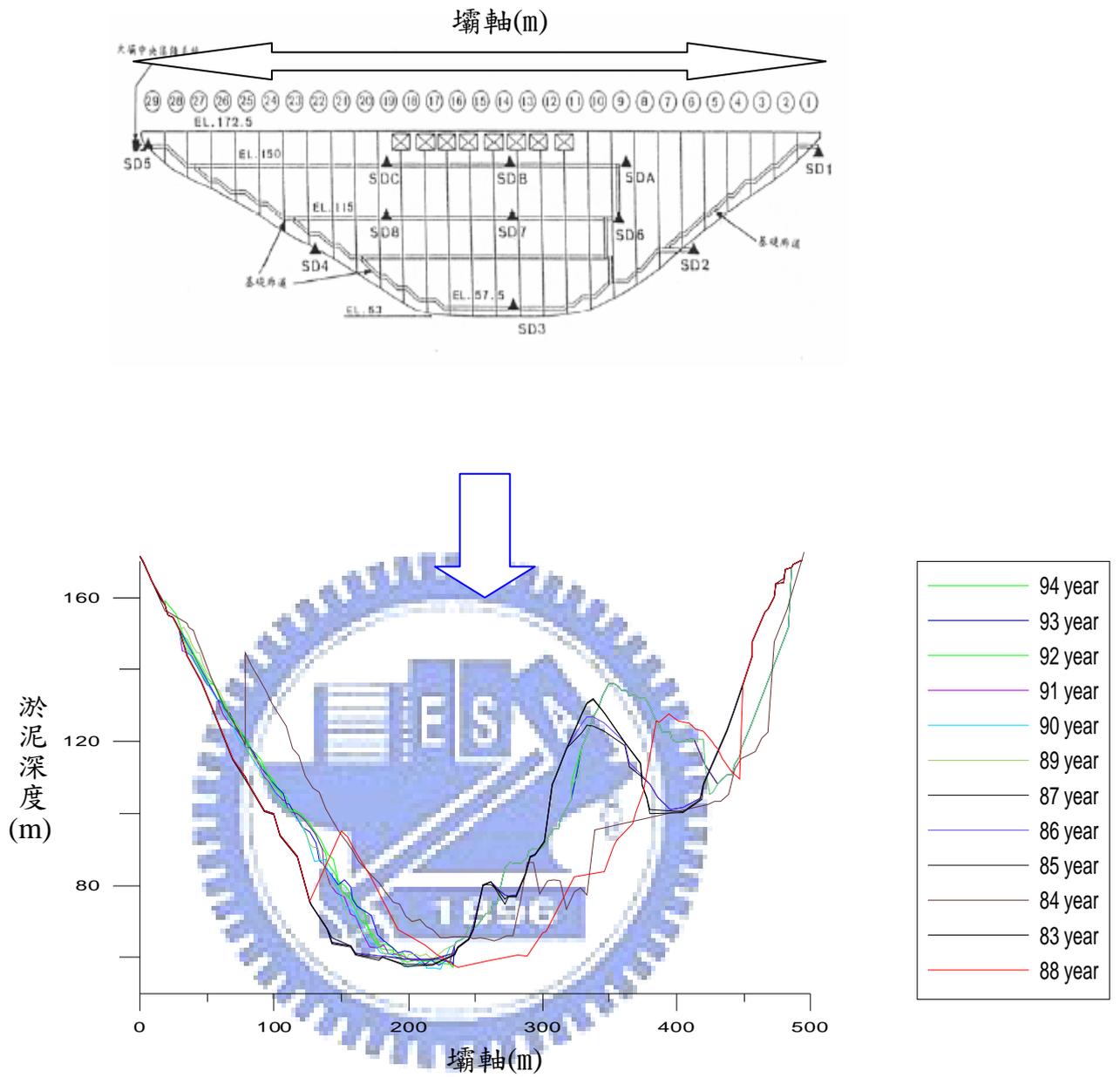


圖 3.2.2-1 歷年淤泥深度

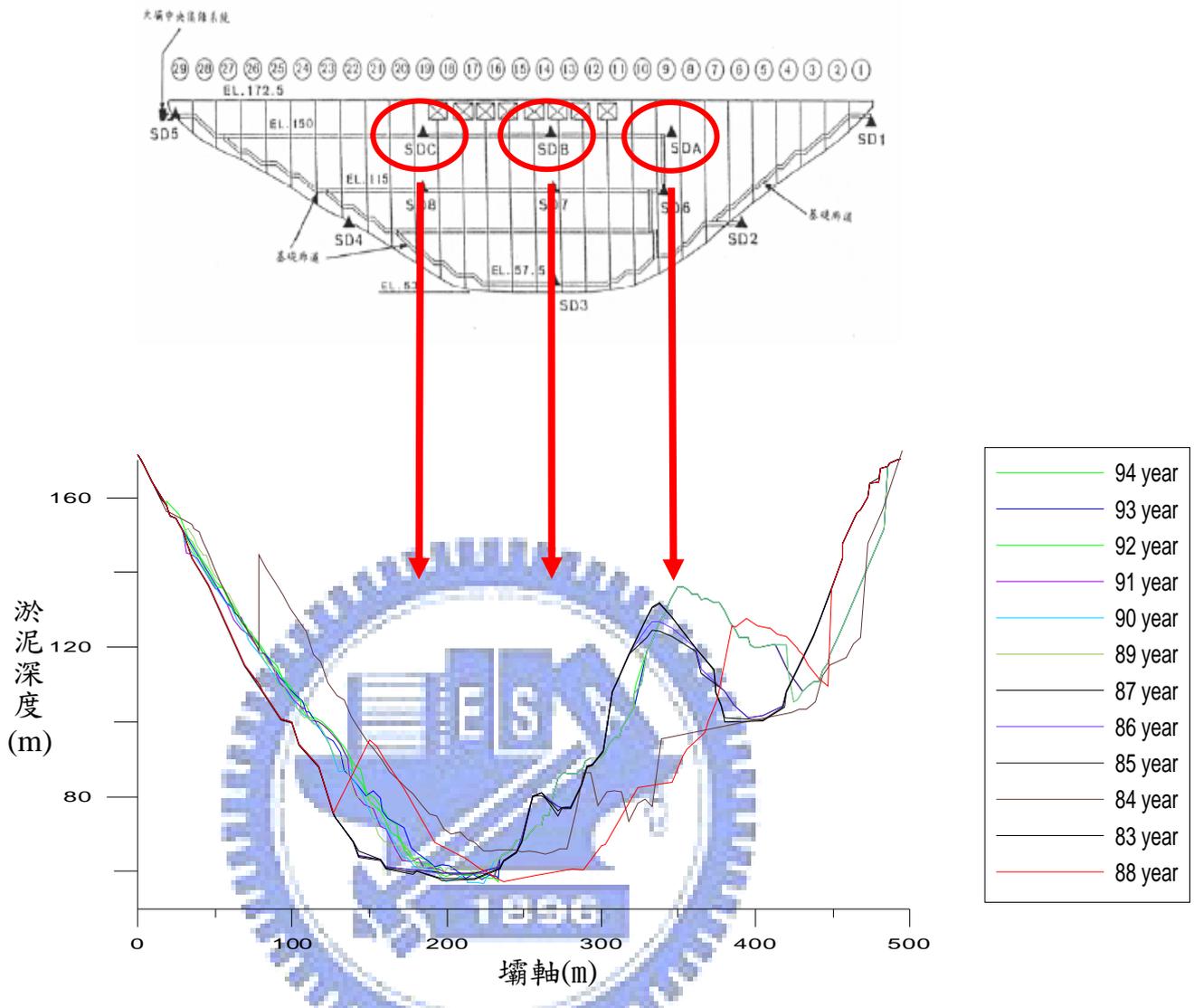


圖 3.2.2-2 決定淤泥深度之示意圖

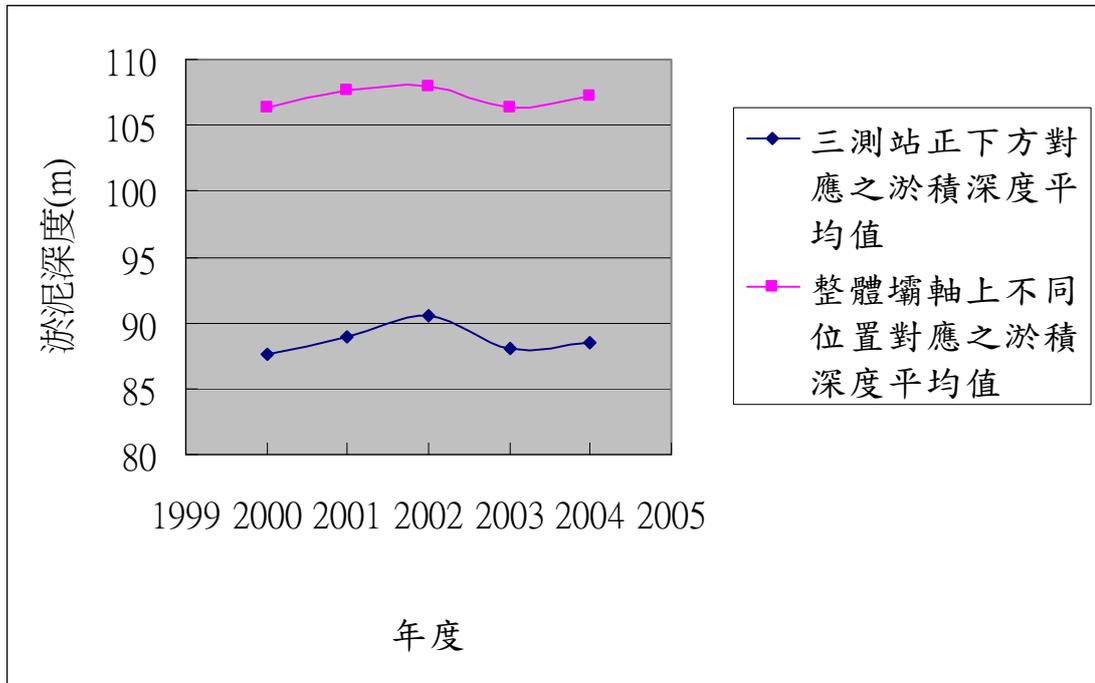


圖 3.2.2-3 淤泥深度之比較圖

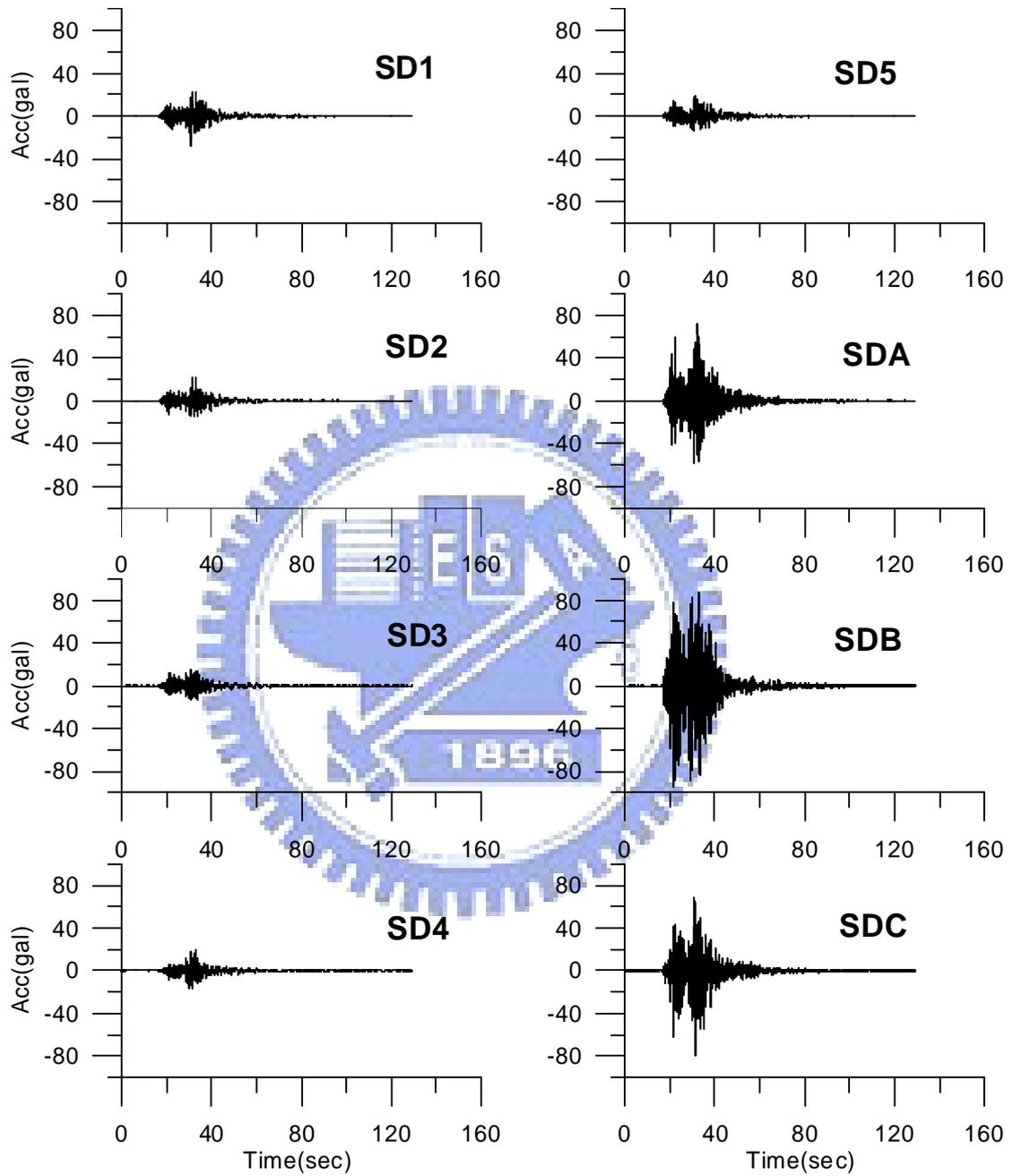


圖 3.2.2-4(a)2002 年 03/31 地震加速度歷時曲線(上下游向)

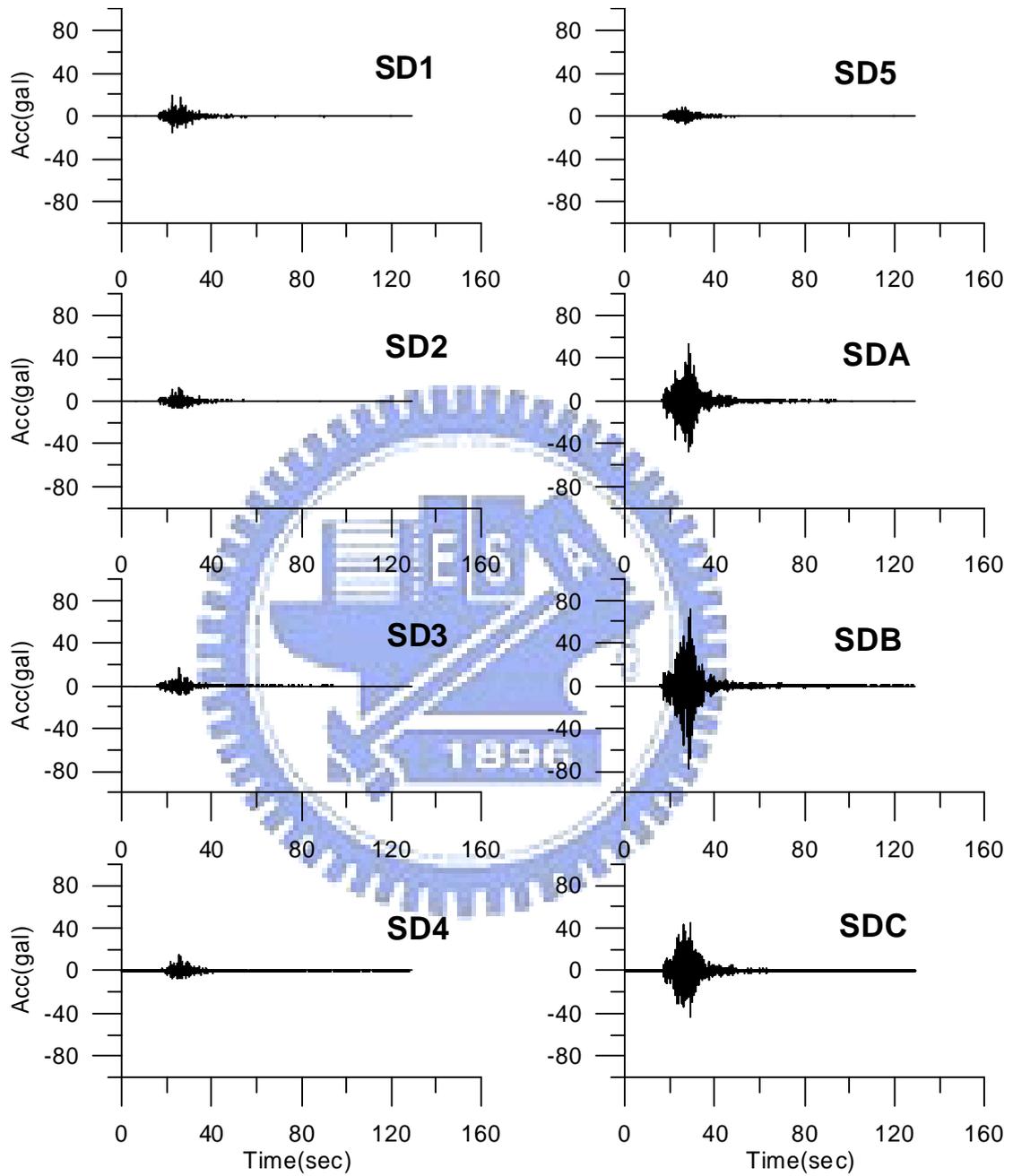


圖 3.2.2-4(b)2002 年 05/15 地震加速度歷時曲線圖(上下游向)

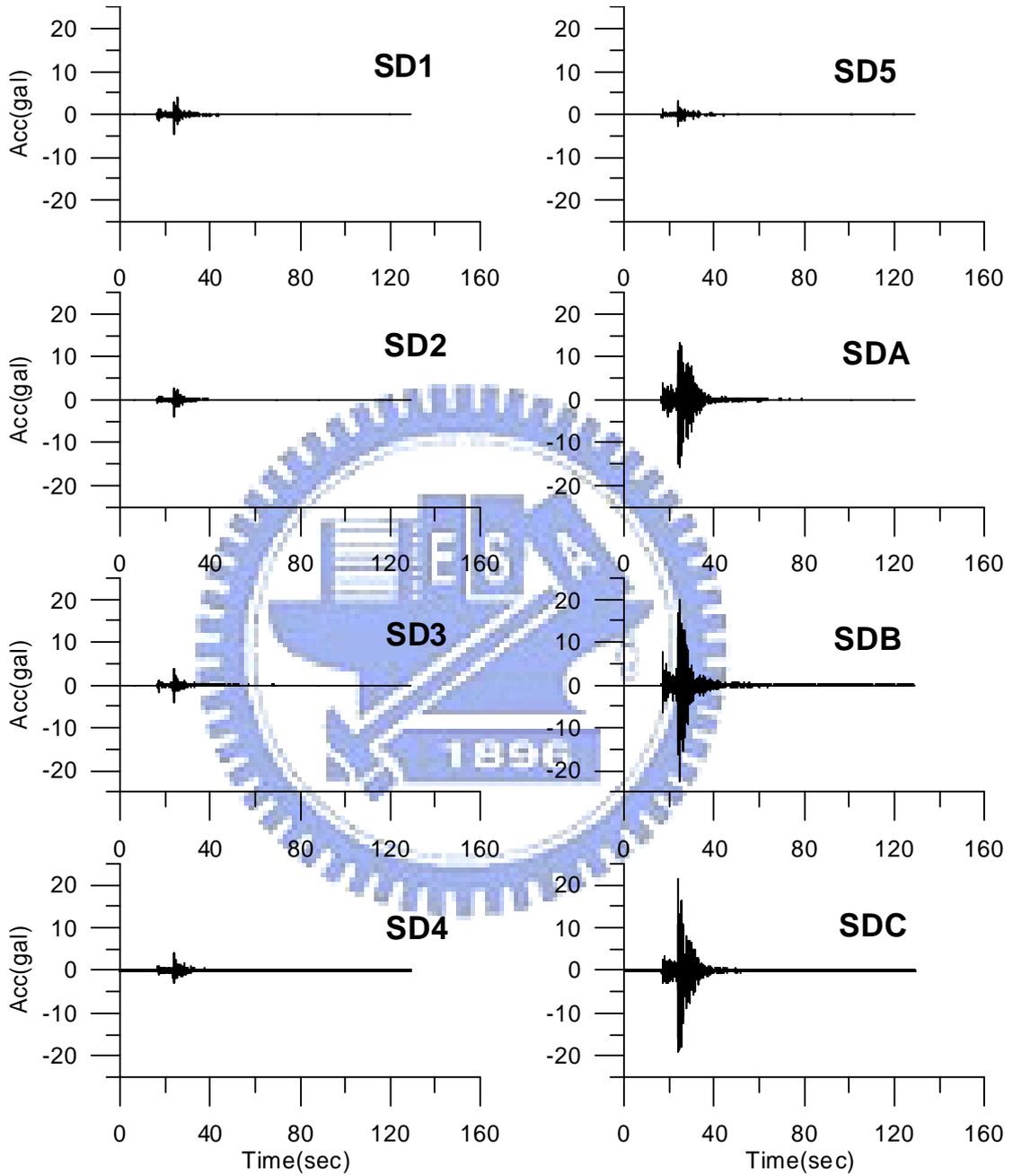


圖 3.2.2-4(c)2002 年 09/07 地震加速度歷時曲線圖(上下游向)

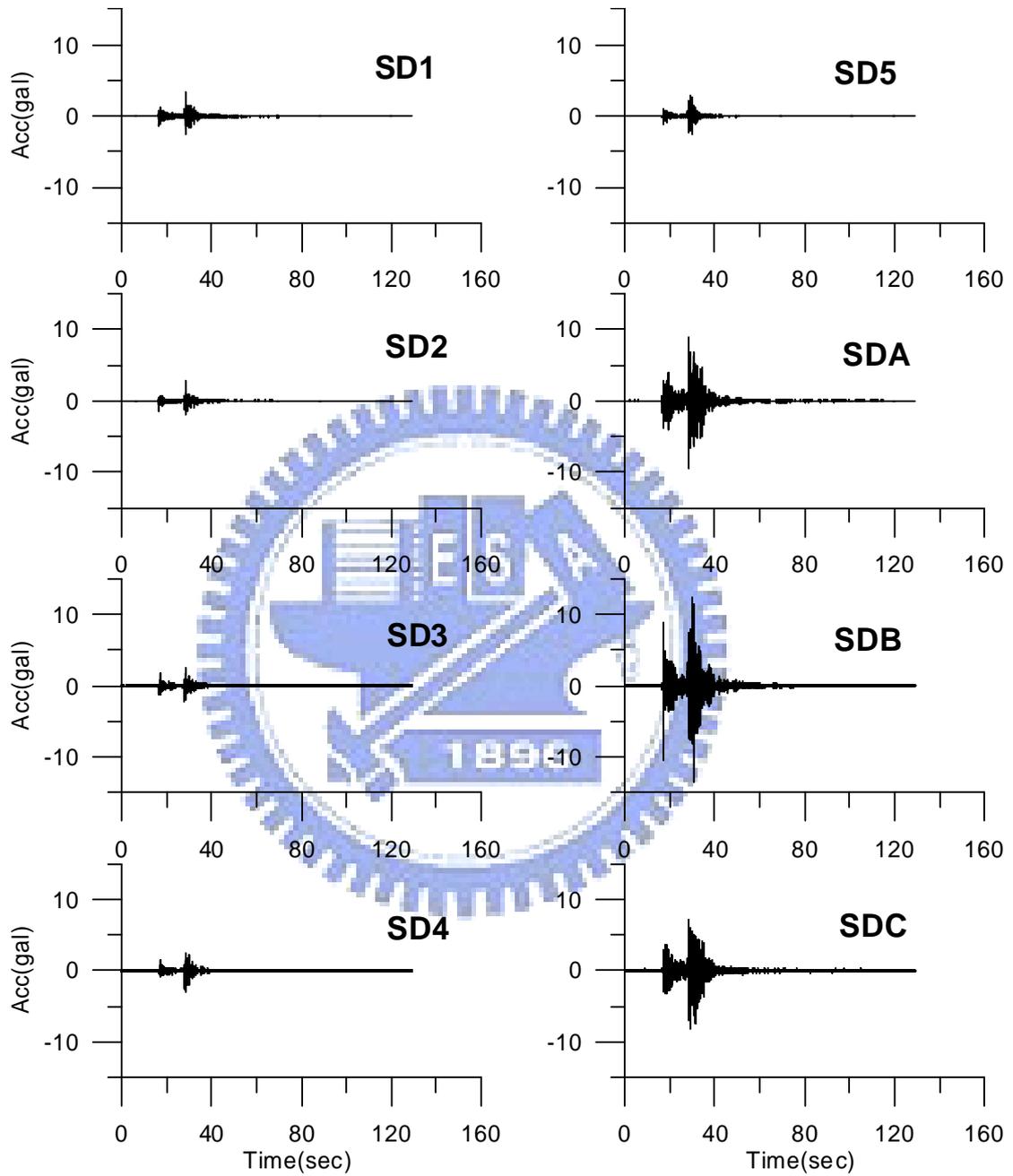


圖 3.2.2-4(d)2002 年 11/10 地震加速度歷時曲線圖(上下游向)

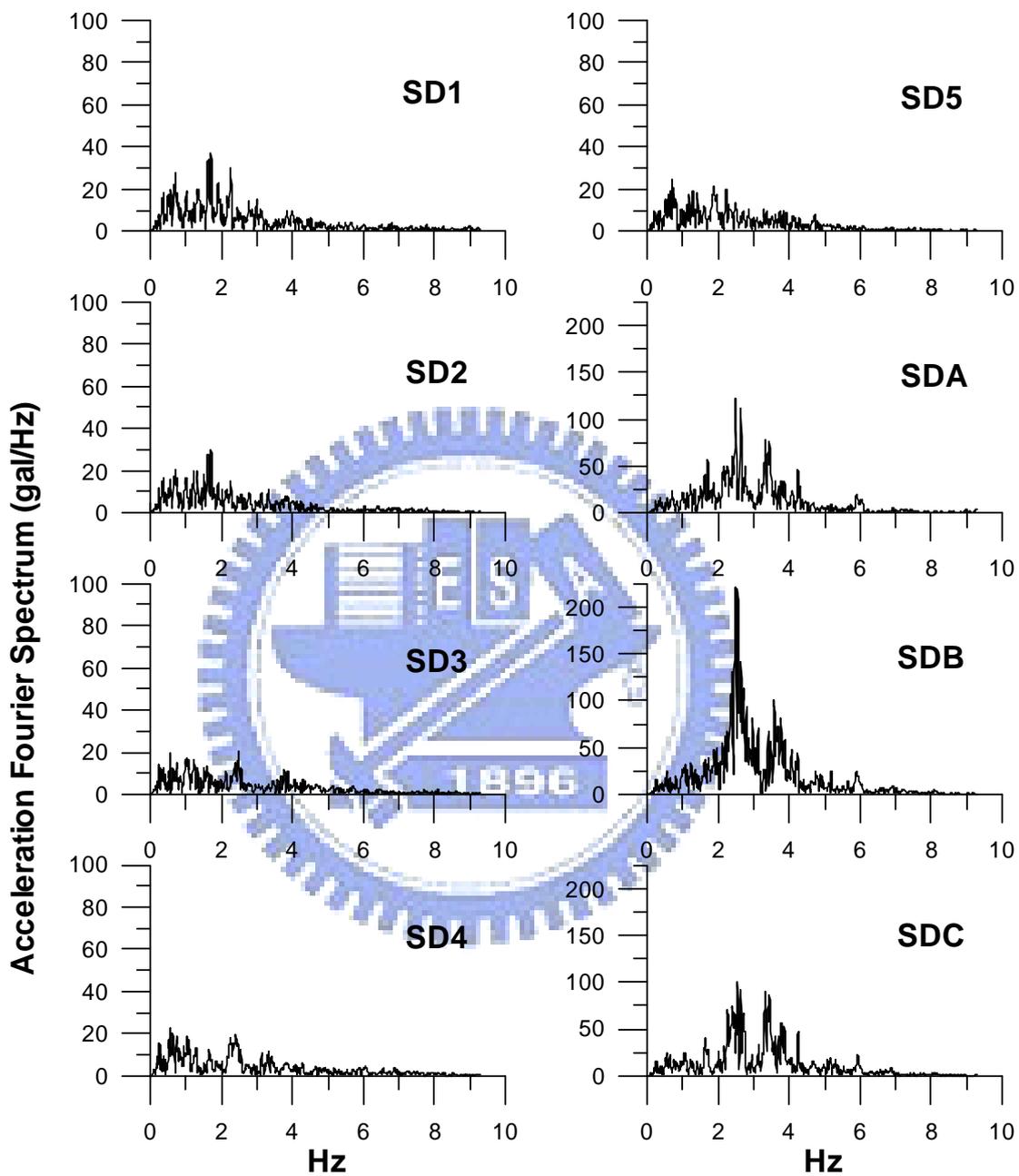


圖 3.2.2-5(a)2002 年 03/31 地震各測站傅氏頻譜(上下游向)

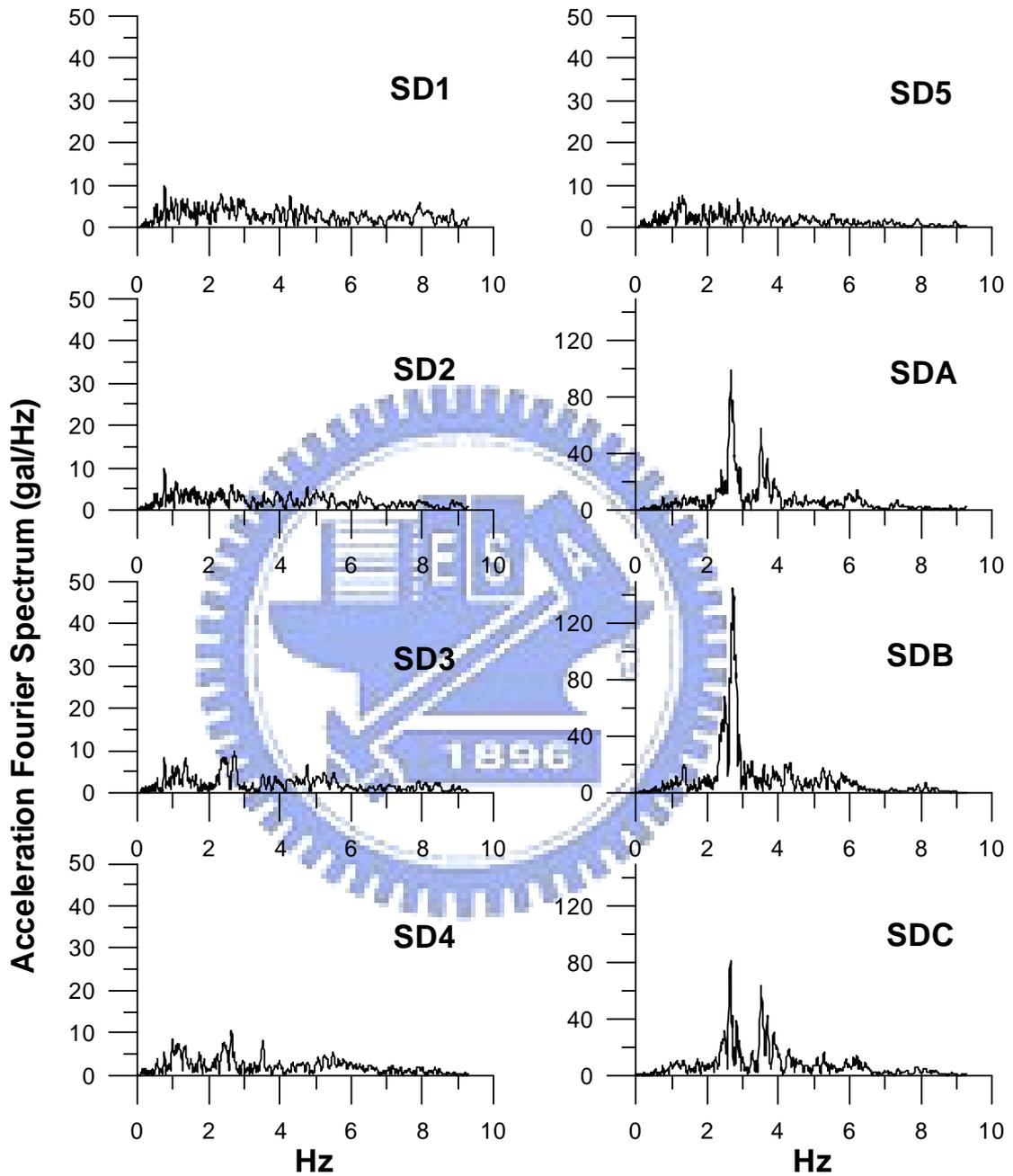


圖 3.2.2-5(b)2002 年 05/15 地震各測站傅氏頻譜(上下游向)

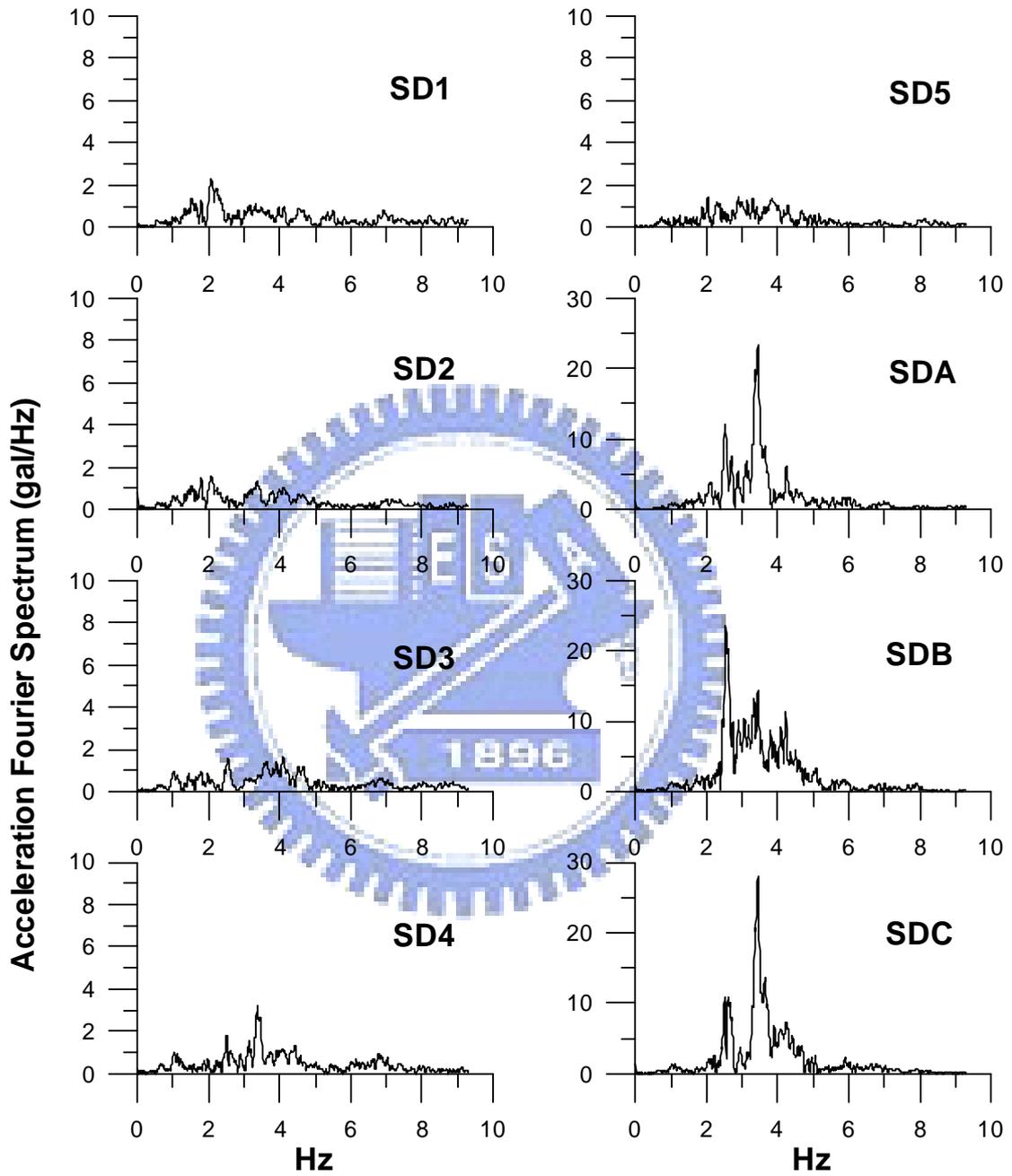


圖 3.2.2-5(c)2002 年 09/07 地震各測站傅氏頻譜(上下游向)

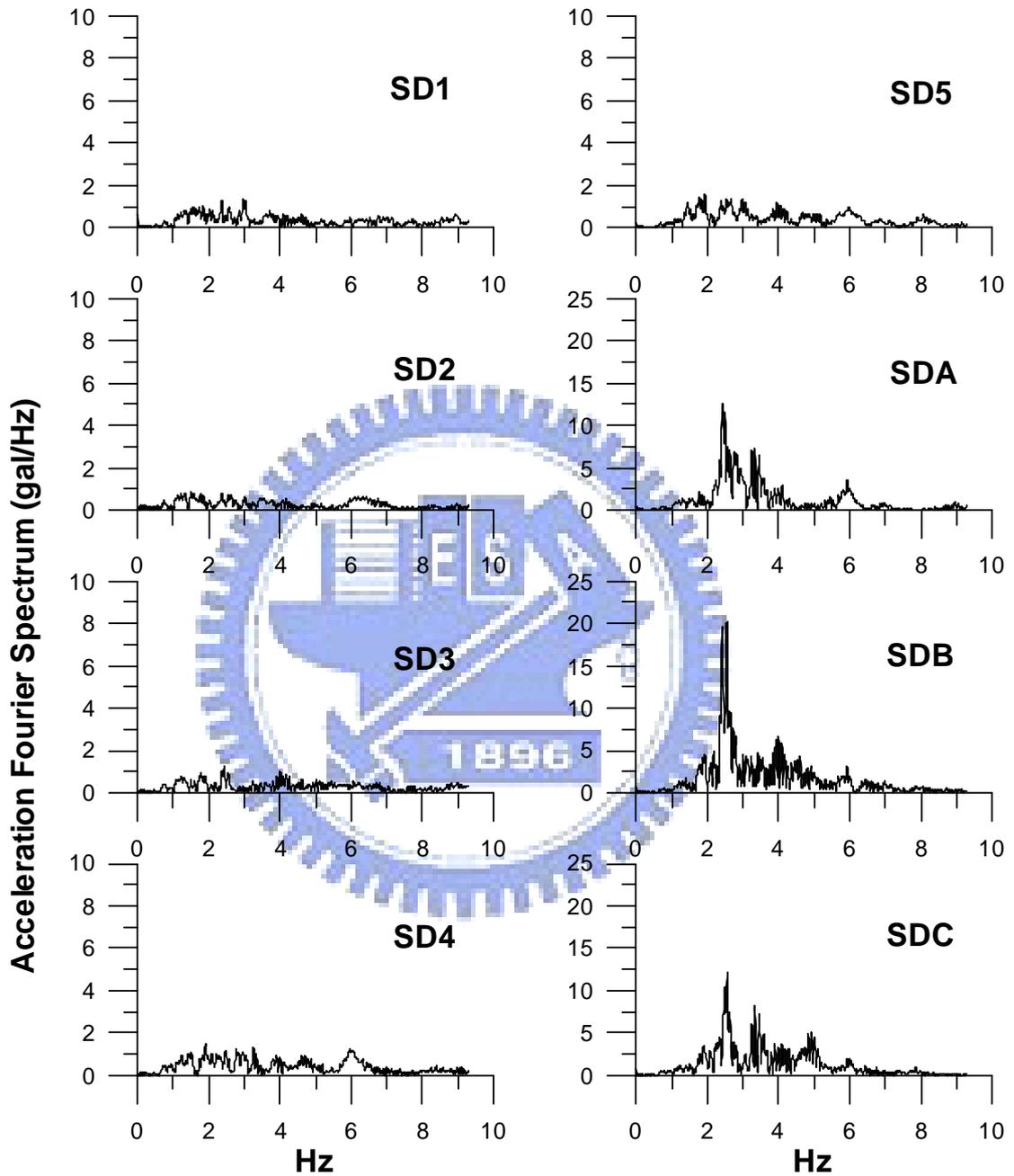


圖 3.2.2-5(d)2002 年 11/10 地震各測站傅氏頻譜(上下游向)

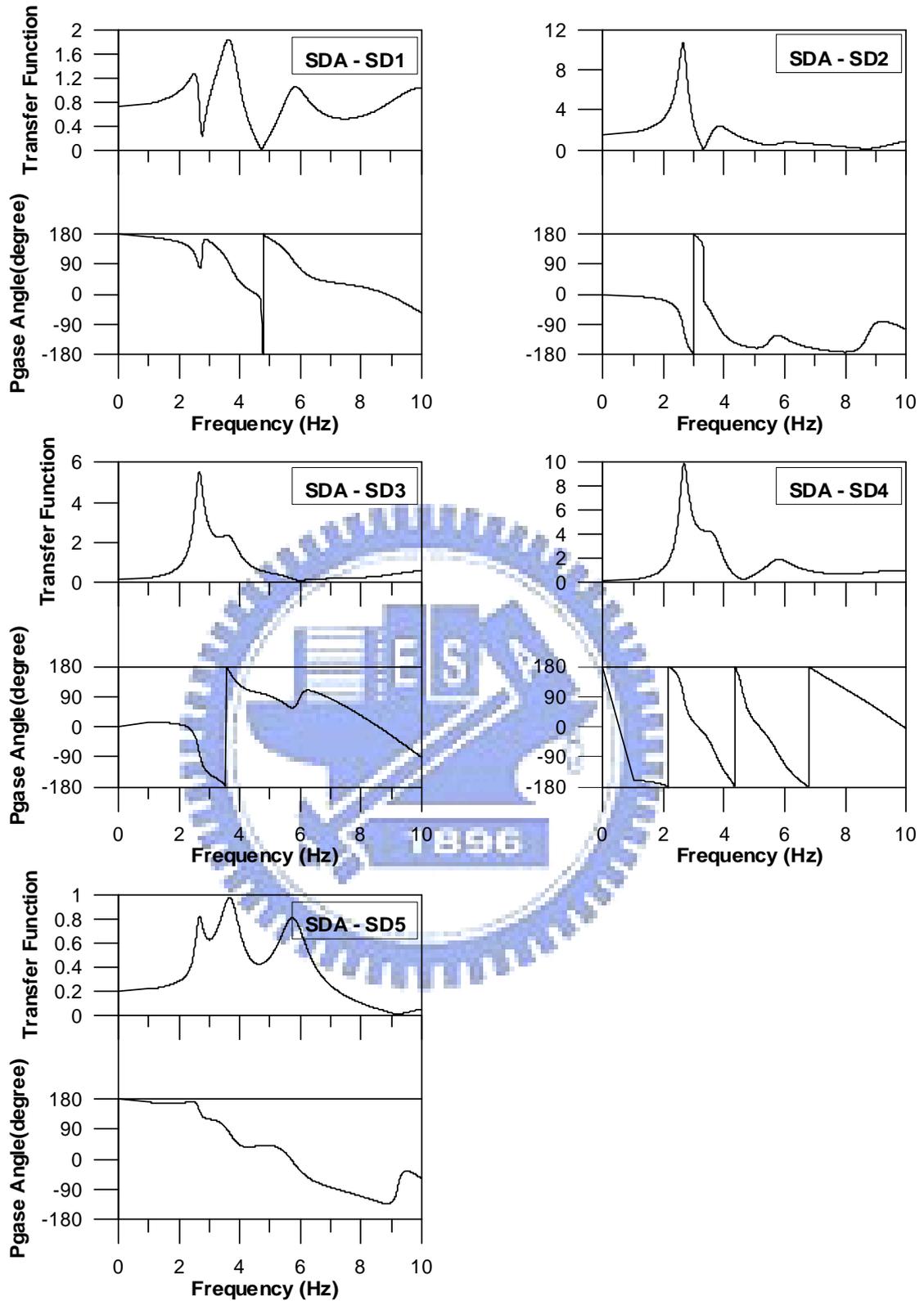


圖 3.2.2-6(a)2002 年 03/31 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

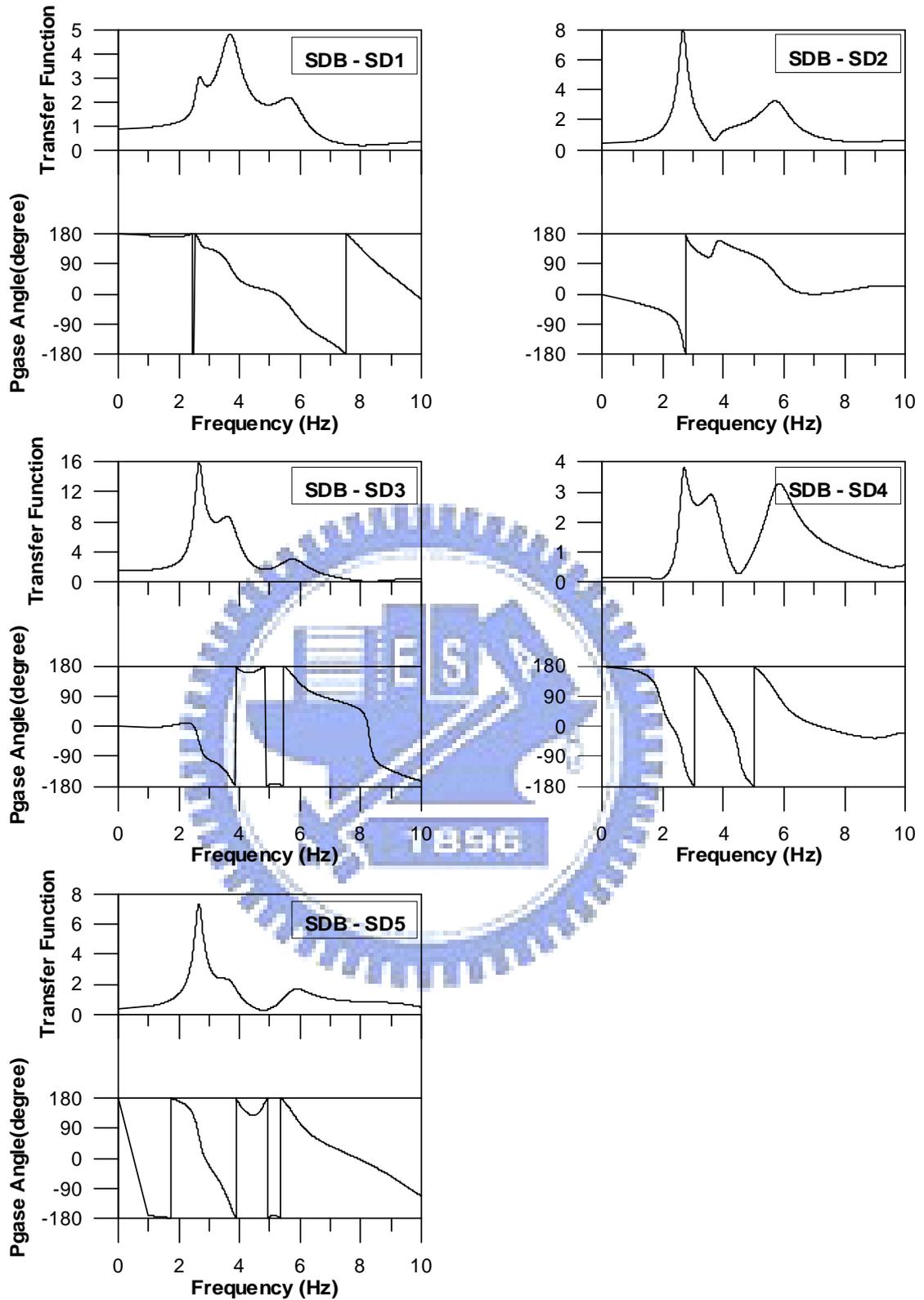


圖 3.2.2-6(b)2002 年 03/31 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

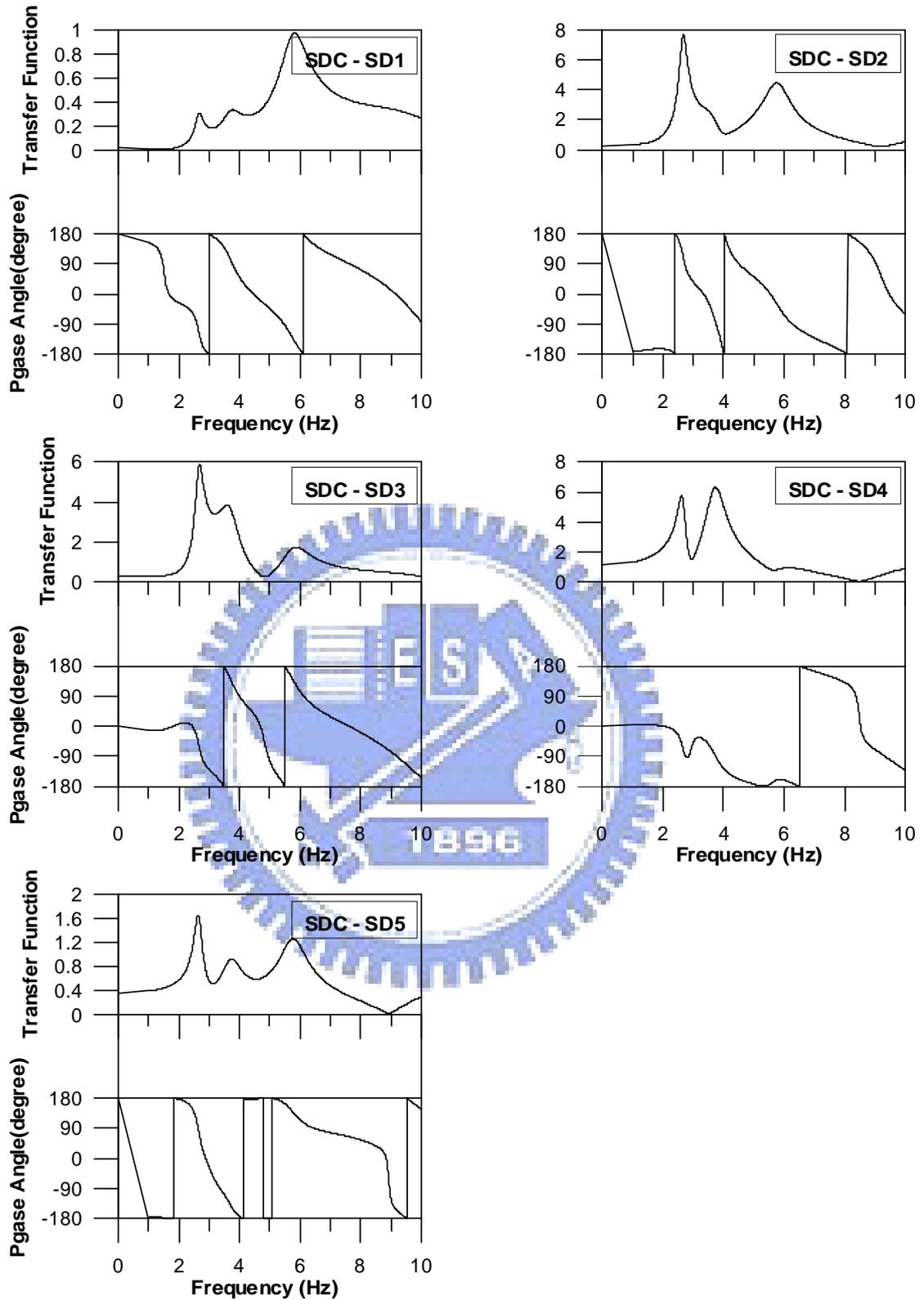


圖 3.2.2-6(c) 2002 年 03/31 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

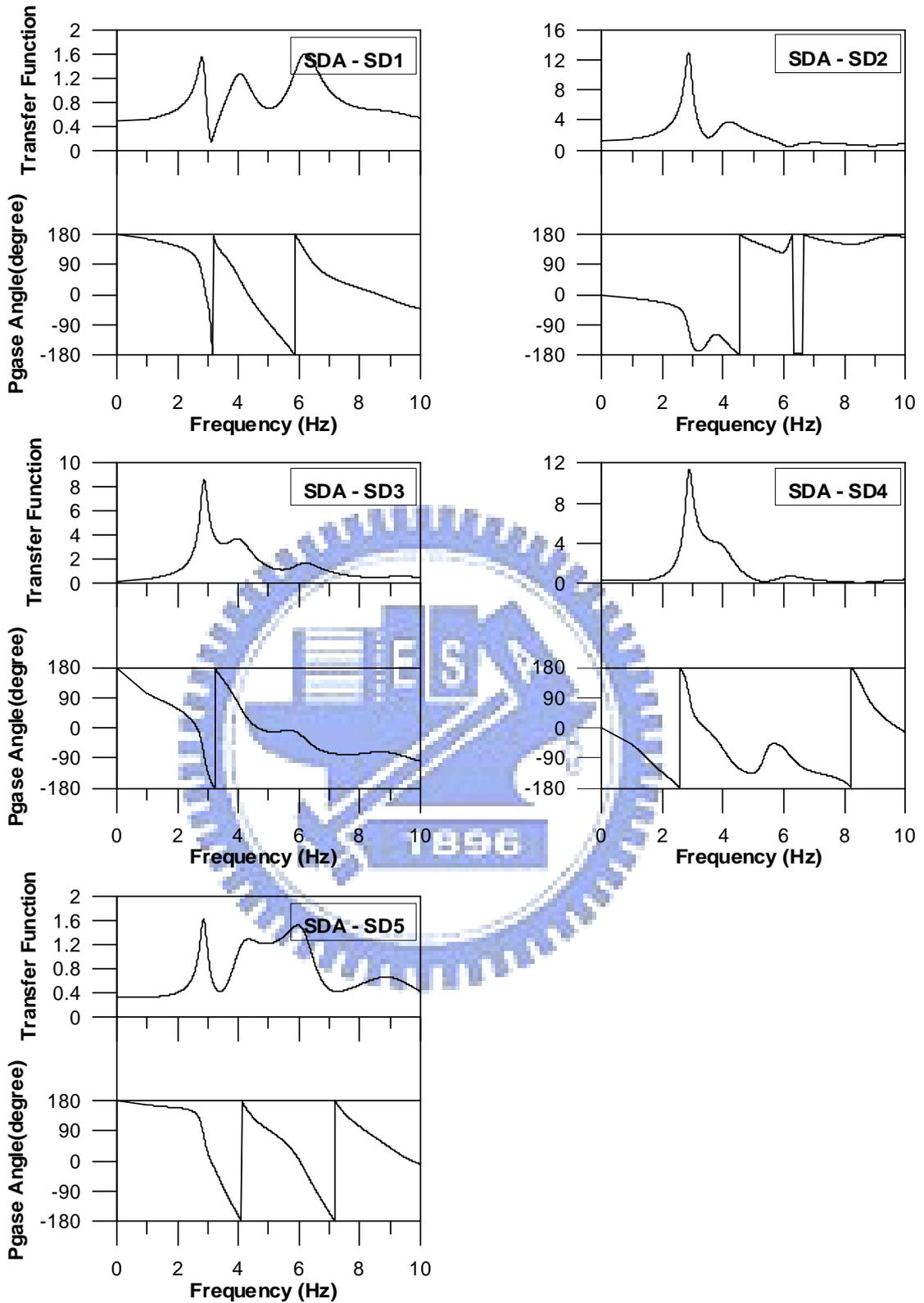


圖 3.2.2-7(a)2002 年 05/15 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

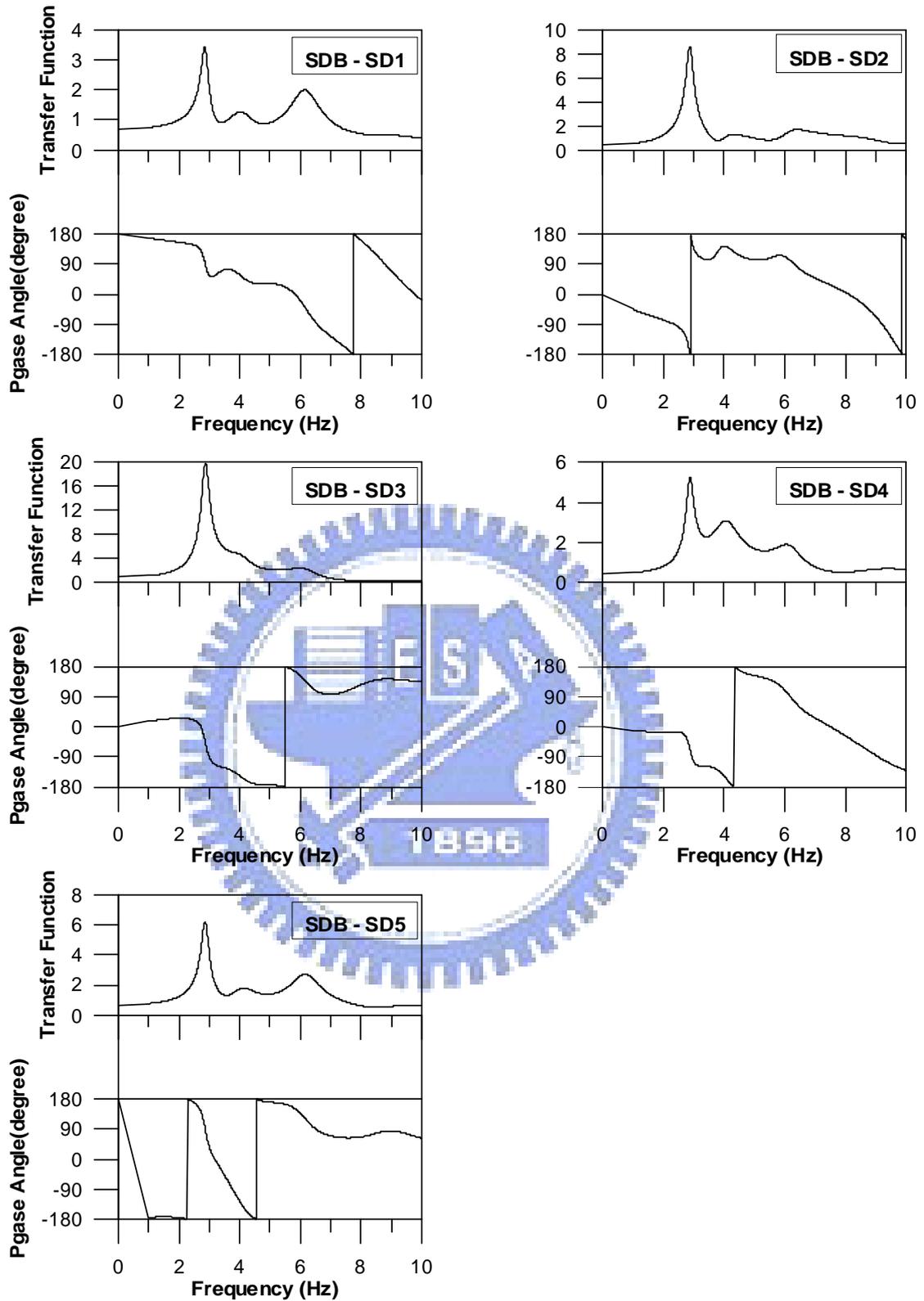


圖 3.2.2-7(b)2002 年 05/15 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

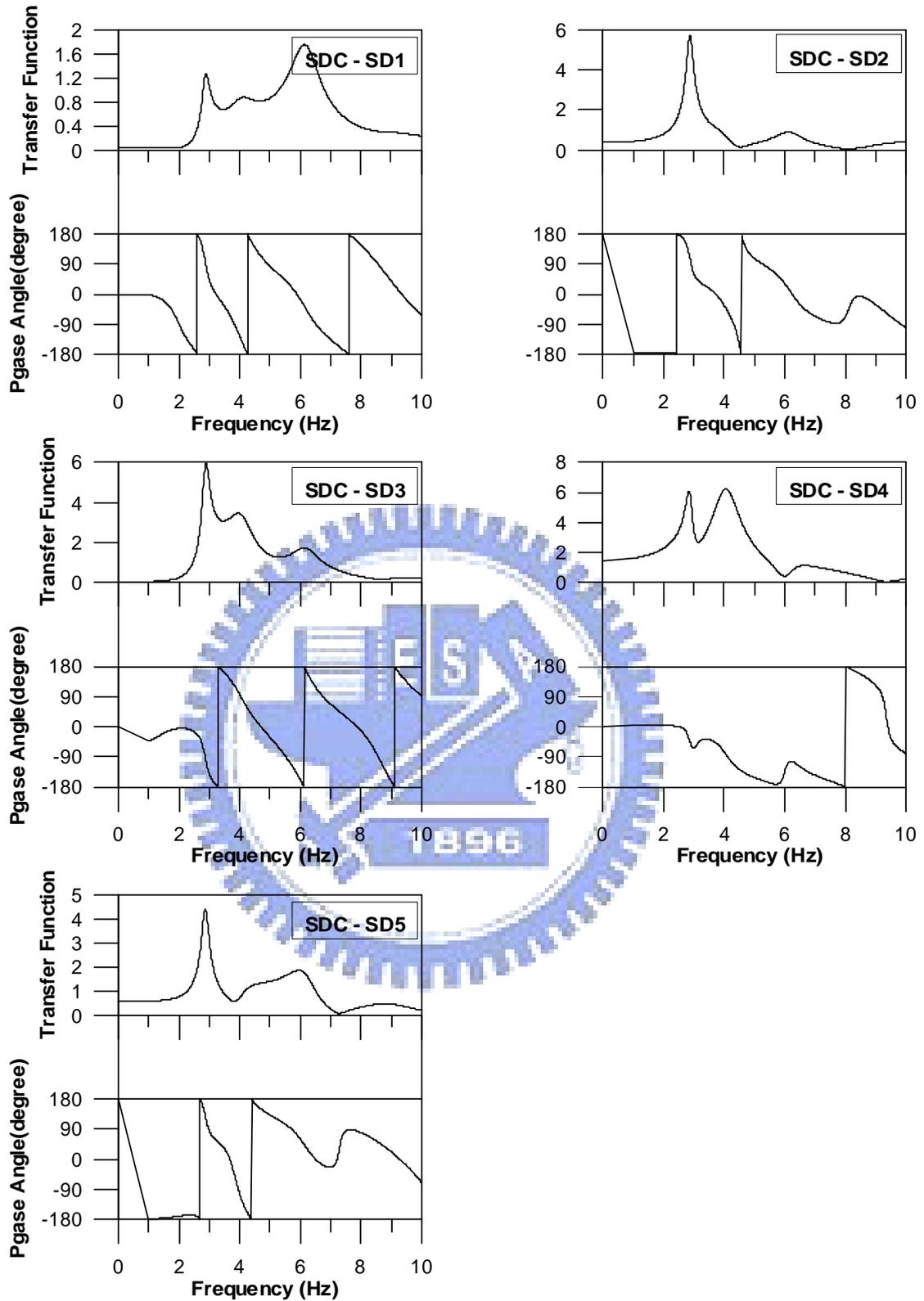


圖 3.2.2-7(c)2002 年 0515 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

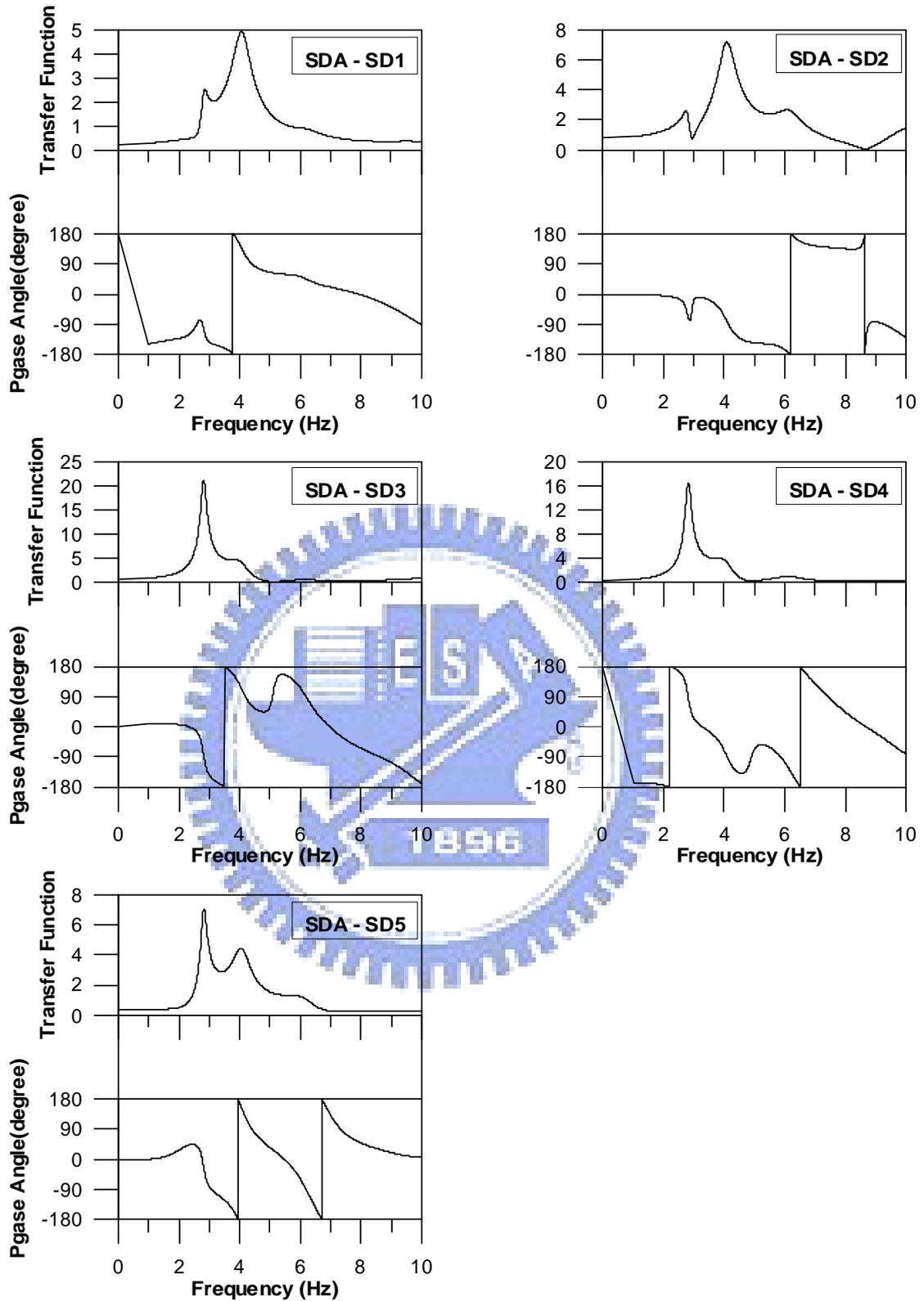


圖 3.2.2-8(a)2002 年 09/07 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

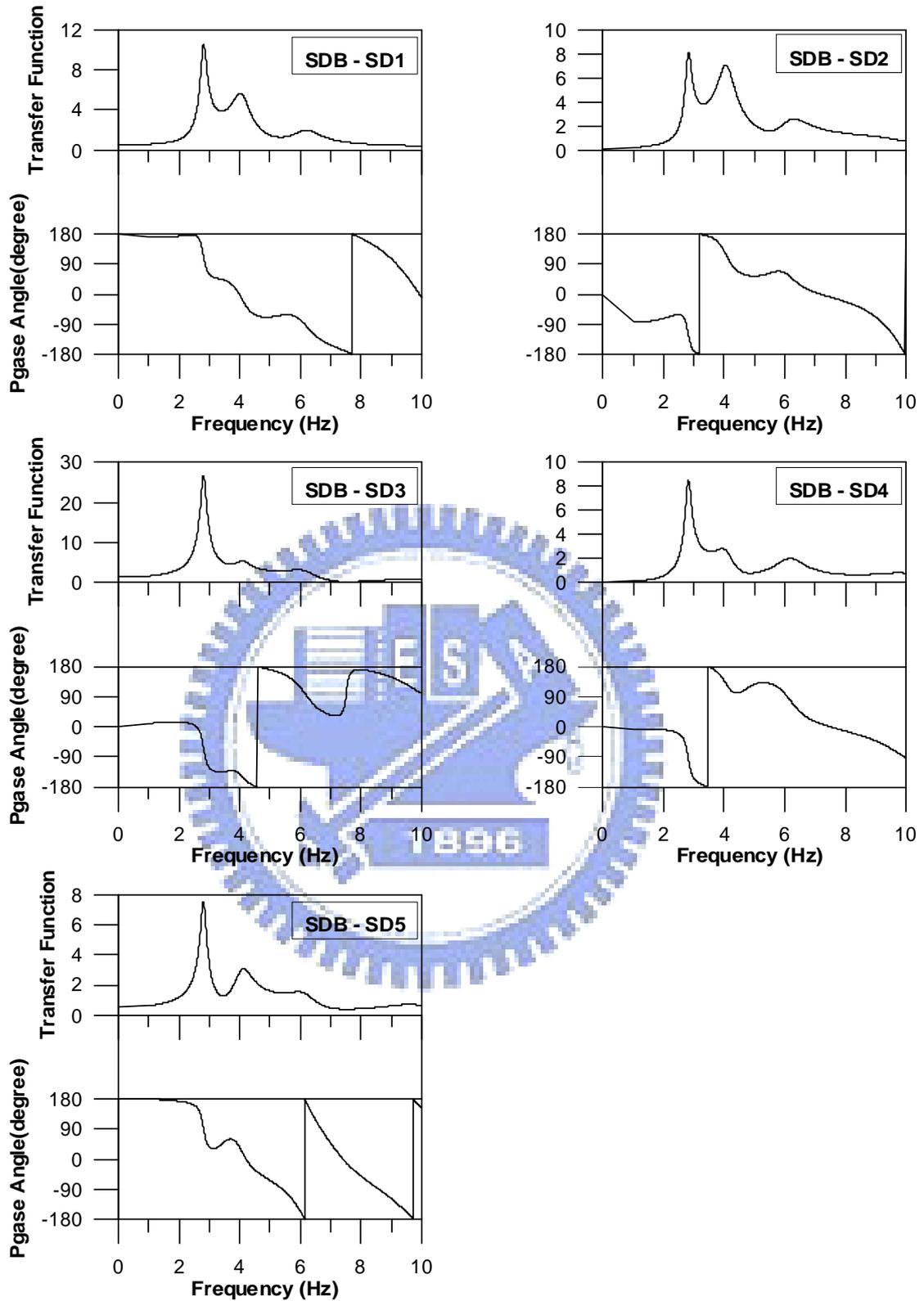


圖 3.2.2-8(b)2002 年 09/07 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

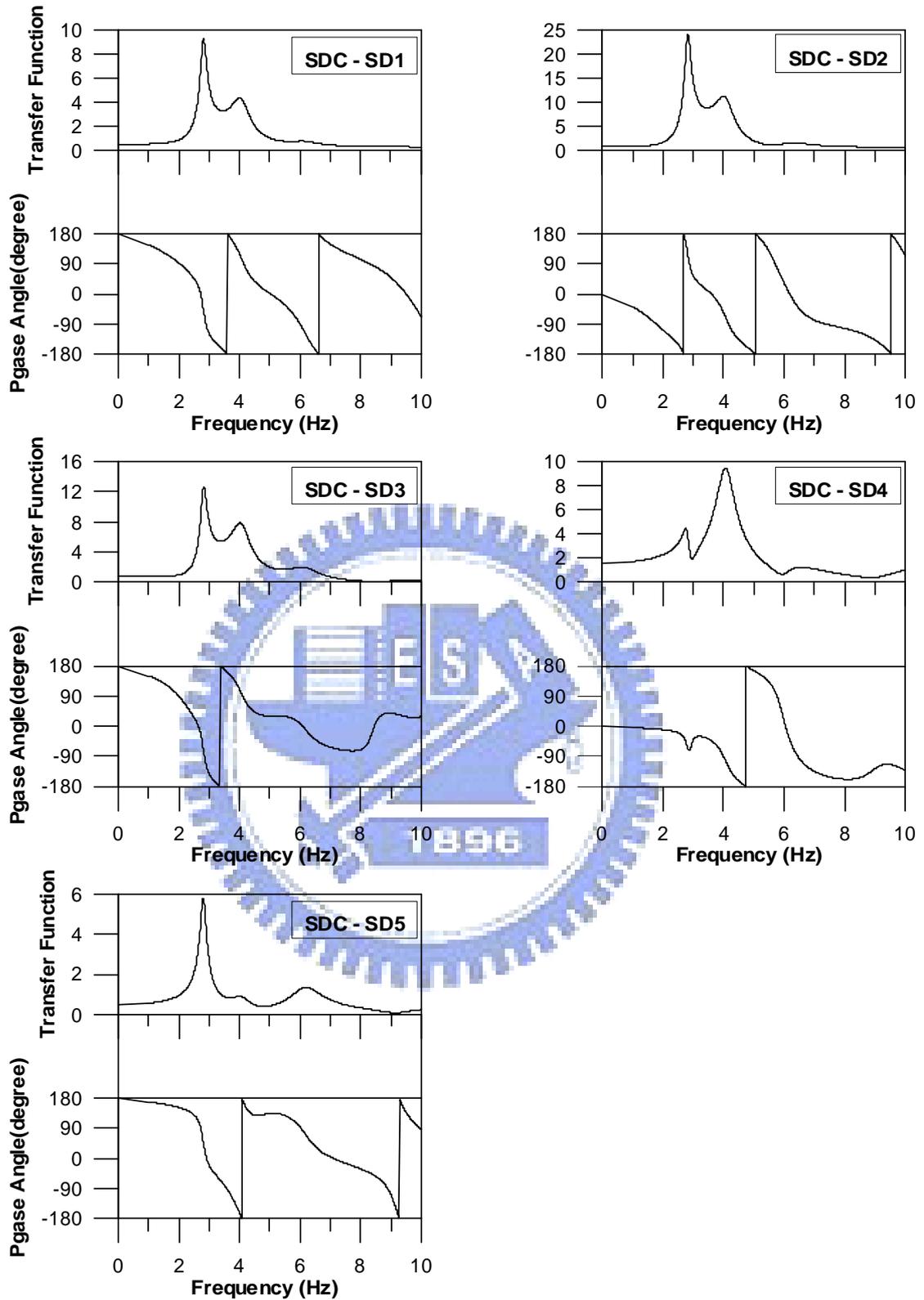


圖 3.2.2-8(c) 2002 年 09/07 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

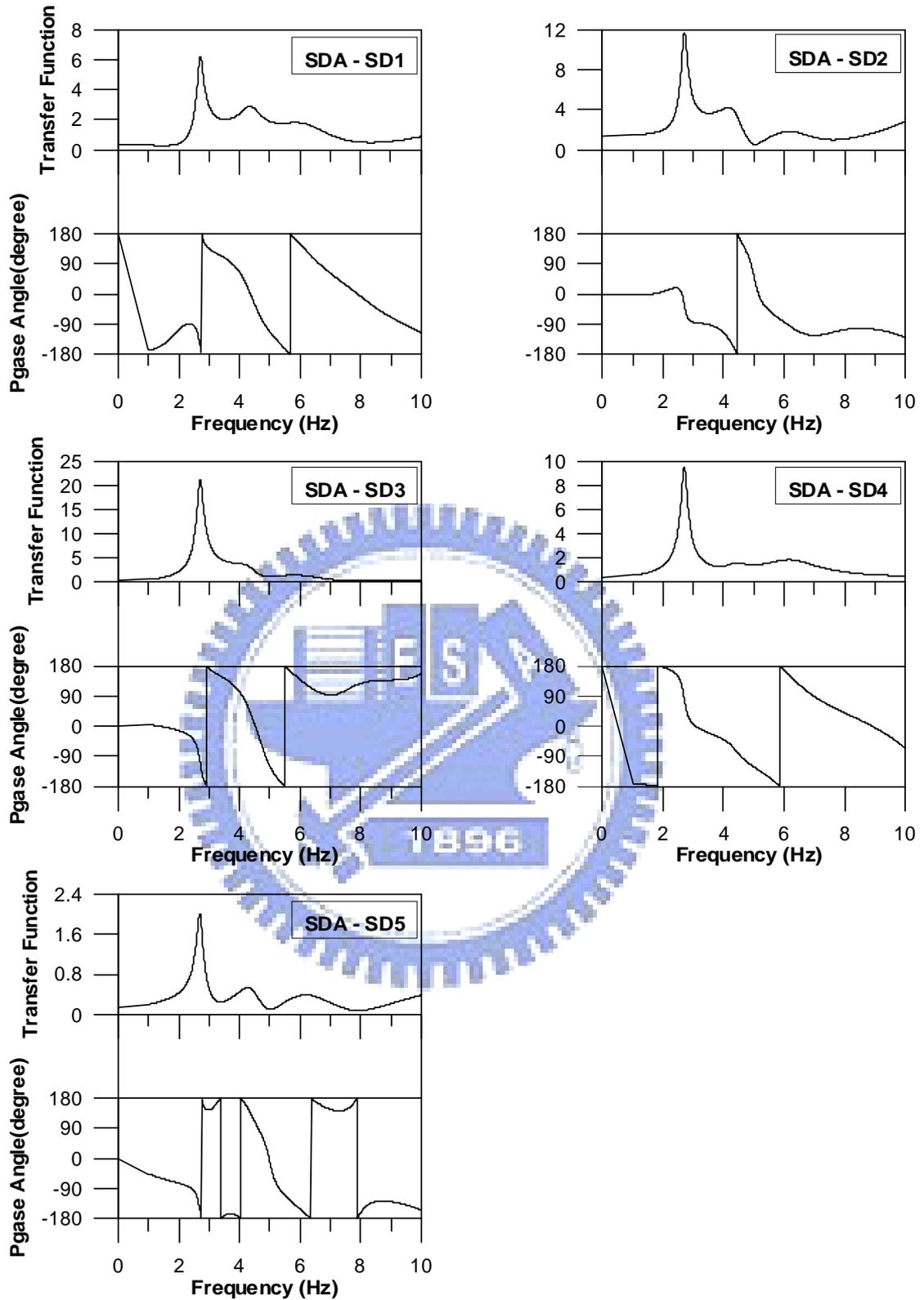


圖 3.2.2-9(a)2002 年 11/10 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

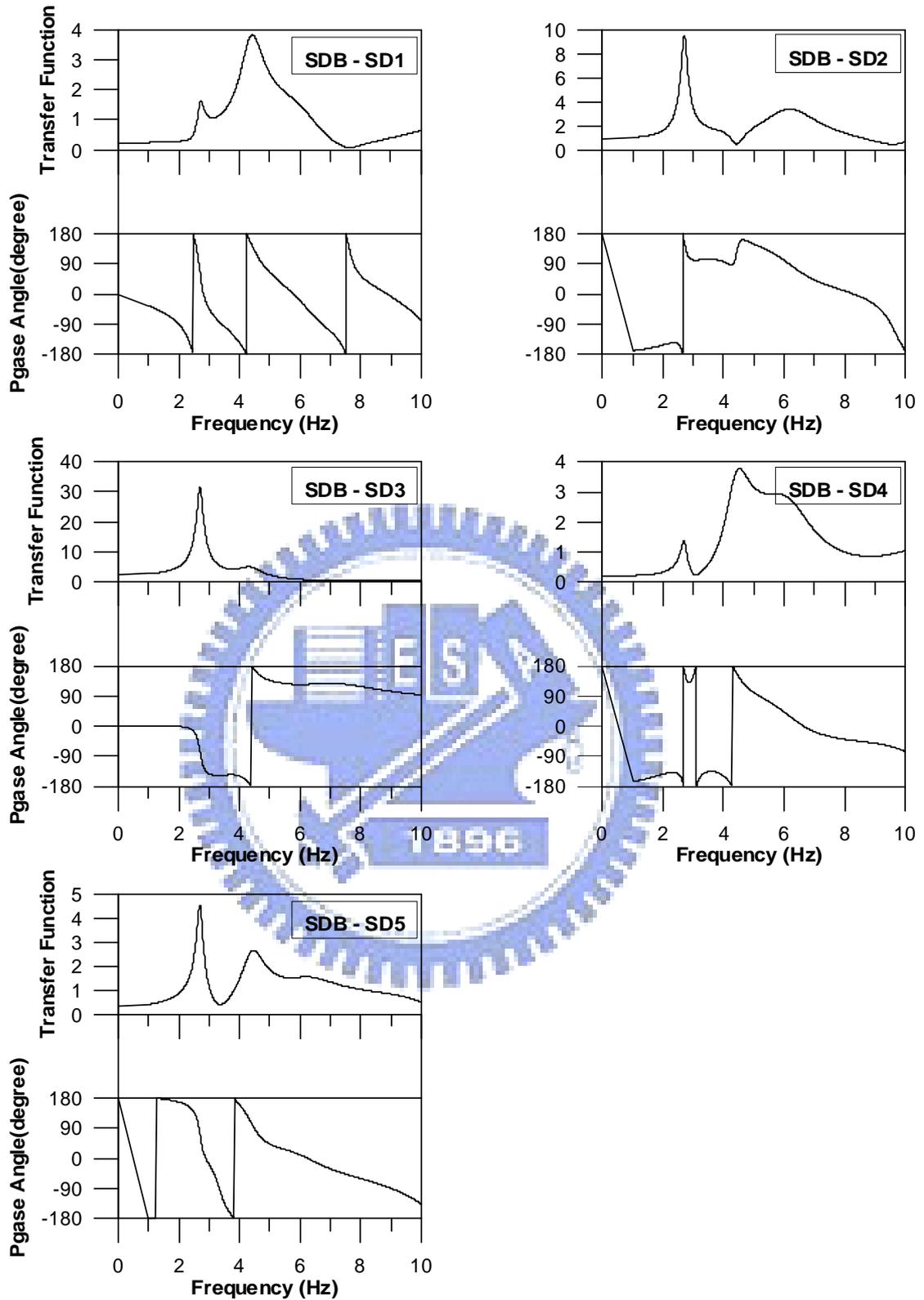


圖 3.2.2-9(b)2002 年 11/10 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

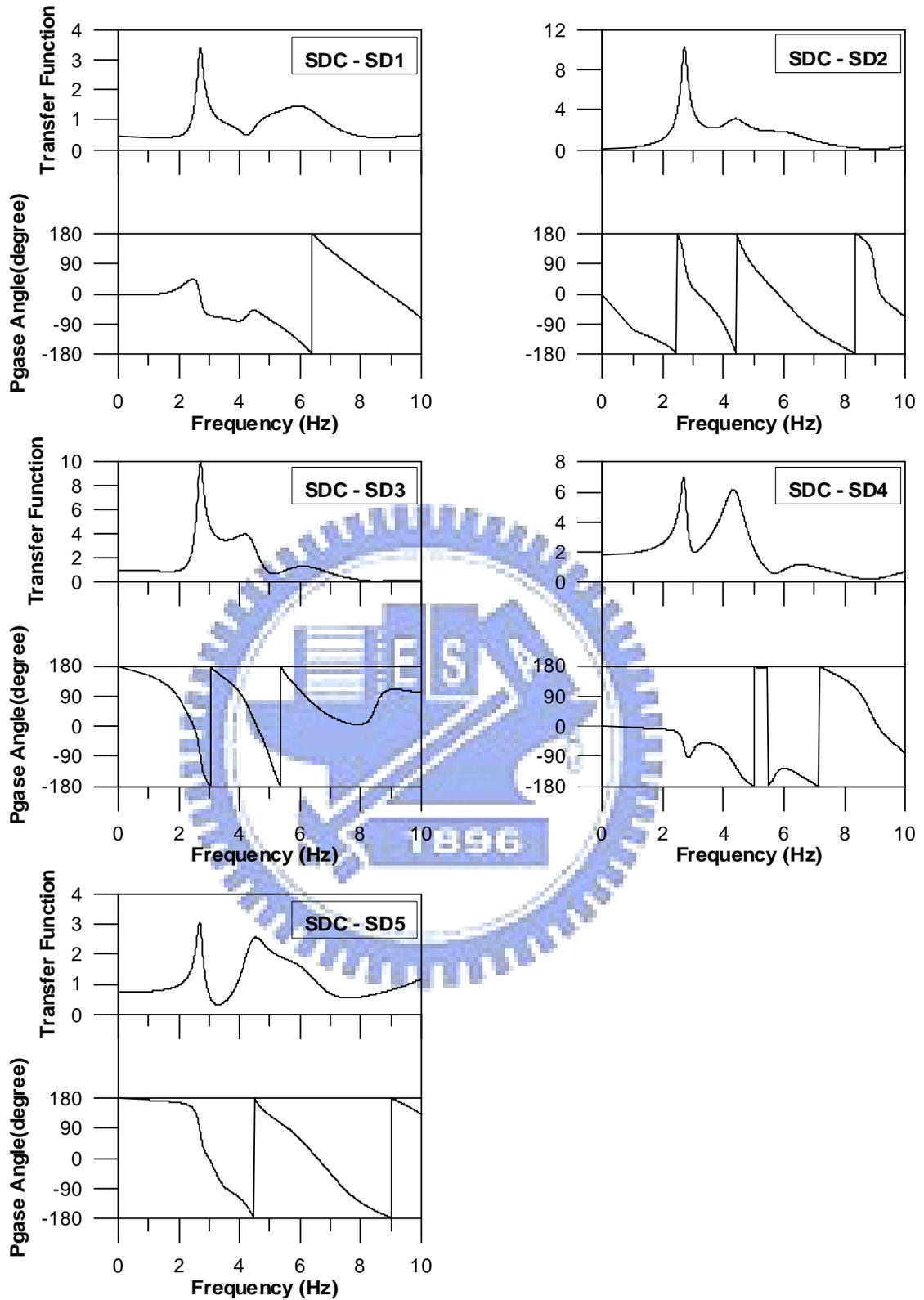


圖 3.2.2-9(c) 2002 年 11/10 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

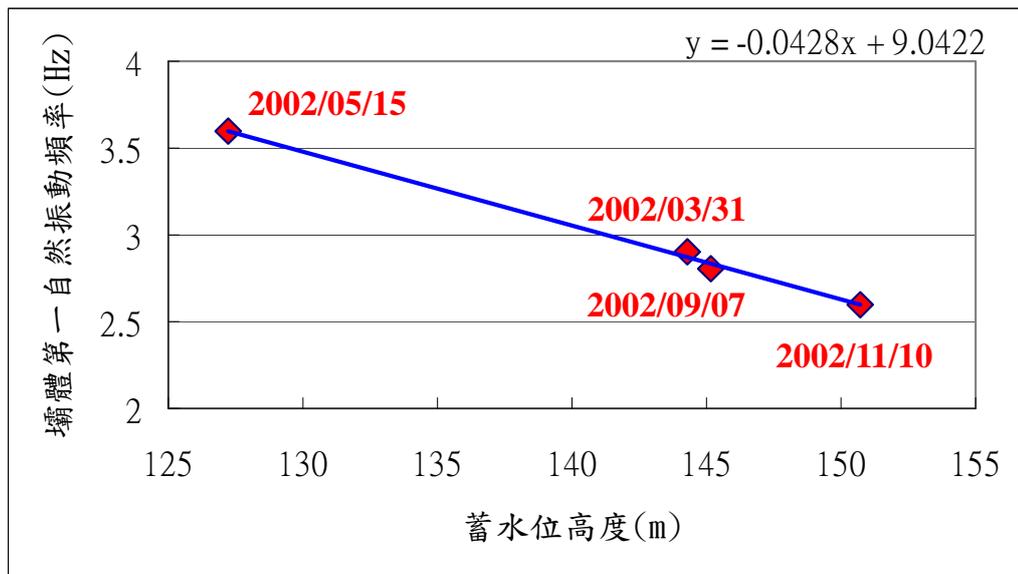


圖 3.2.2-10 蓄水位深度與壩體第一自然振動頻率之關係

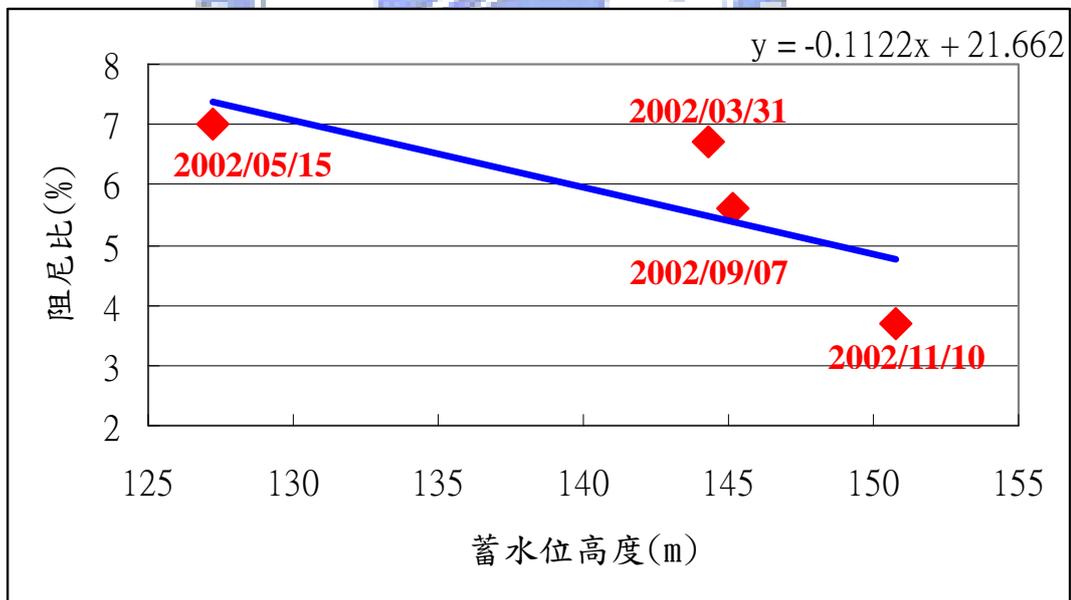


圖 3.2.2-11 蓄水位深度與阻尼比之關係

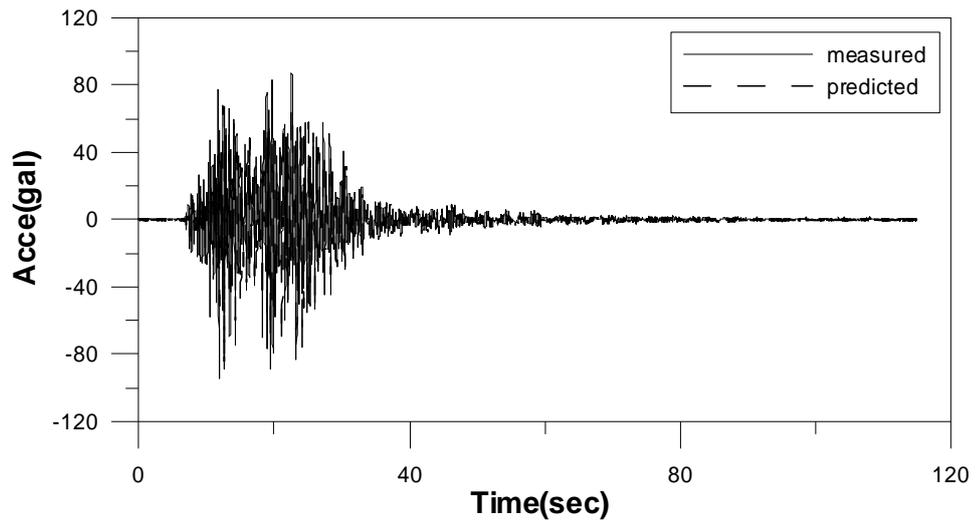


圖 3.2.2-12 2002/03/31 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

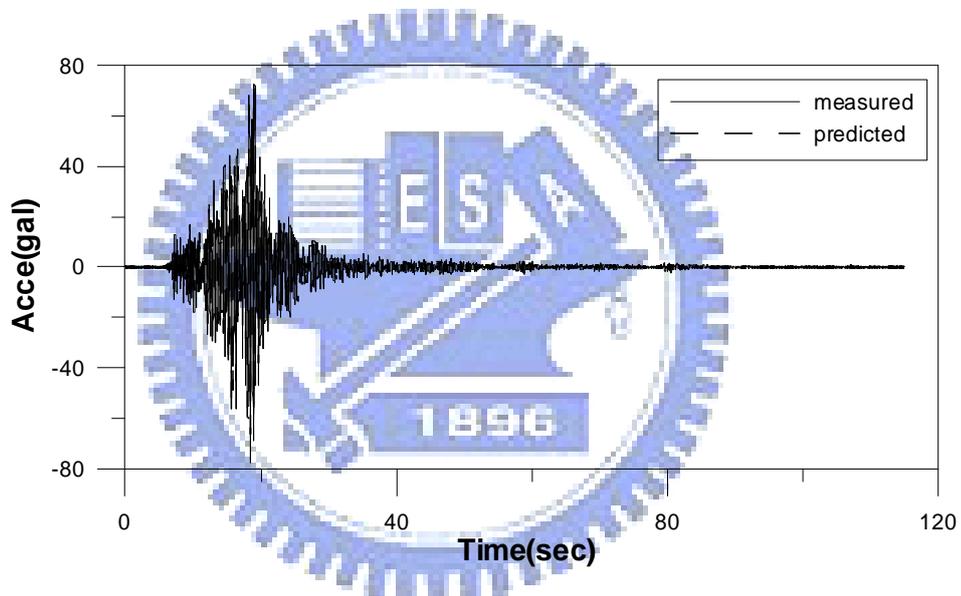


圖 3.2.2-13 2002/05/15 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

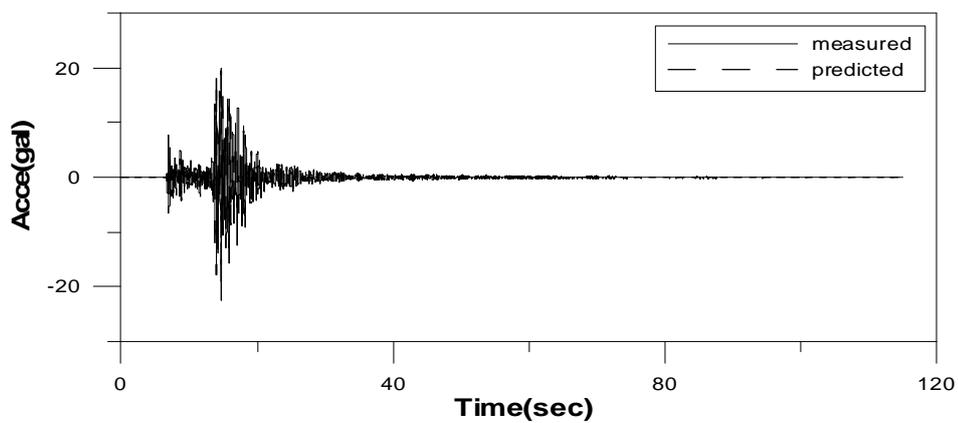


圖 3.2.2-14 2002/09/07 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

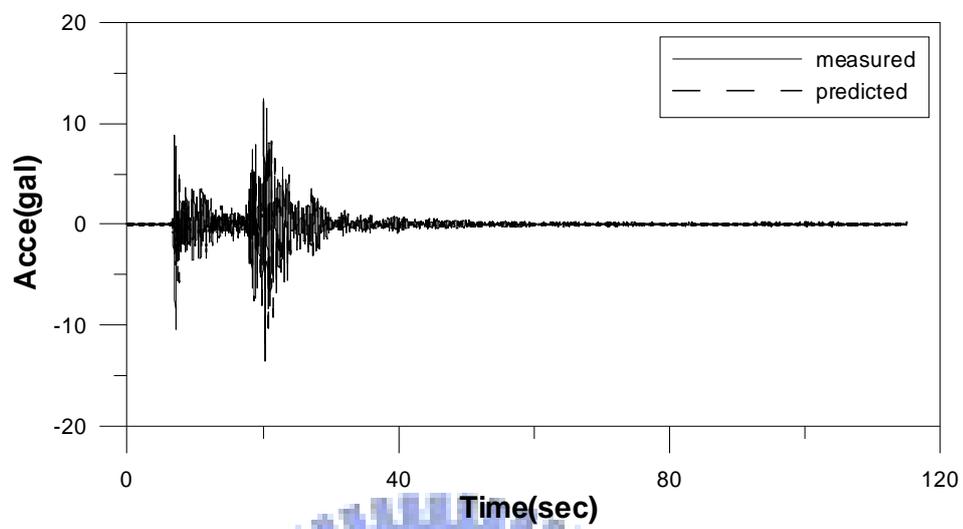


圖 3.2.2-15 2002/11/10 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應



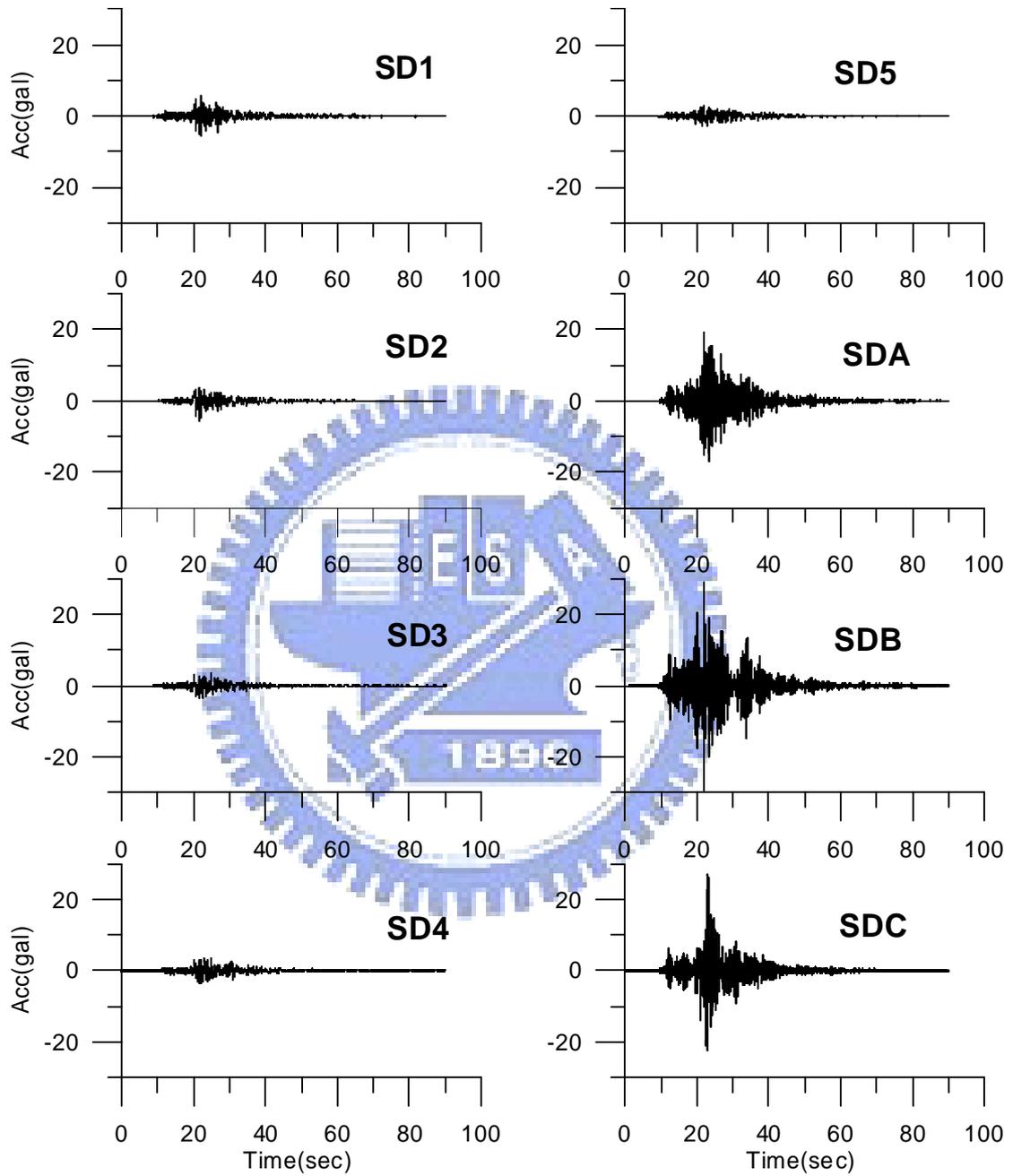


圖 3.2.3-1(a)2000 年 09/10 地震加速度歷時曲線(上下游向)

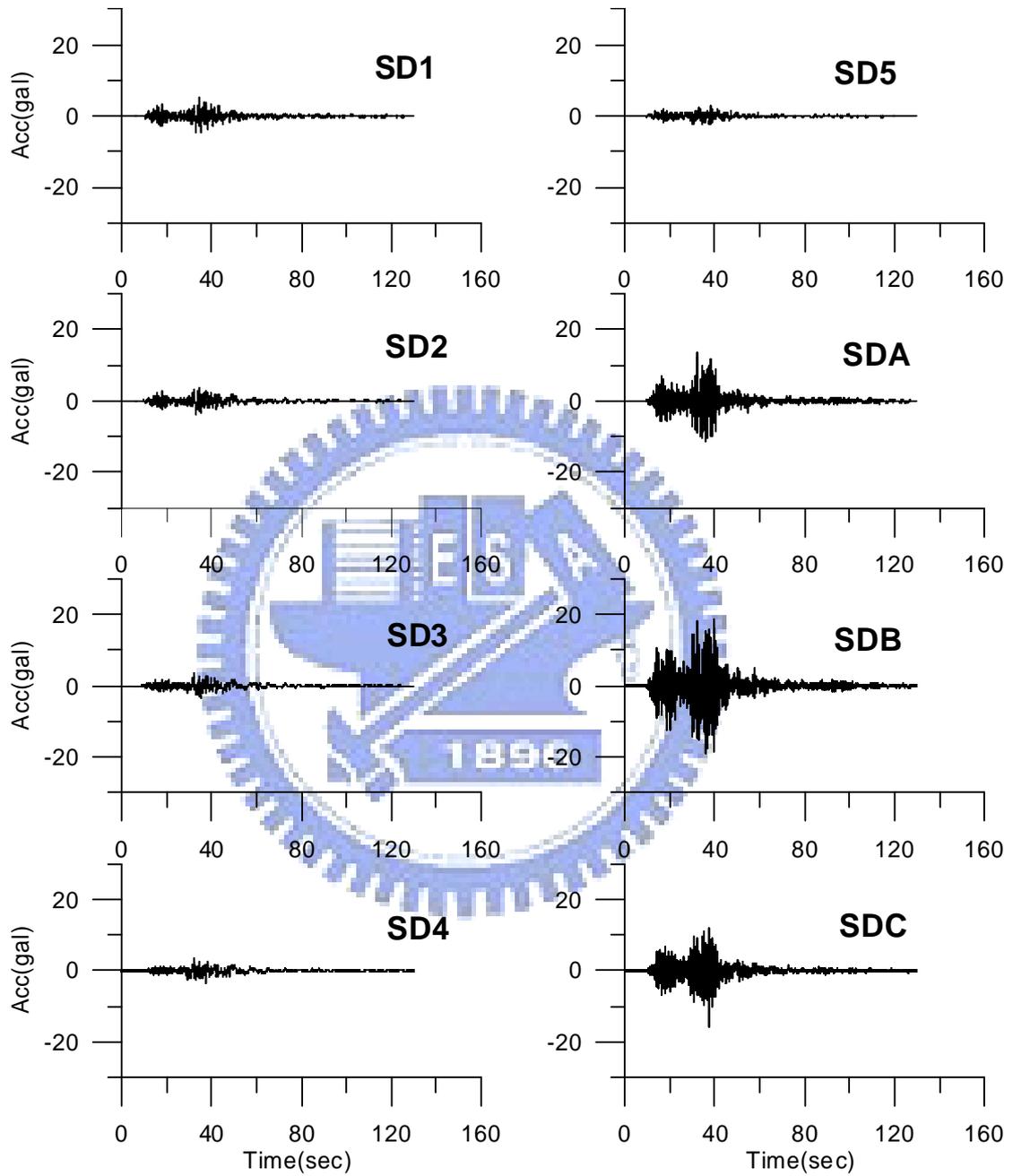


圖 3.2.3-1(b)2001 年 12/18 地震加速度歷時曲線(上下游向)

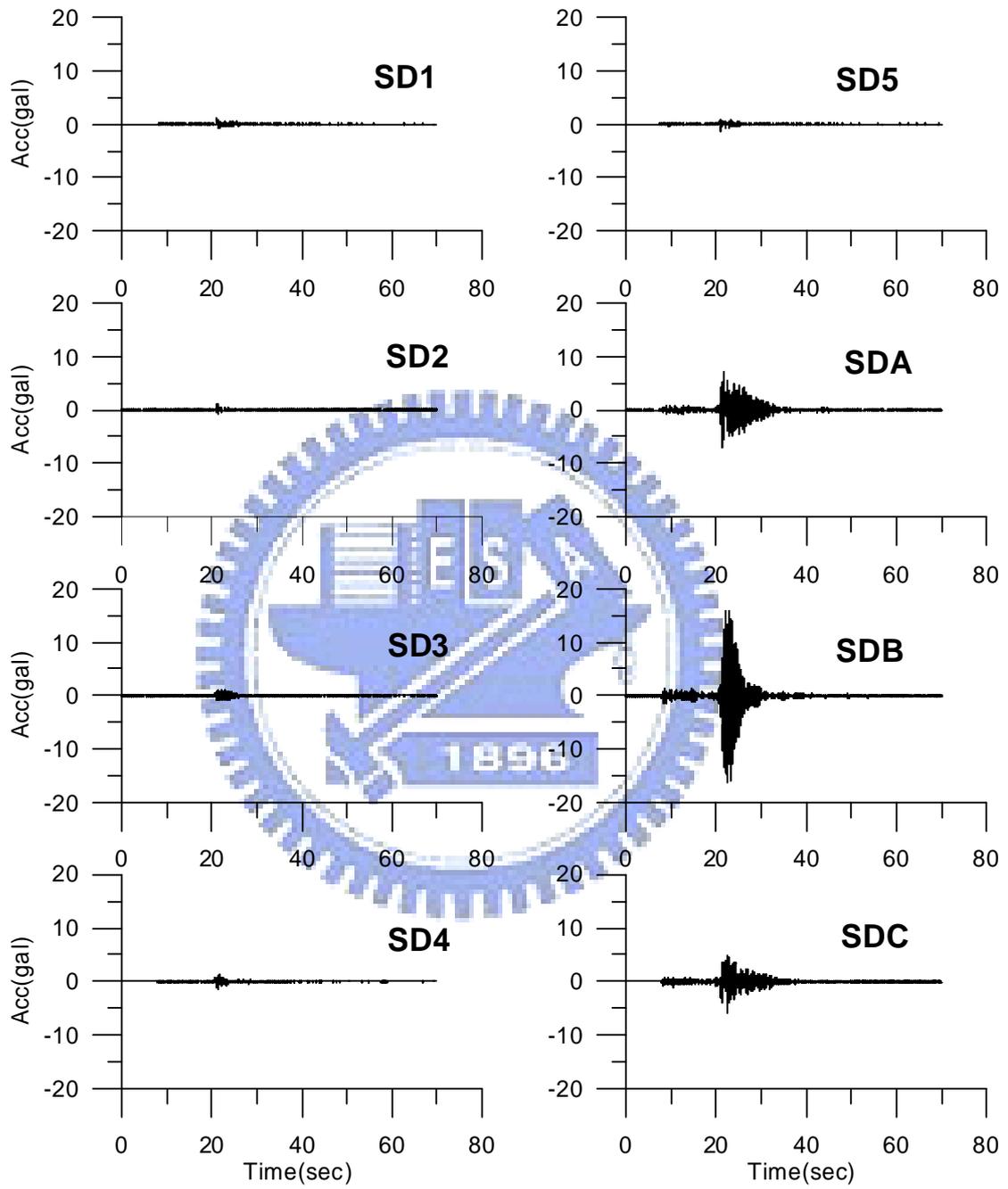


圖 3.2.3-1(c)2002 年 01/08 地震加速度歷時曲線(上下游向)

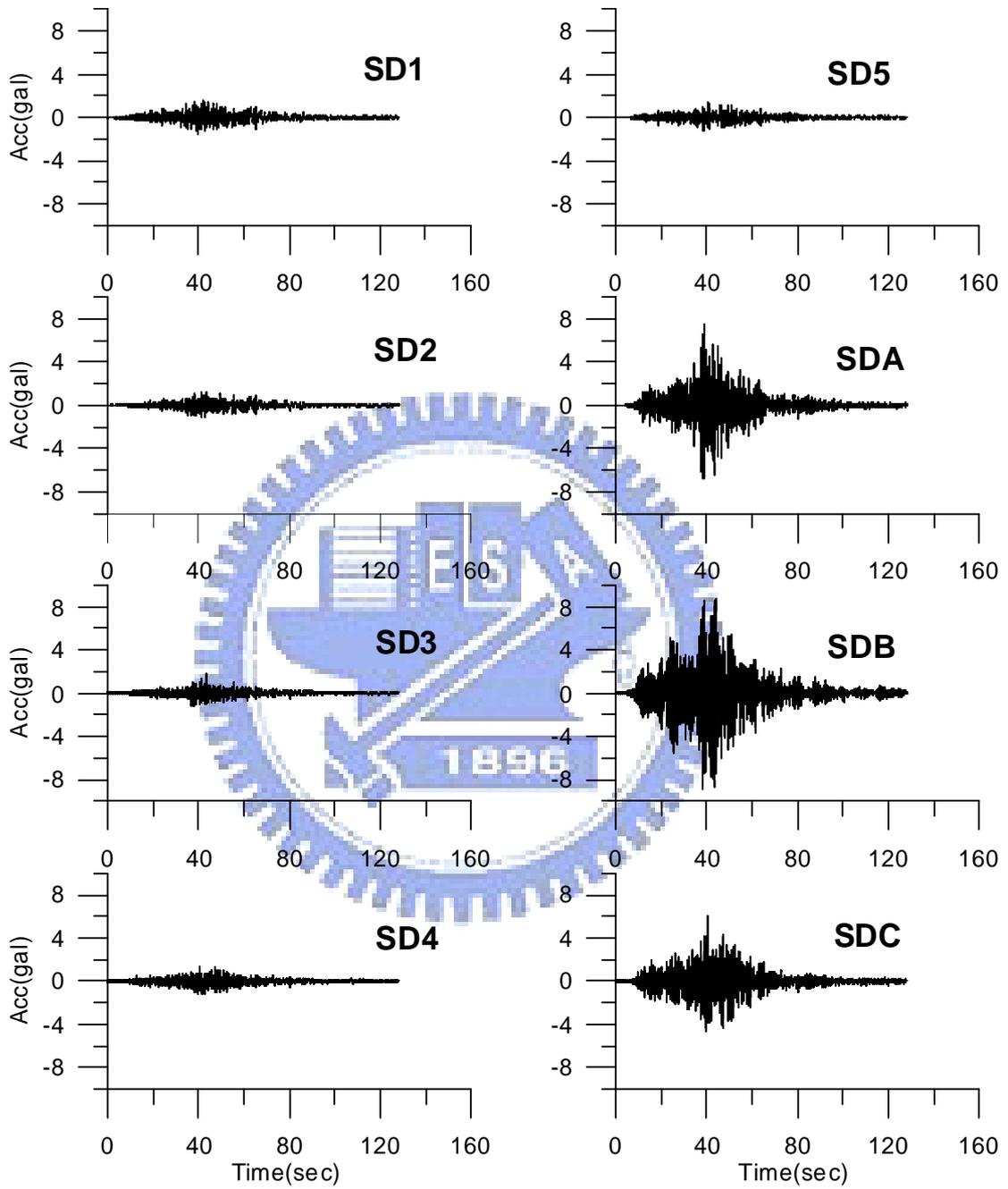


圖 3.2.3-1(d)2003 年 12/10 地震加速度歷時曲線(上下游向)

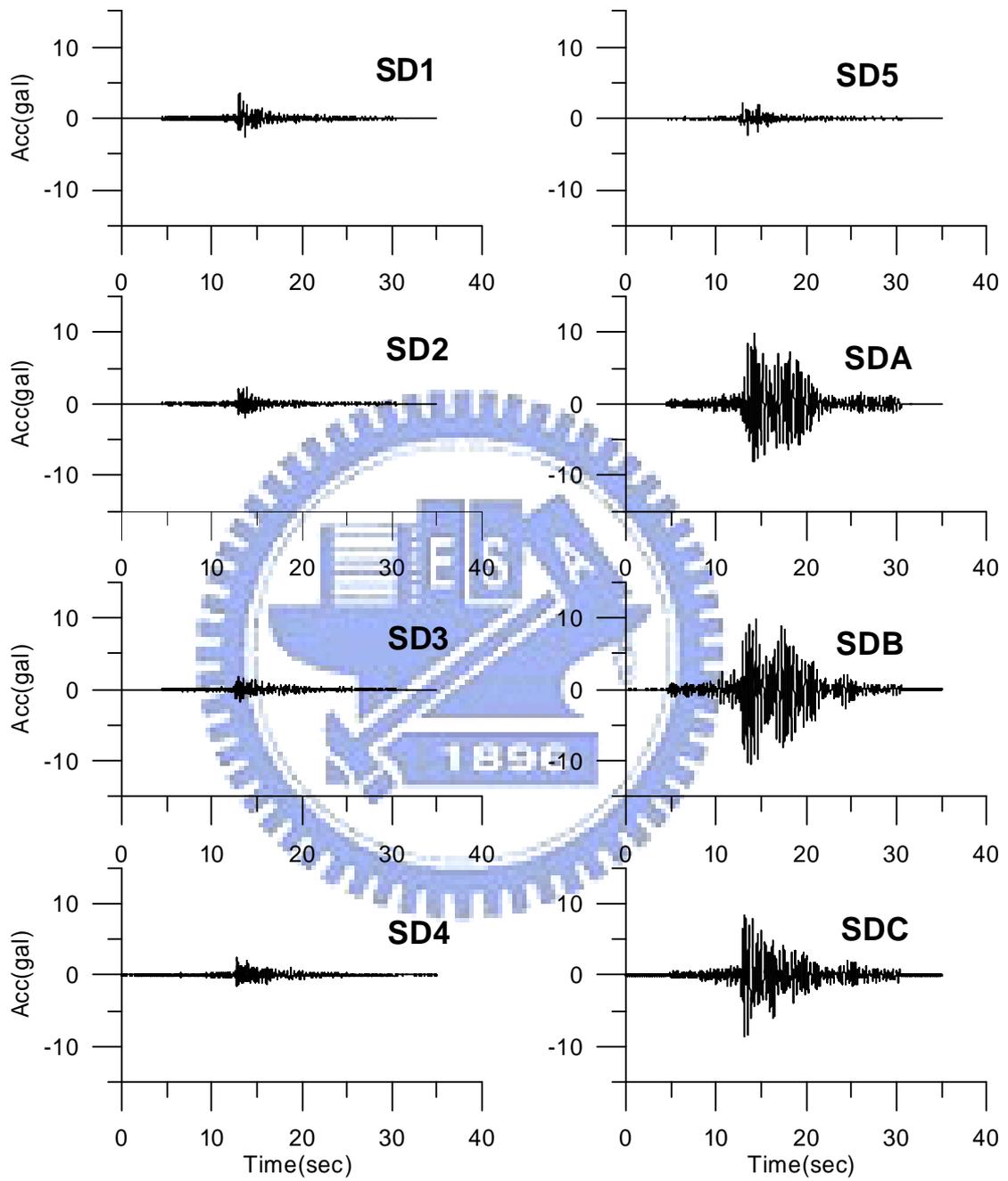


圖 3.2.3-1(e)2004 年 05/09 地震加速度歷時曲線(上下游向)

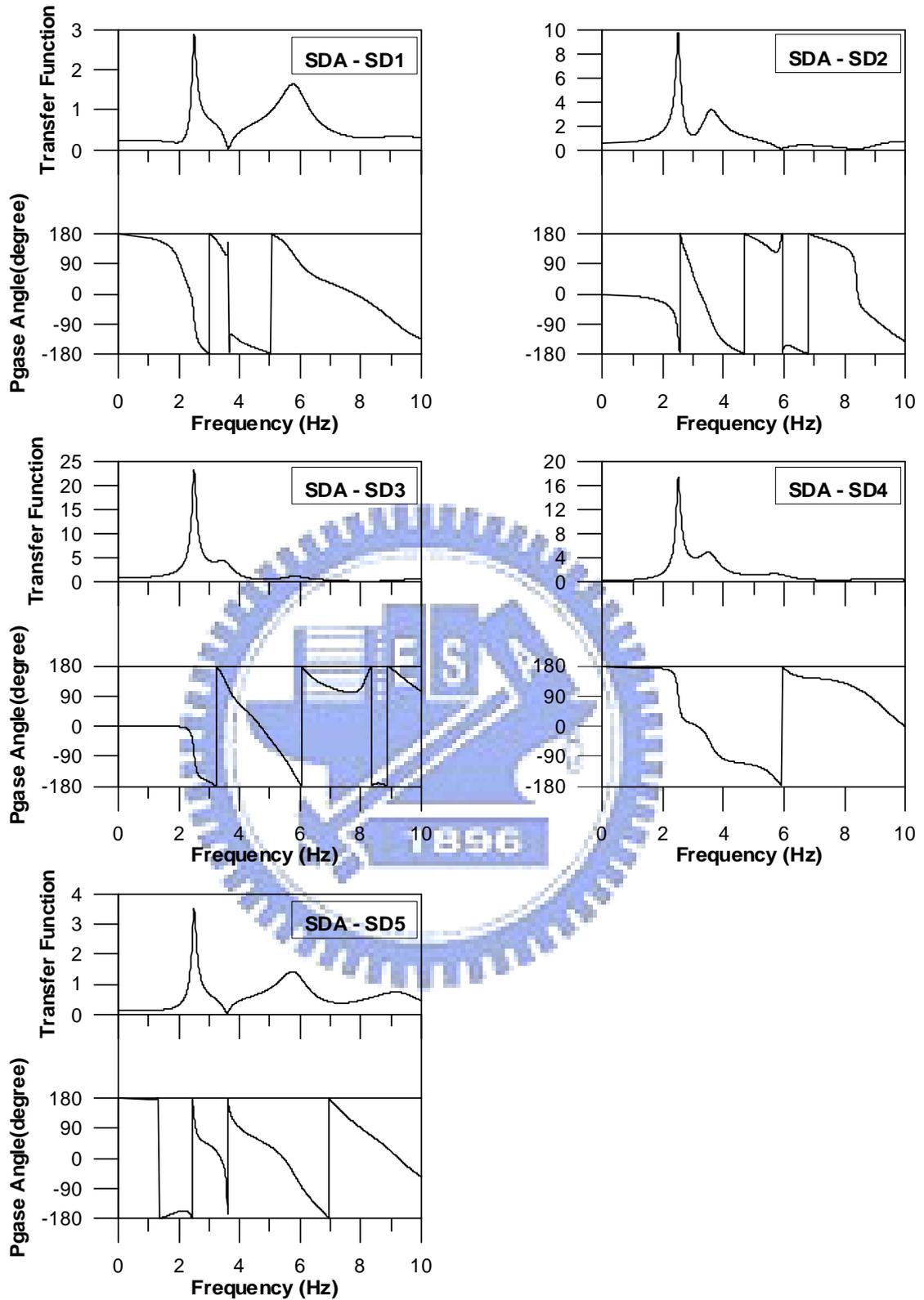


圖 3.2.3-2(a)2000 年 09/10 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

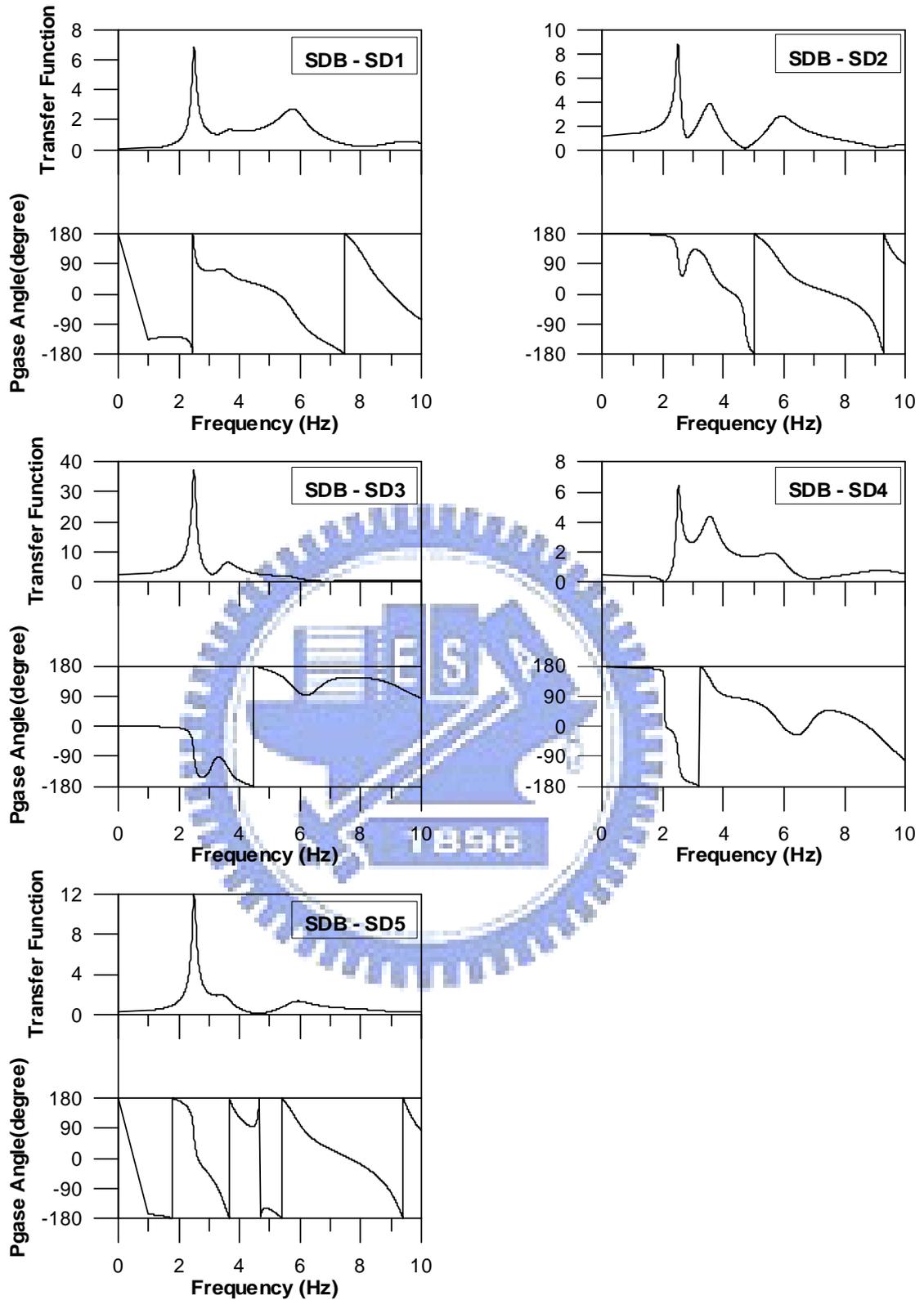


圖 3.2.3-2(b)2000 年 09/10 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

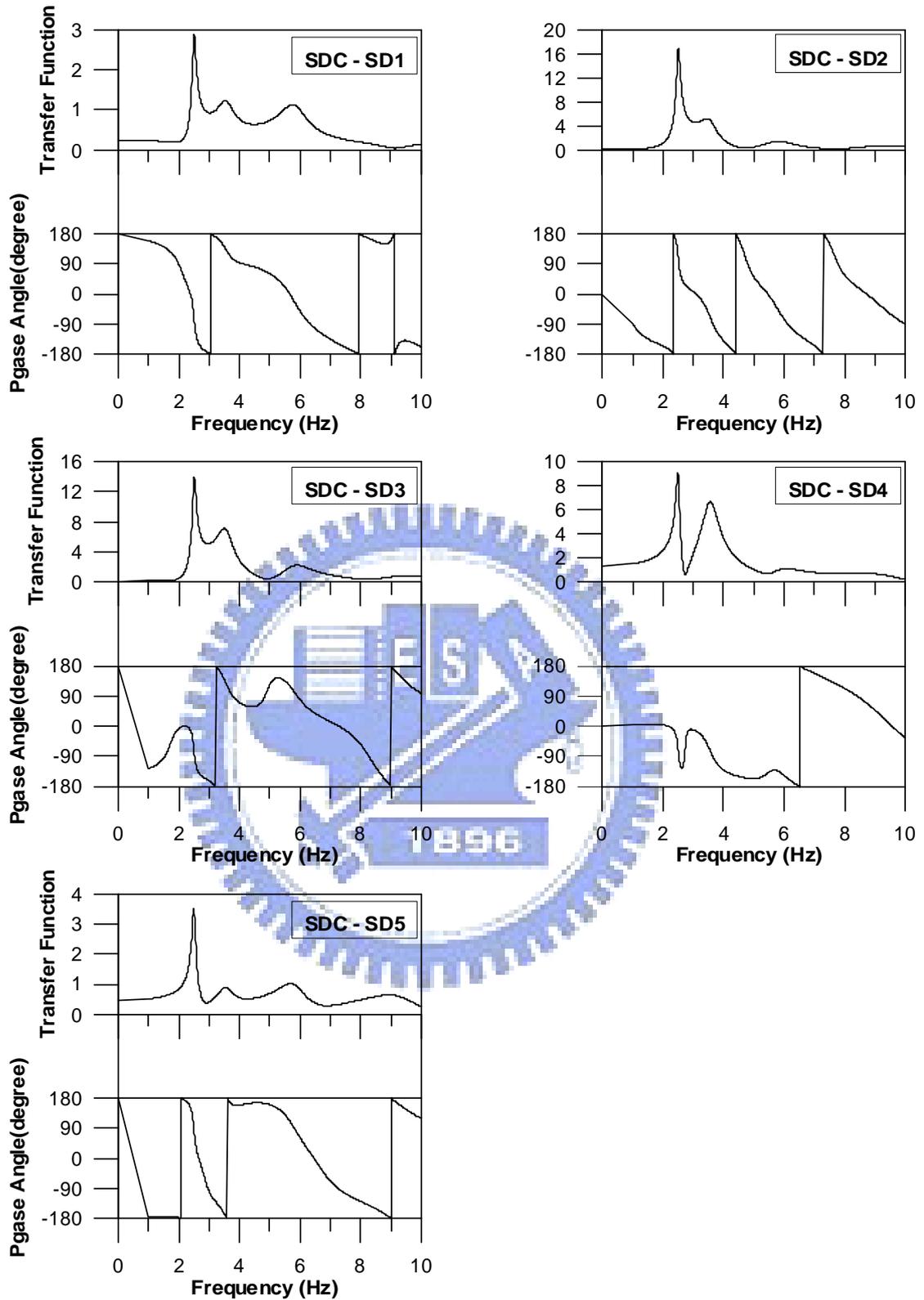


圖 3.2.3-2(c) 2000 年 09/10 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

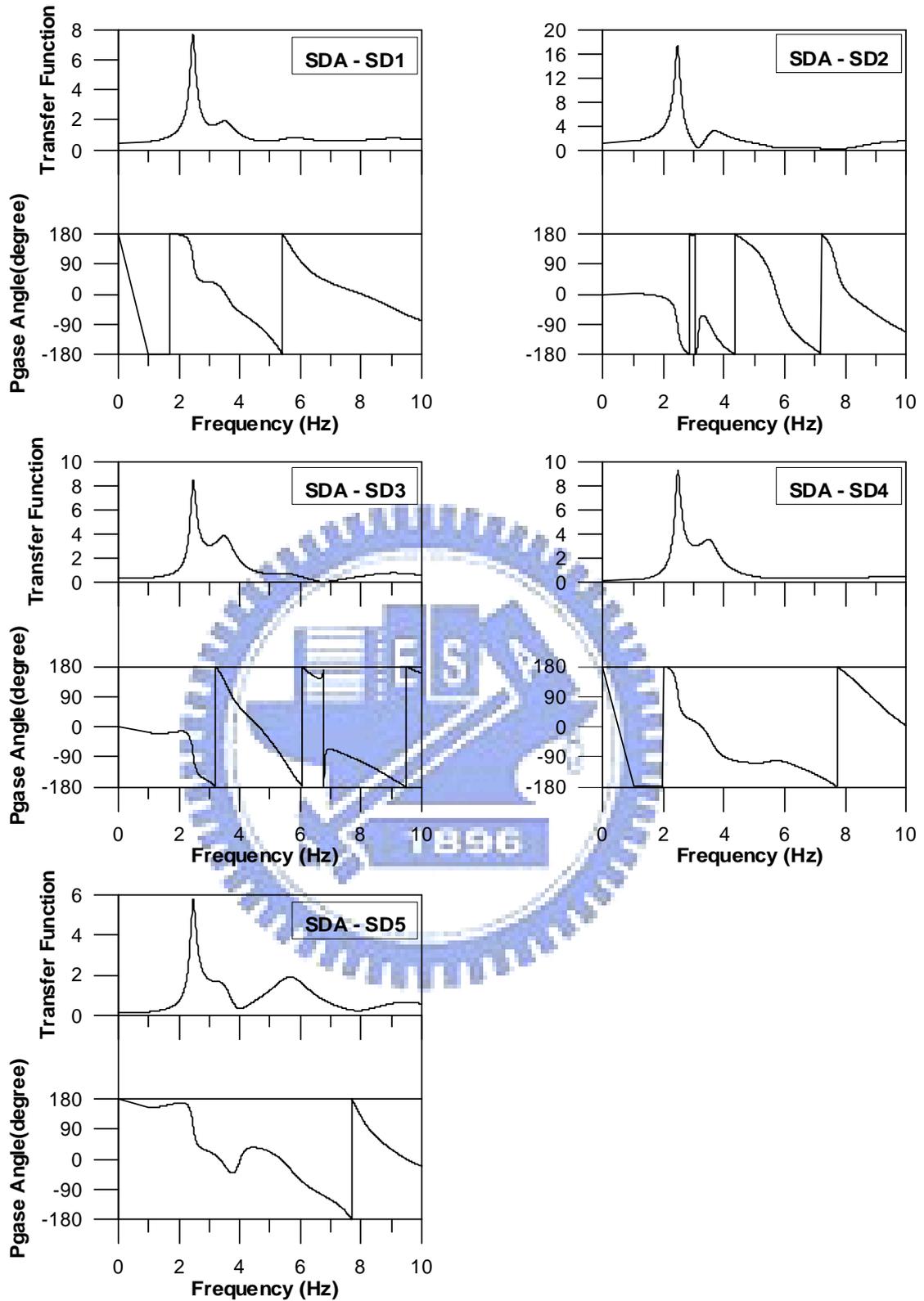


圖 3.2.3-3(a) 2001 年 12/18 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

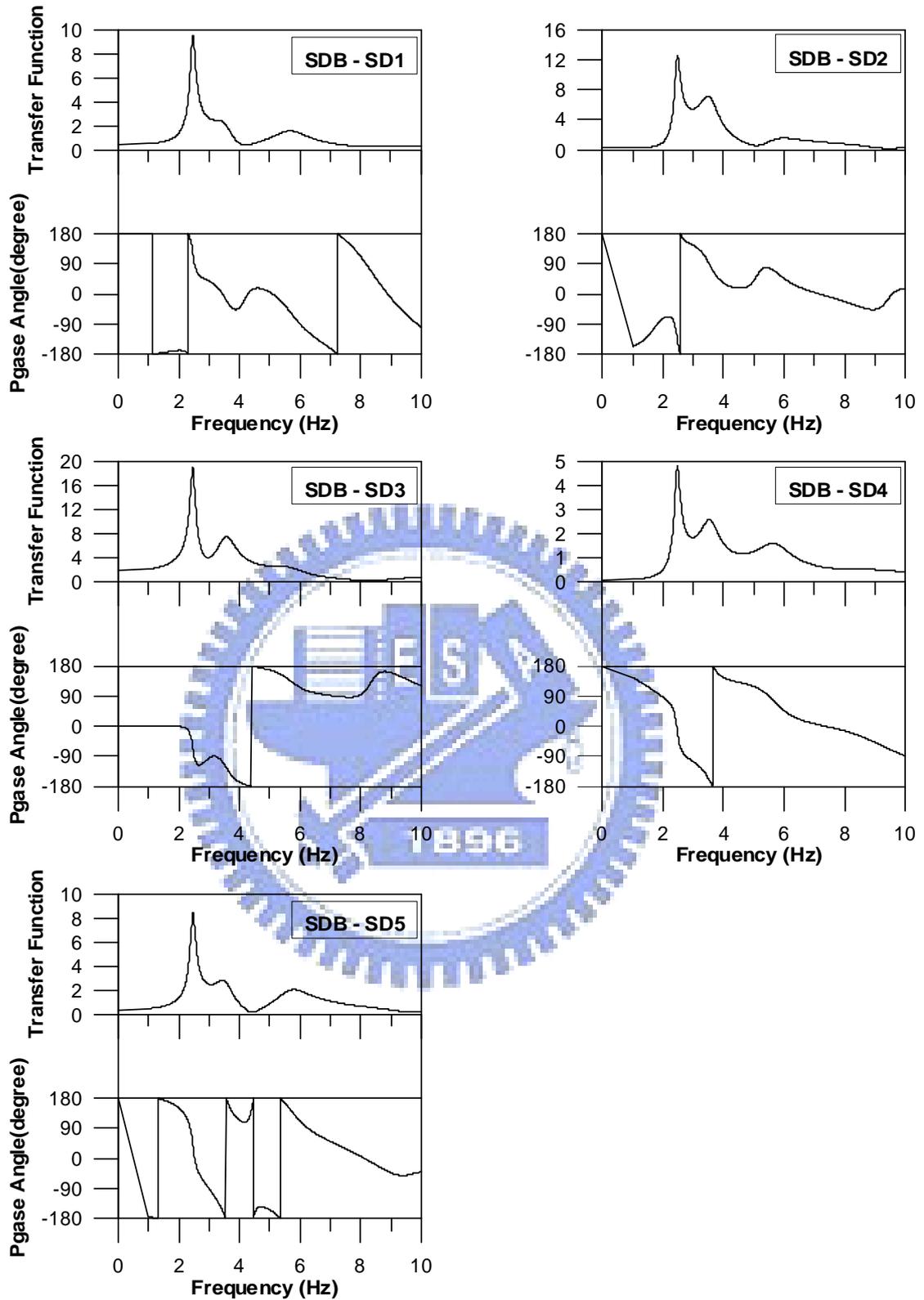


圖 3.2.3-3(b)2001 年 12/18 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

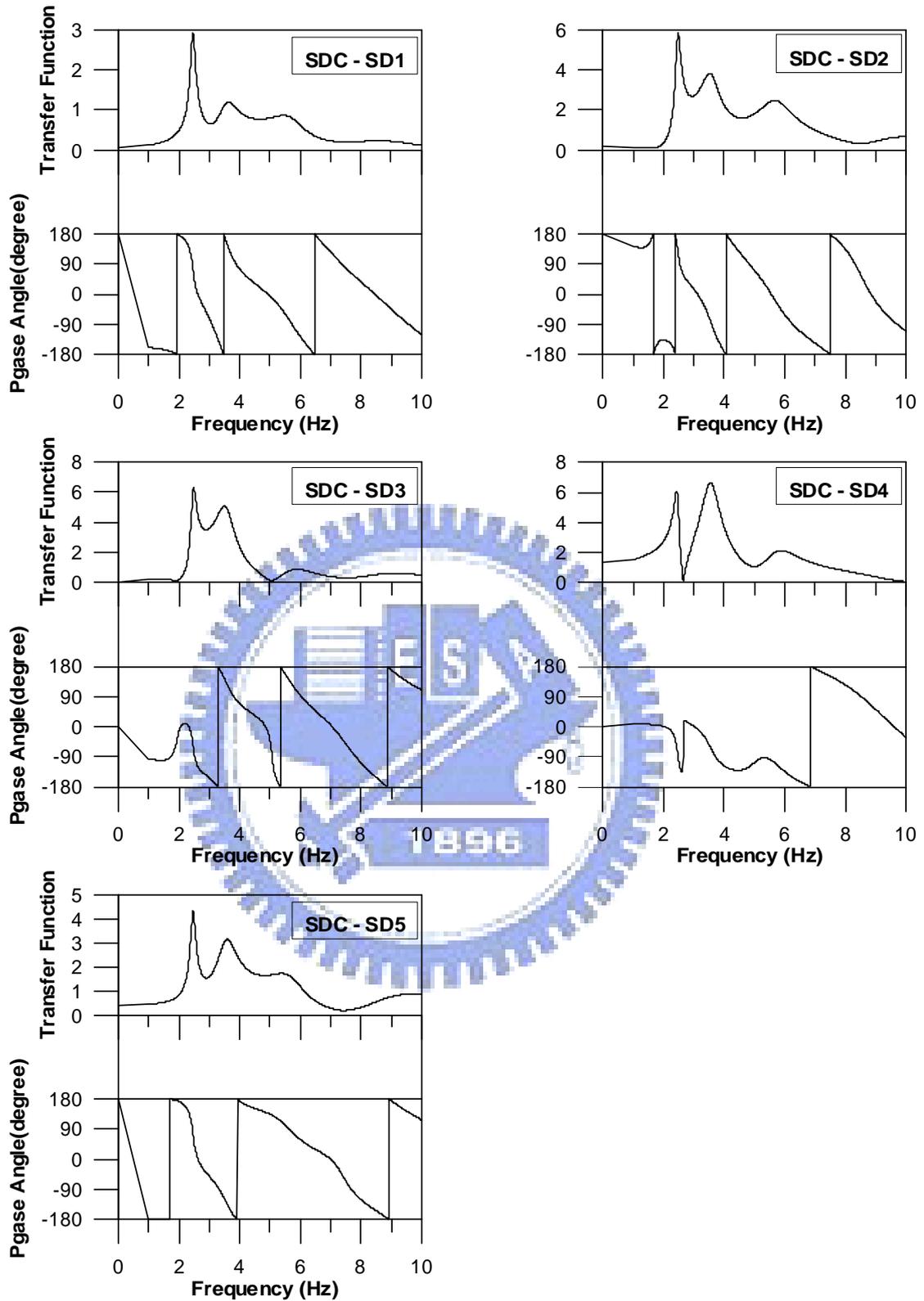


圖 3.2.3-3(c) 2001 年 12/18 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

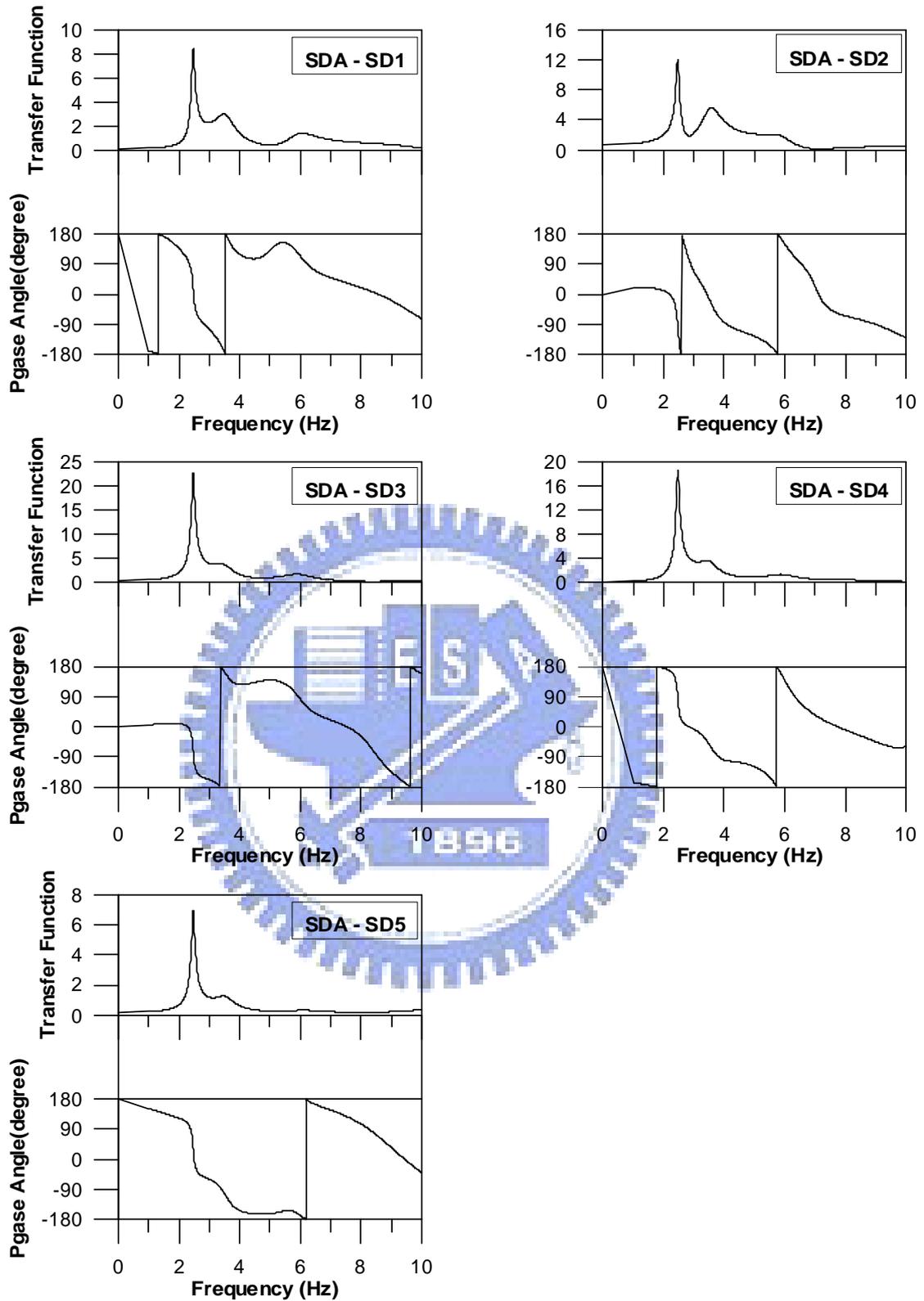


圖 3.2.3-4(a)2002 年 01/08 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

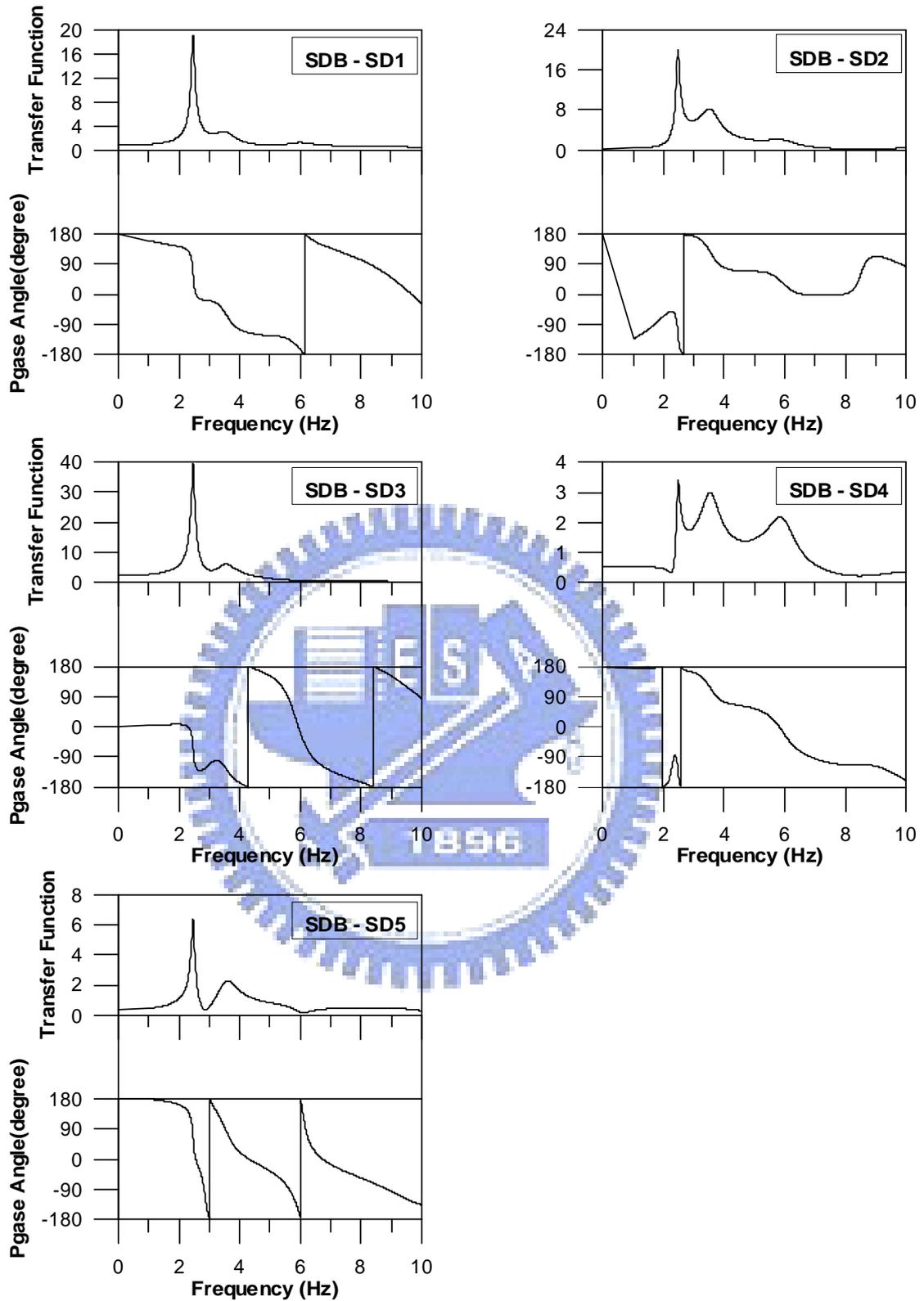


圖 3.2.3-4(b)2002 年 01/08 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

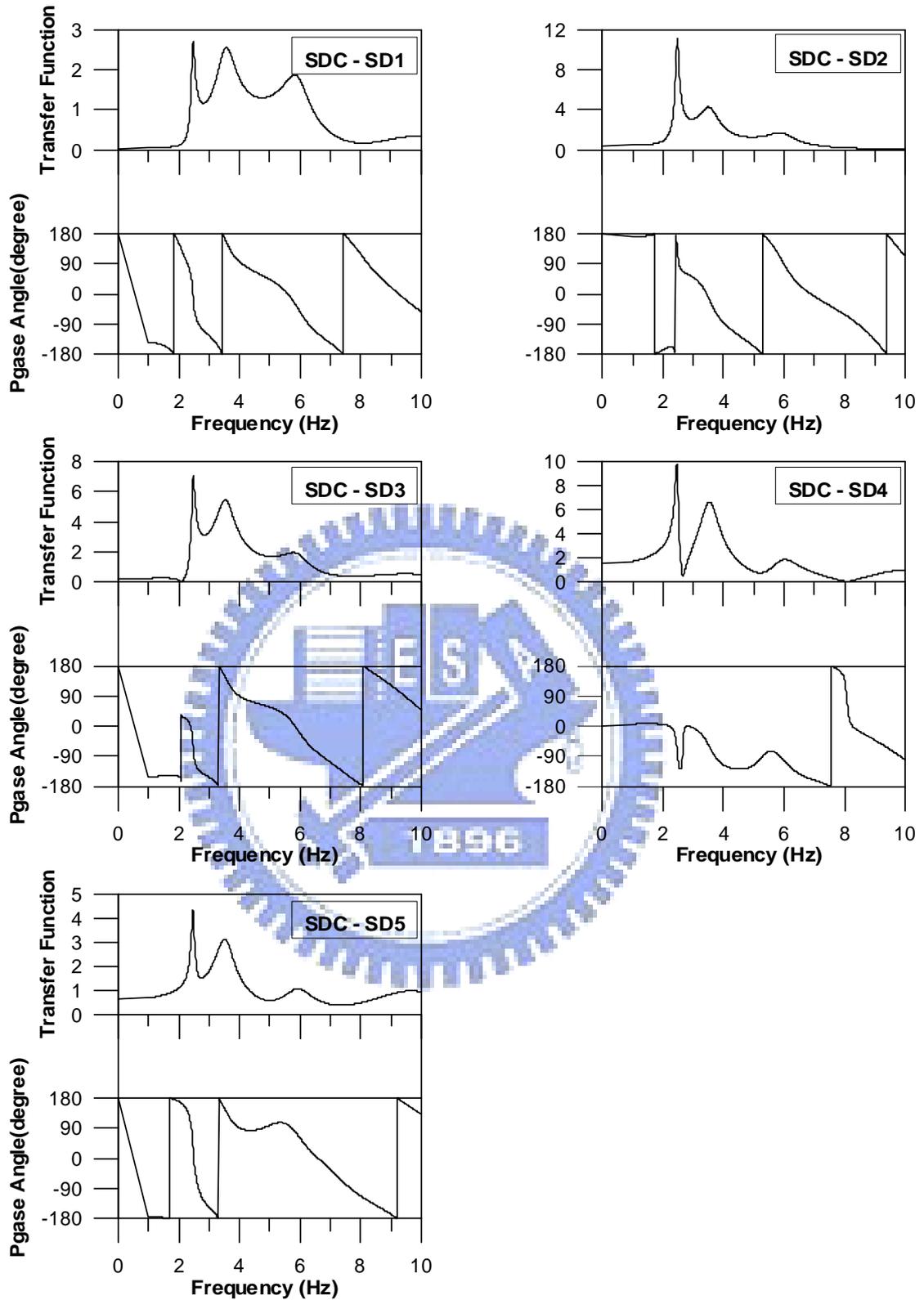


圖 3.2.3-4(c) 2002 年 01/08 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

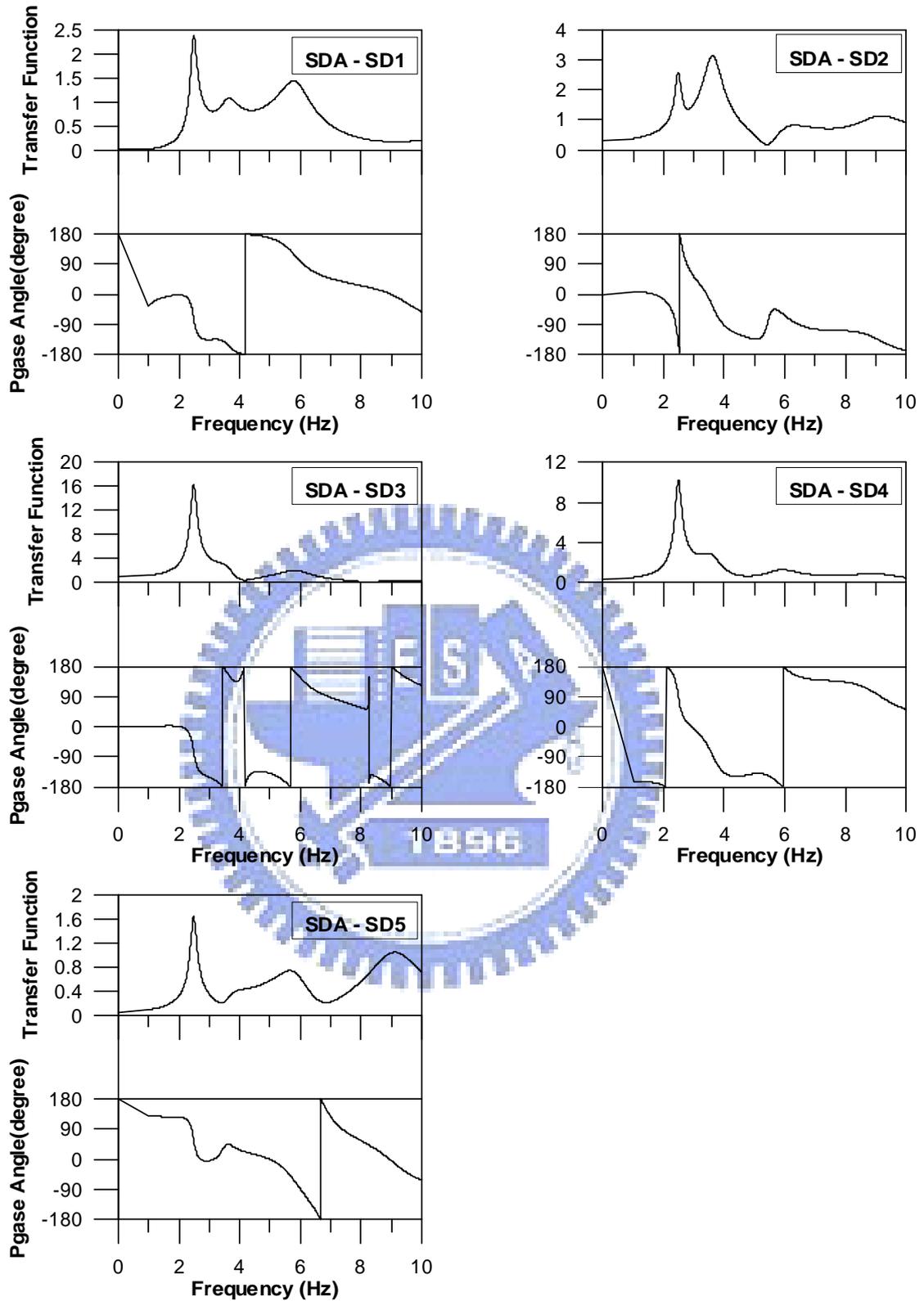


圖 3.2.3-5(a)2003 年 12/10 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

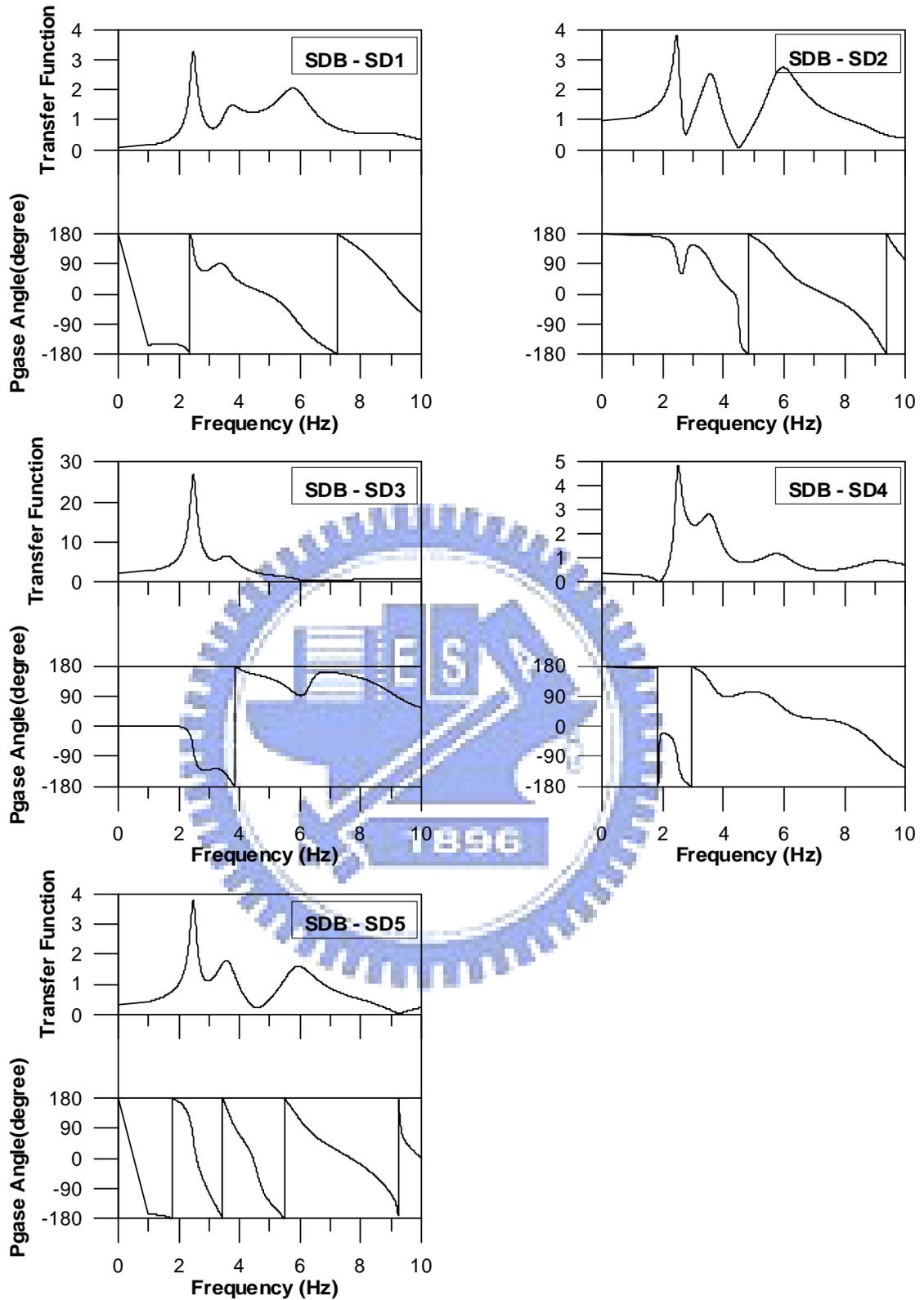


圖 3.2.3-5(b)2003 年 12/10 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

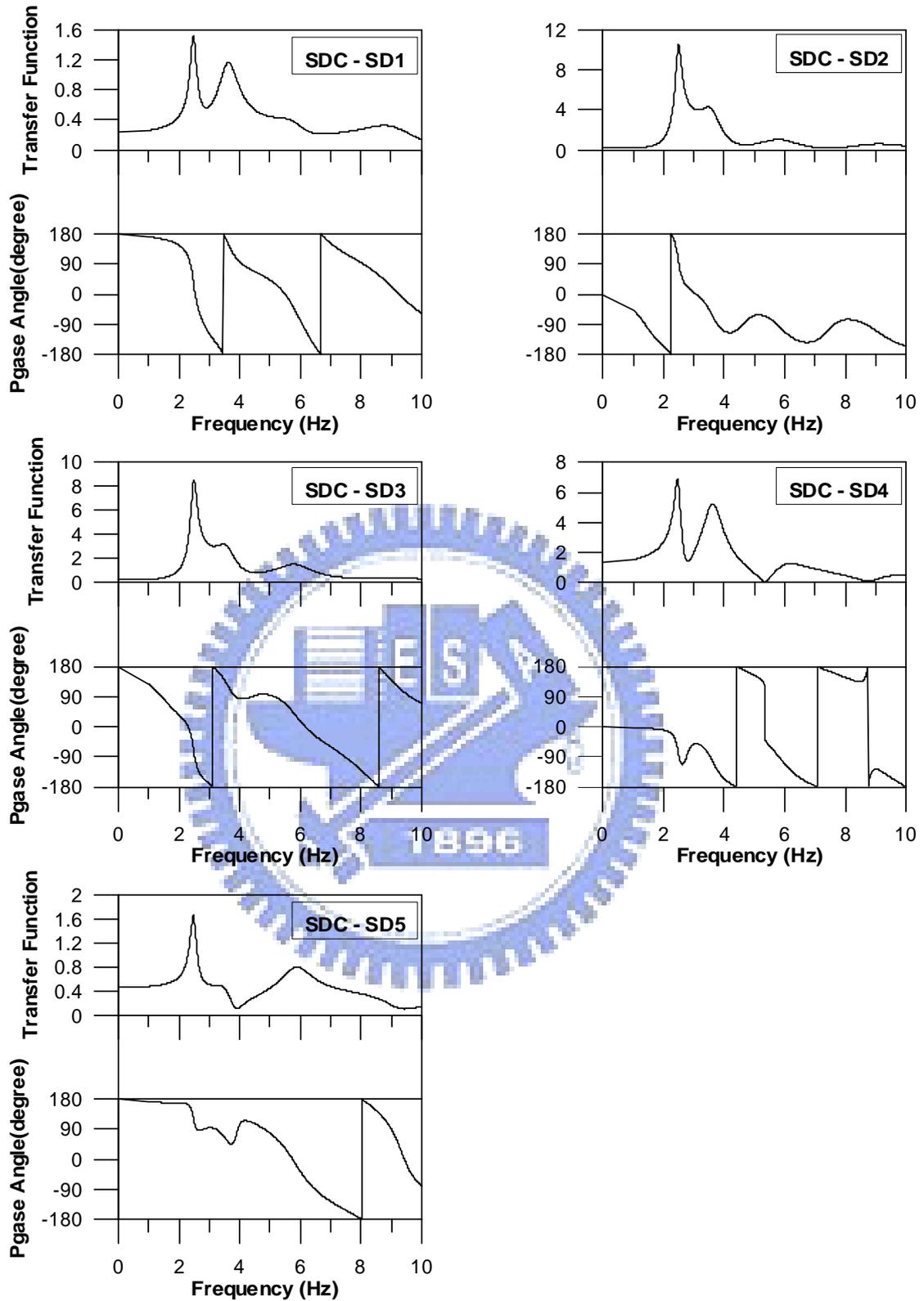


圖 3.2.3-5(c) 2003 年 12/10 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

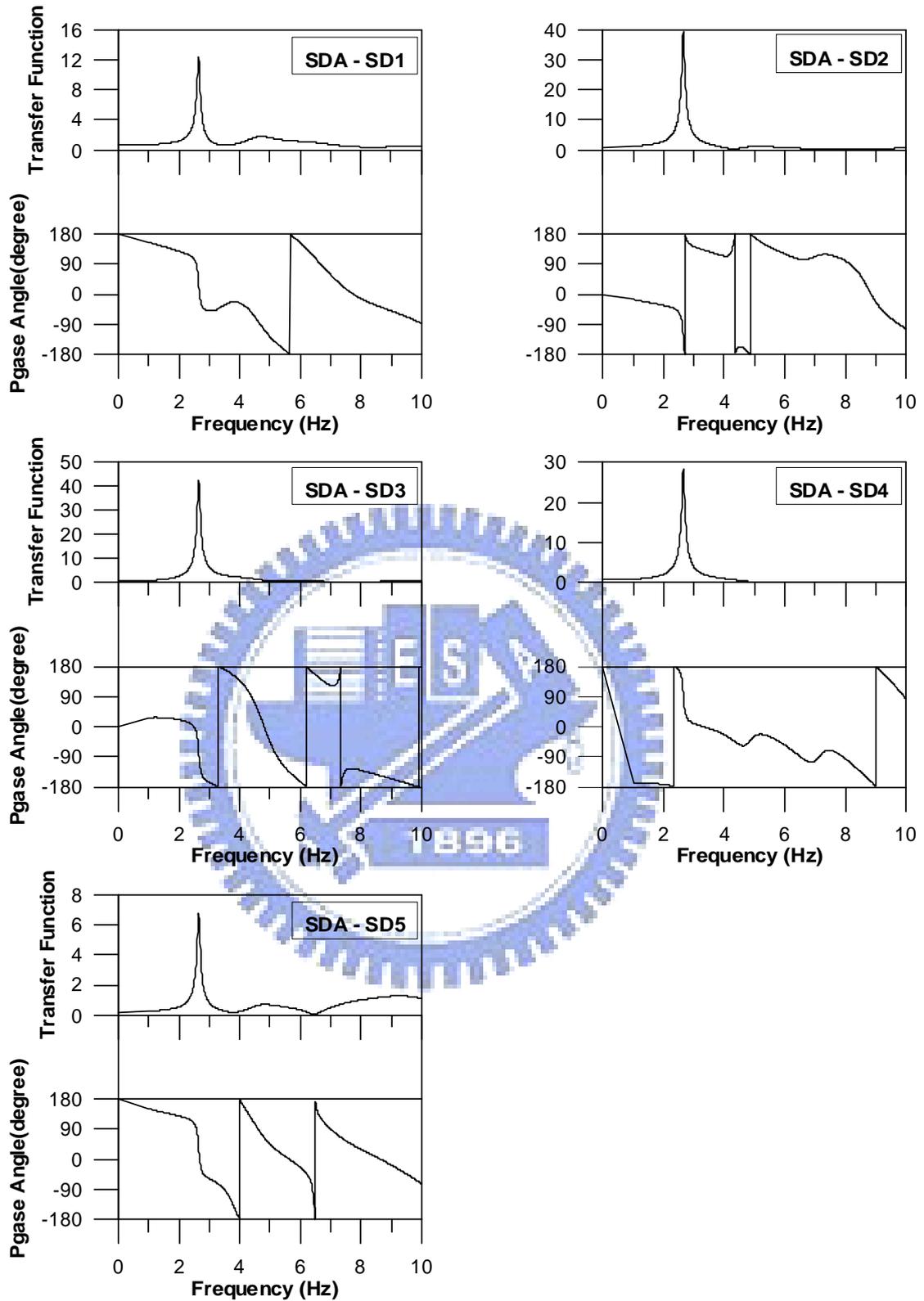


圖 3.2.3-6(a)2004 年 05/09 地震各輸入測站與 SDA 輸出之傳遞函數及其

相位角

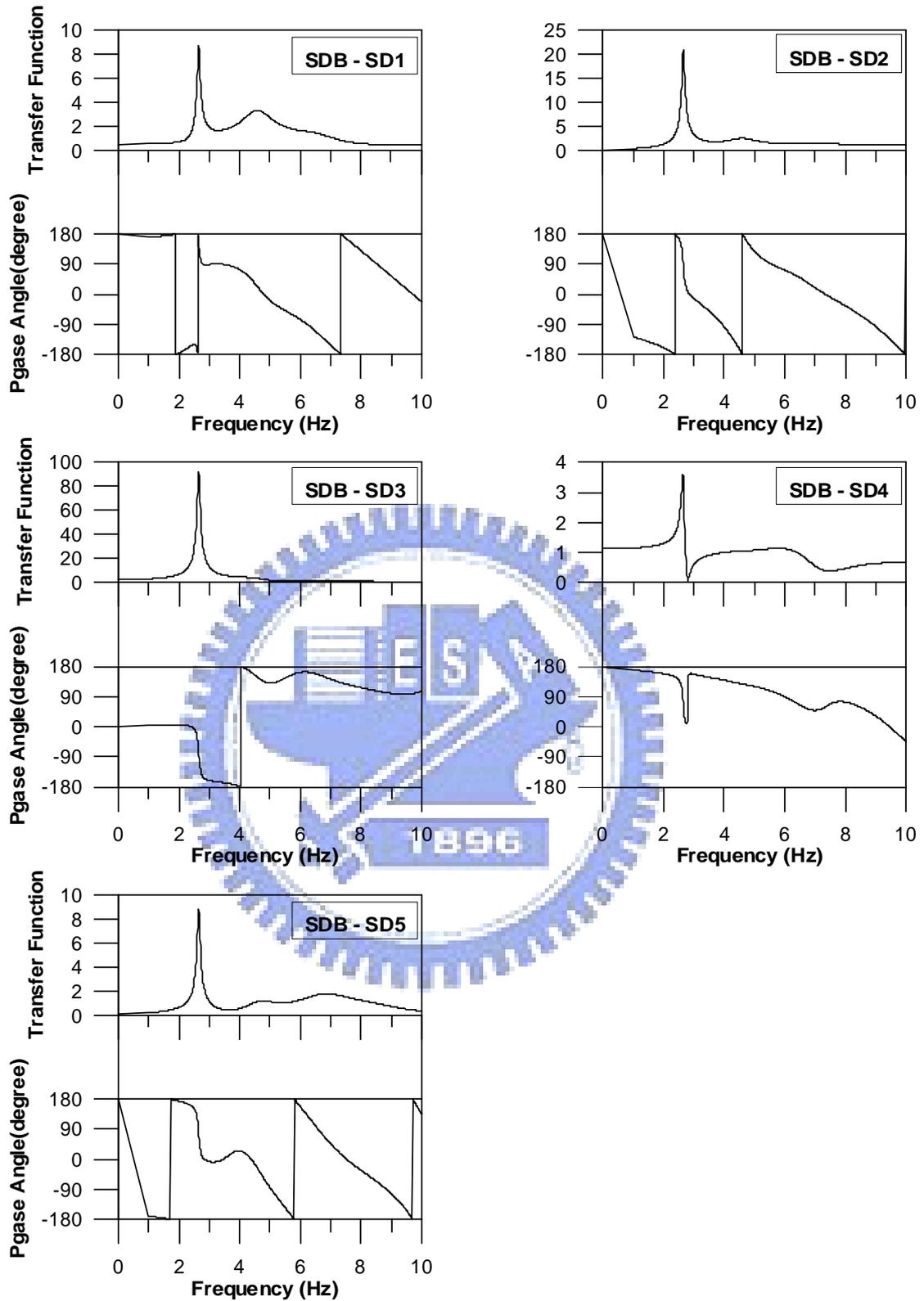


圖 3.2.3-6(b) 2004 年 05/09 地震各輸入測站與 SDB 輸出之傳遞函數及其

相位角

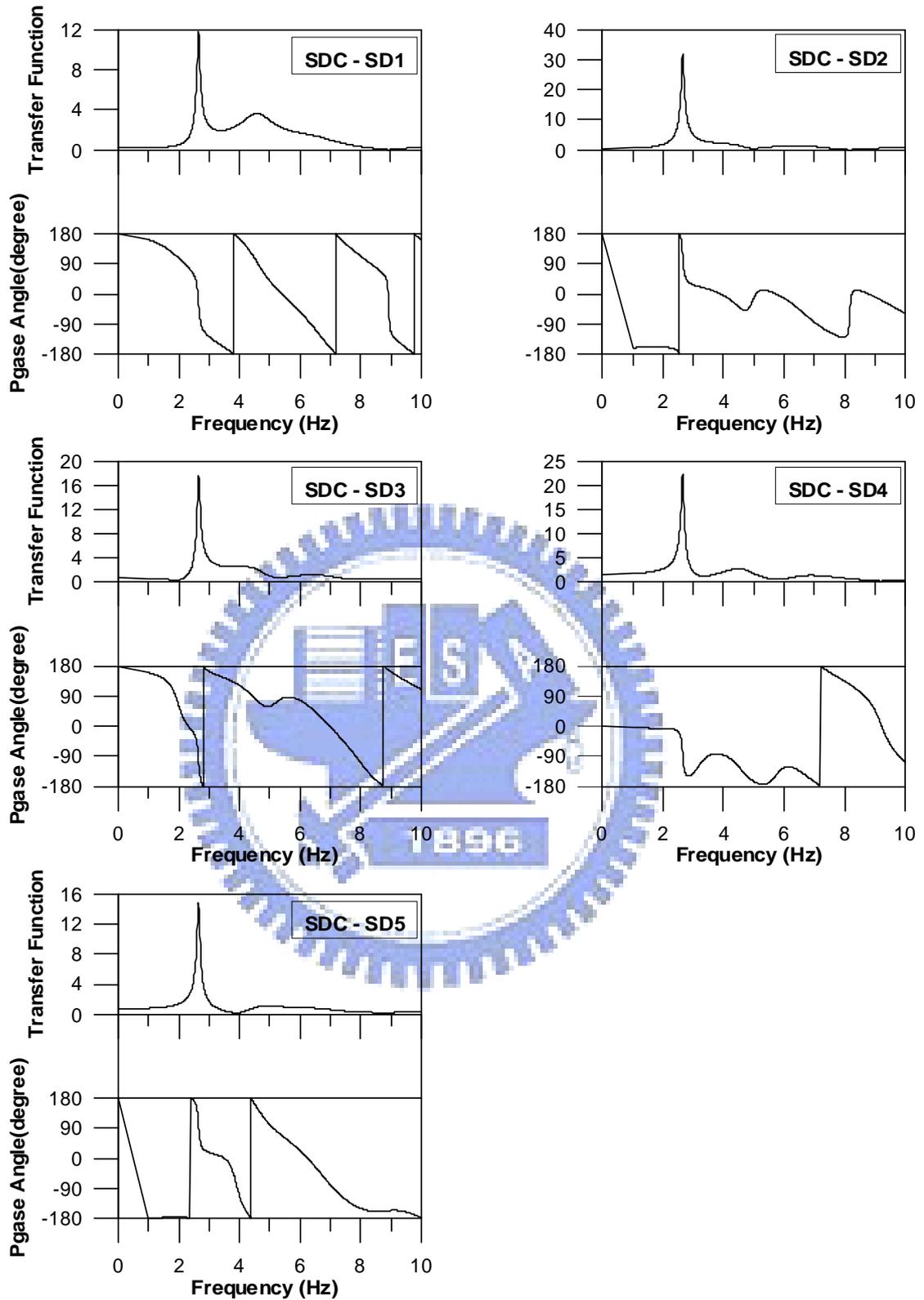


圖 3.2.3-6(c) 2004 年 05/09 地震各輸入測站與 SDC 輸出之傳遞函數及其

相位角

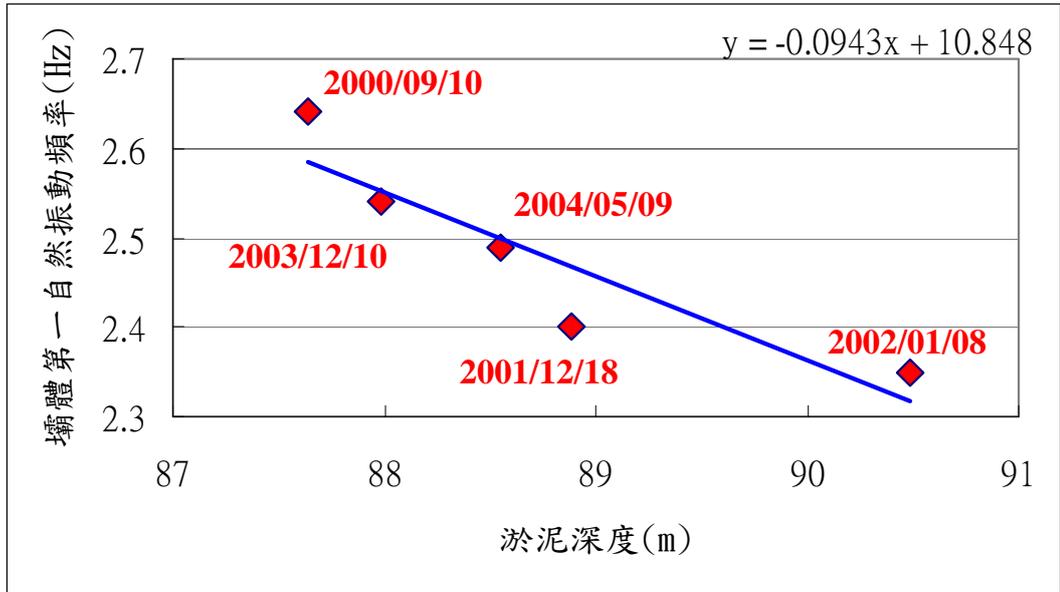


圖 3.2.3-7 淤泥深度與壩體第一自然振動頻率之關係

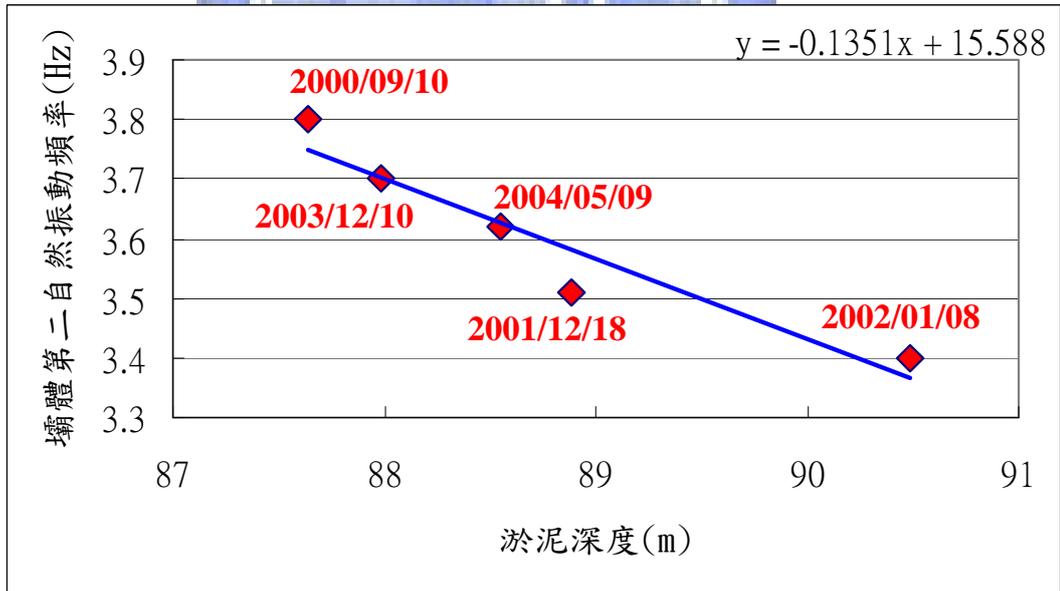


圖 3.2.3-8 淤泥深度與壩體第二自然振動頻率之關係

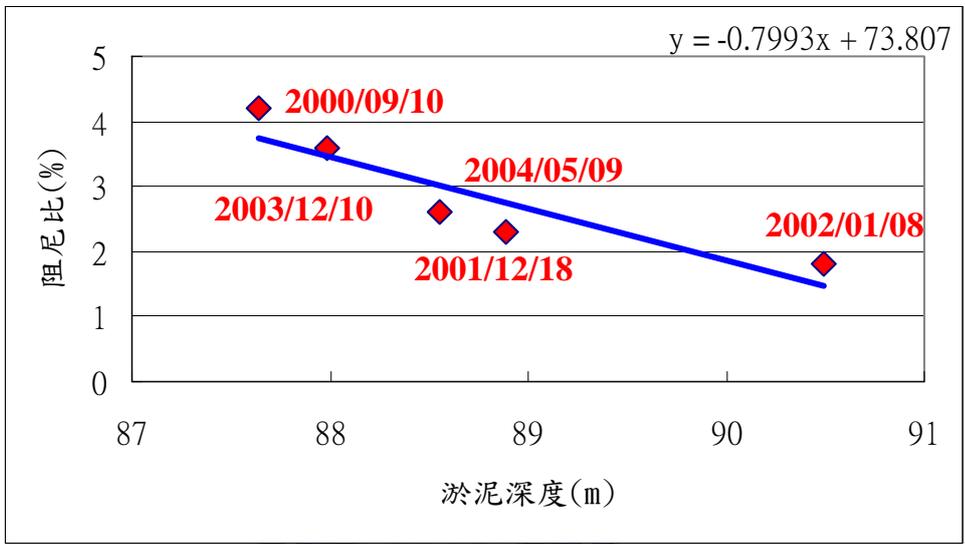


圖 3.2.3-9 淤泥深度與阻尼比之關係

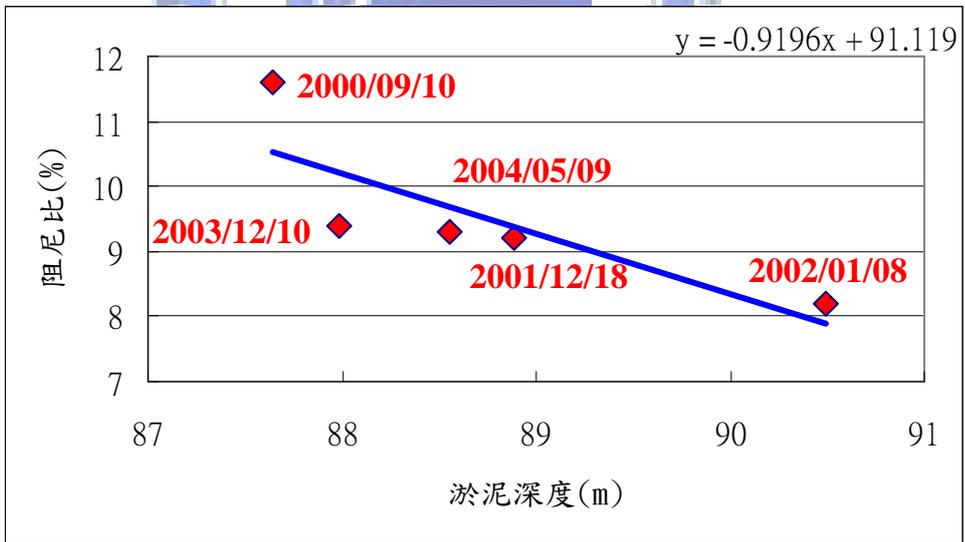


圖 3.2.3-10 淤泥深度與阻尼比之關係

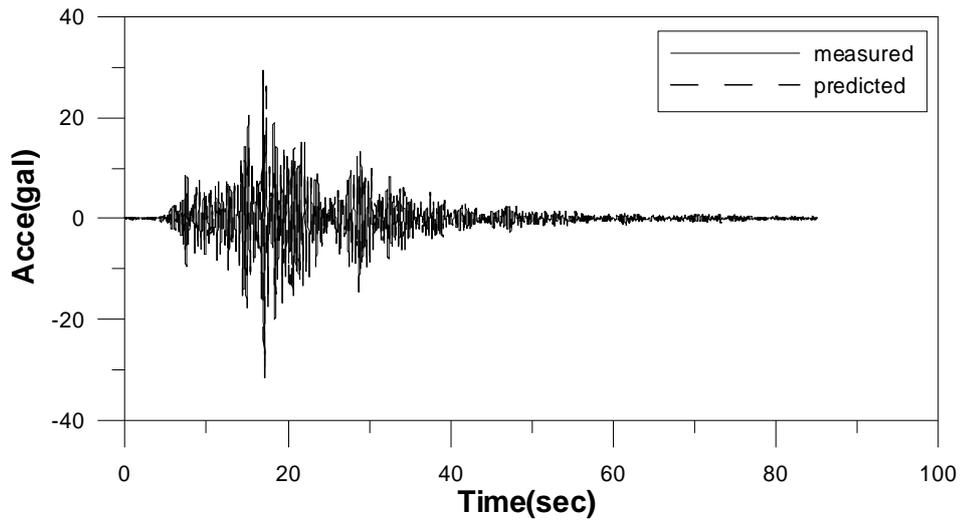


圖 3.2.3-11 2000/09/10 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

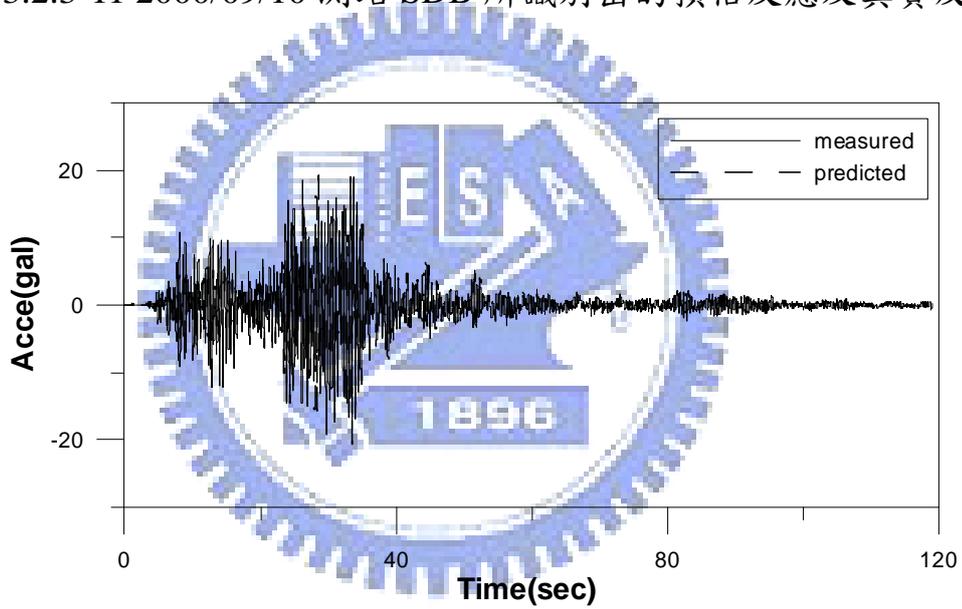


圖 3.2.3-12 2001/12/18 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

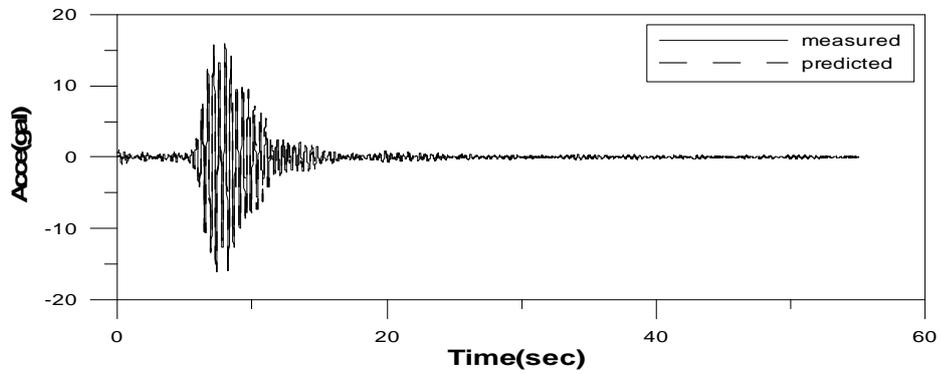


圖 3.2.3-13 2002/01/08 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

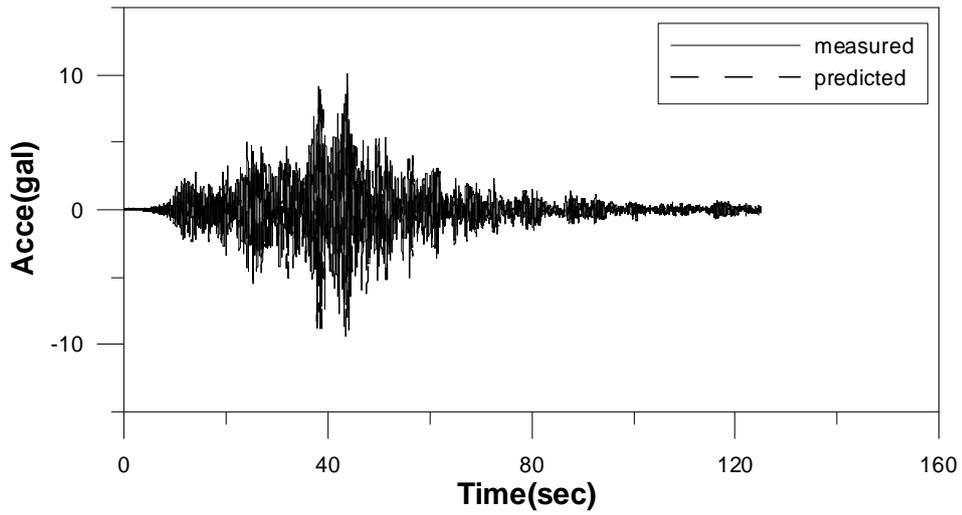


圖 3.2.3-14 2003/12/10 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

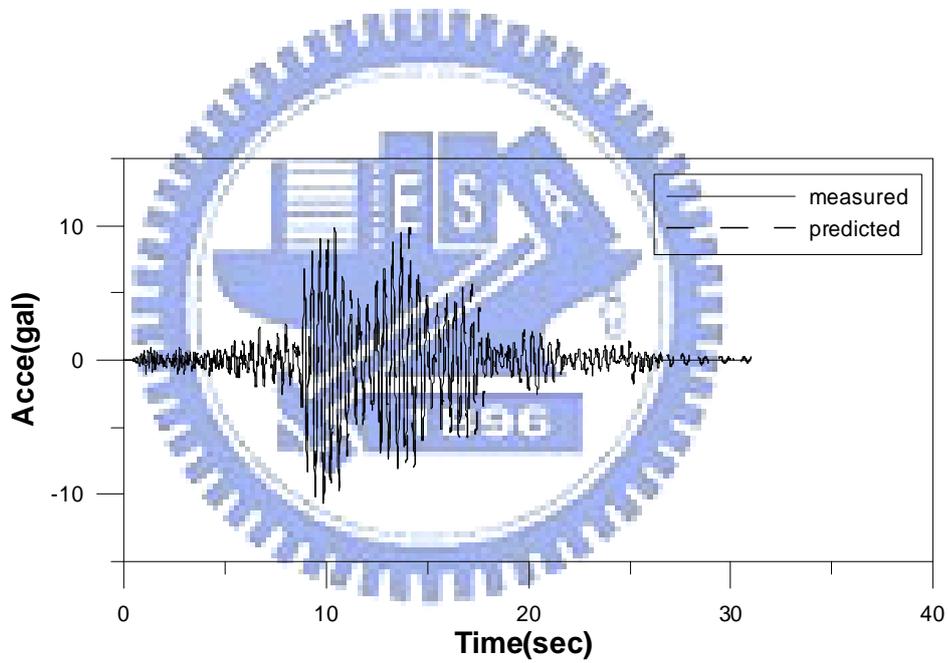


圖 3.2.3-15 2004/05/09 測站 SDB 所識別出的預估反應及真實反應

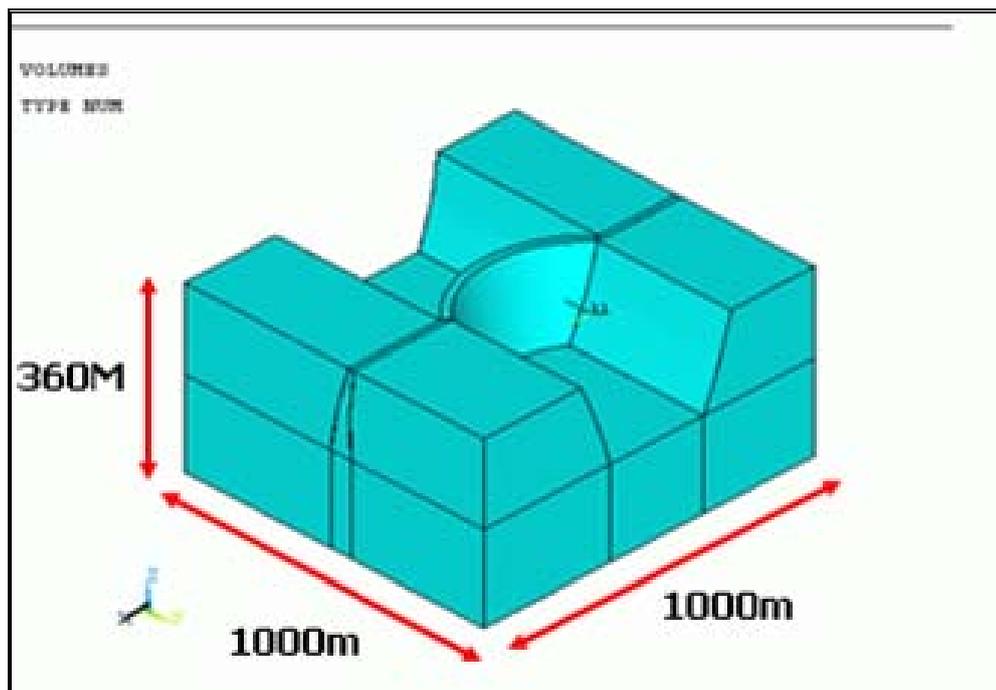


圖 4.3.1-1 翡翠水庫周圍岩盤示意圖

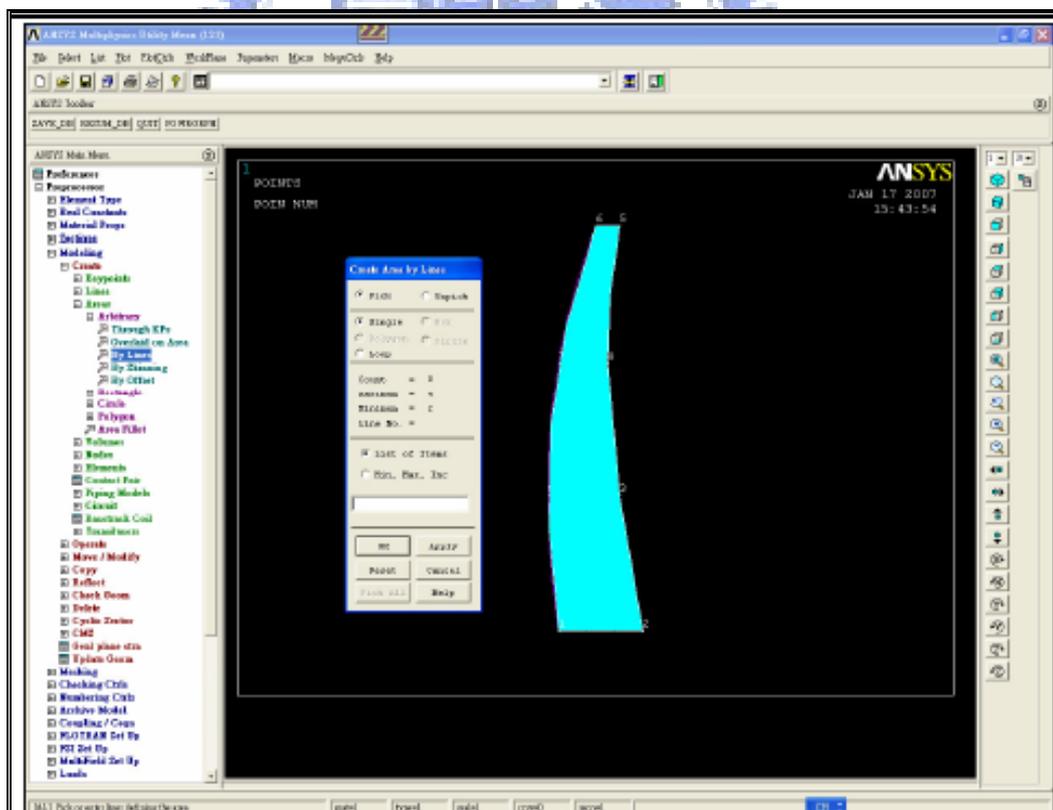


圖 4.3.1-2 壩體側面特徵分析(area)

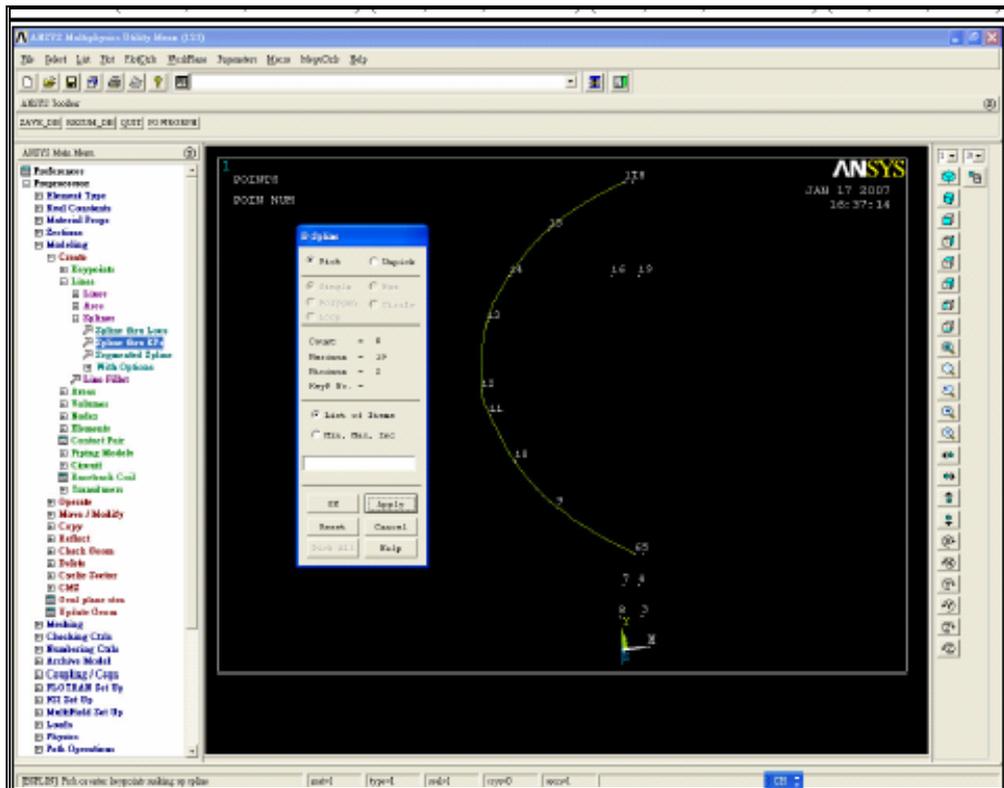


圖 4.3.1-3 壩體頂面特徵弧線建立

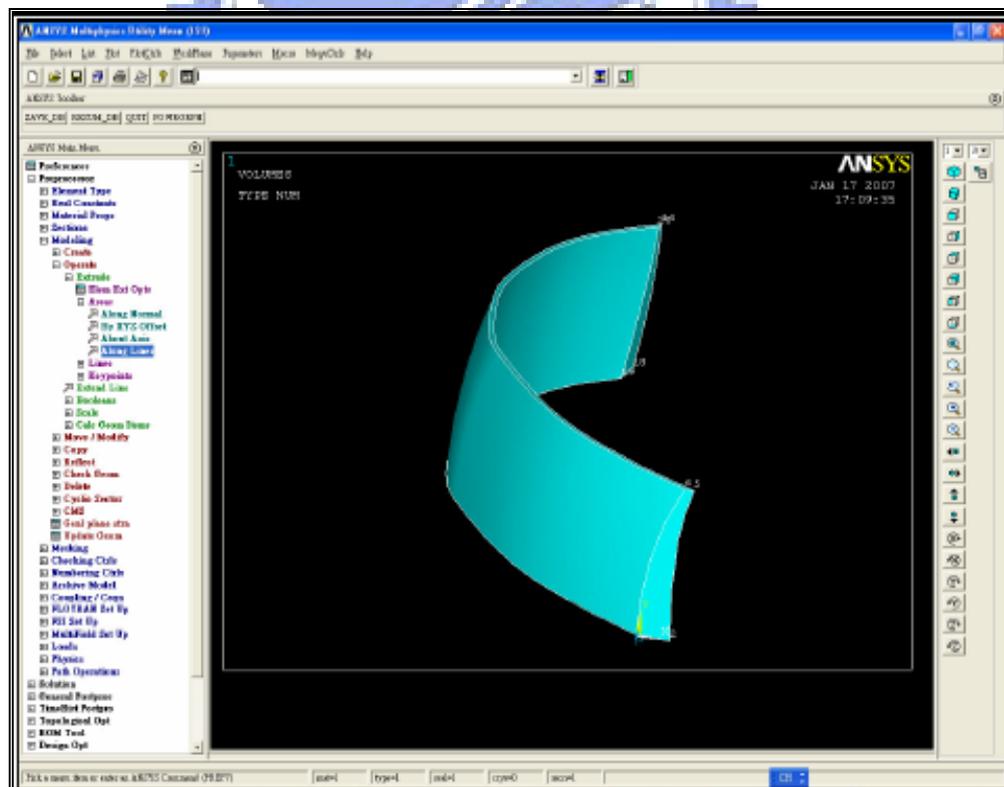


圖 4.3.1-4 壩體體積特徵建立(尚未修正體積)

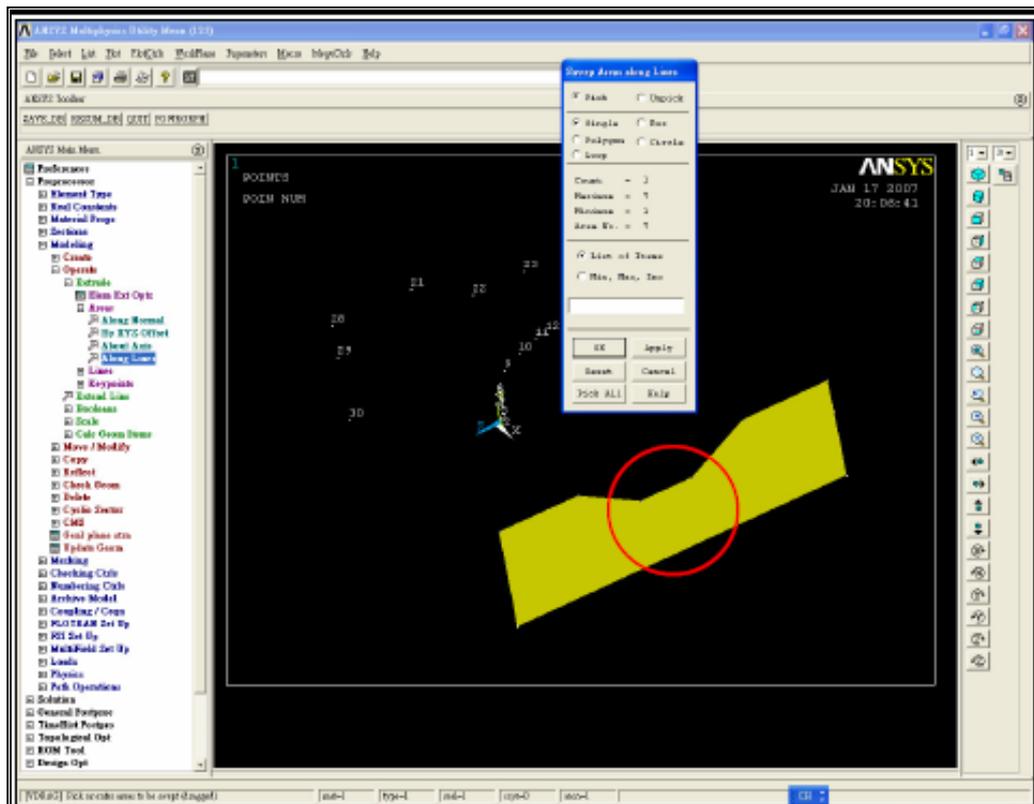


圖 4.3.1-5 岩盤體積特徵建立(正面投影完成)

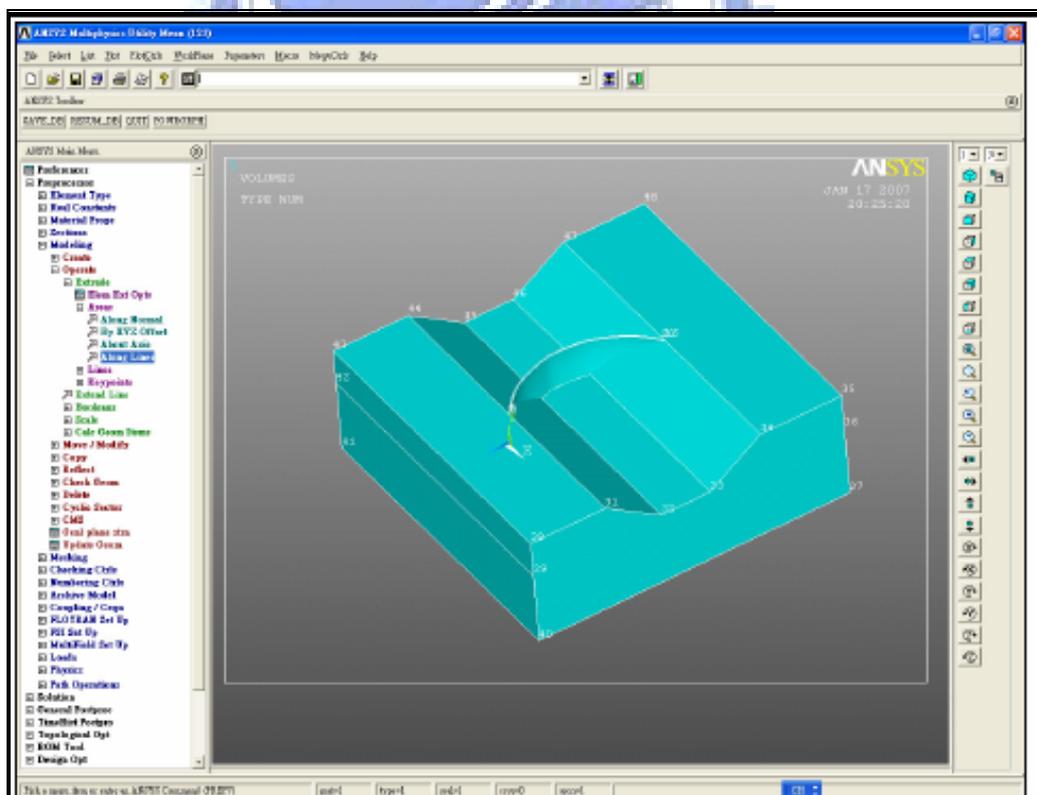


圖 4.3.1-6 岩盤體積特徵建立完成

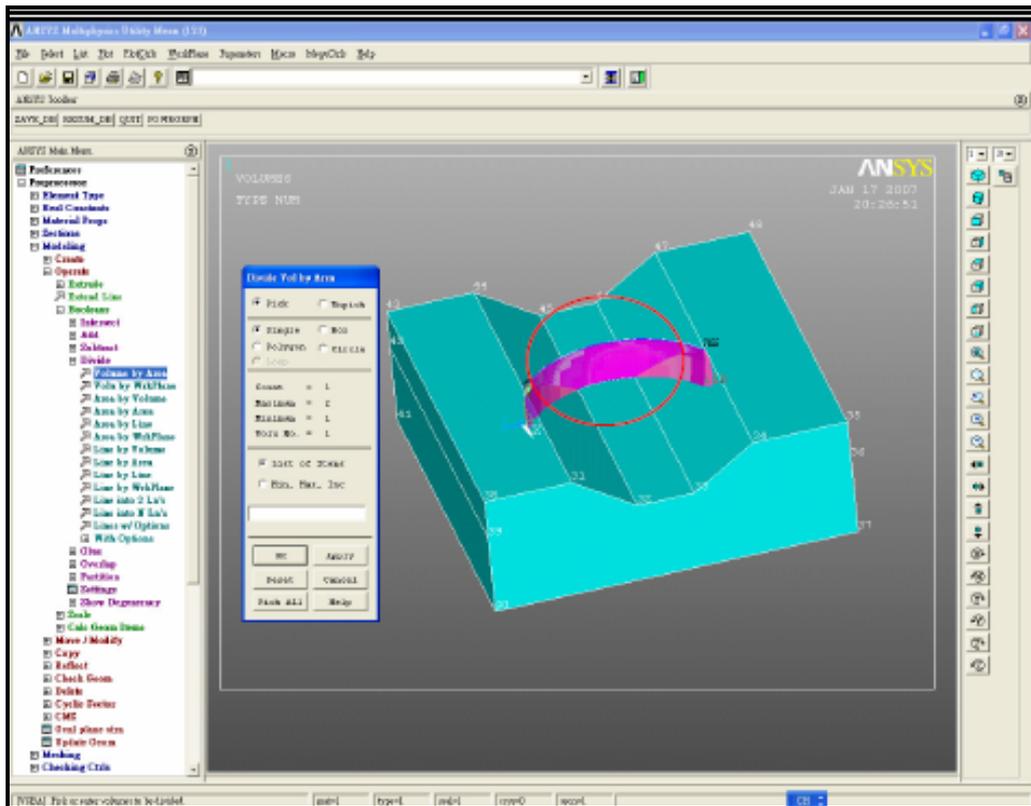


圖 4.3.1-7 壩體體積特徵修正

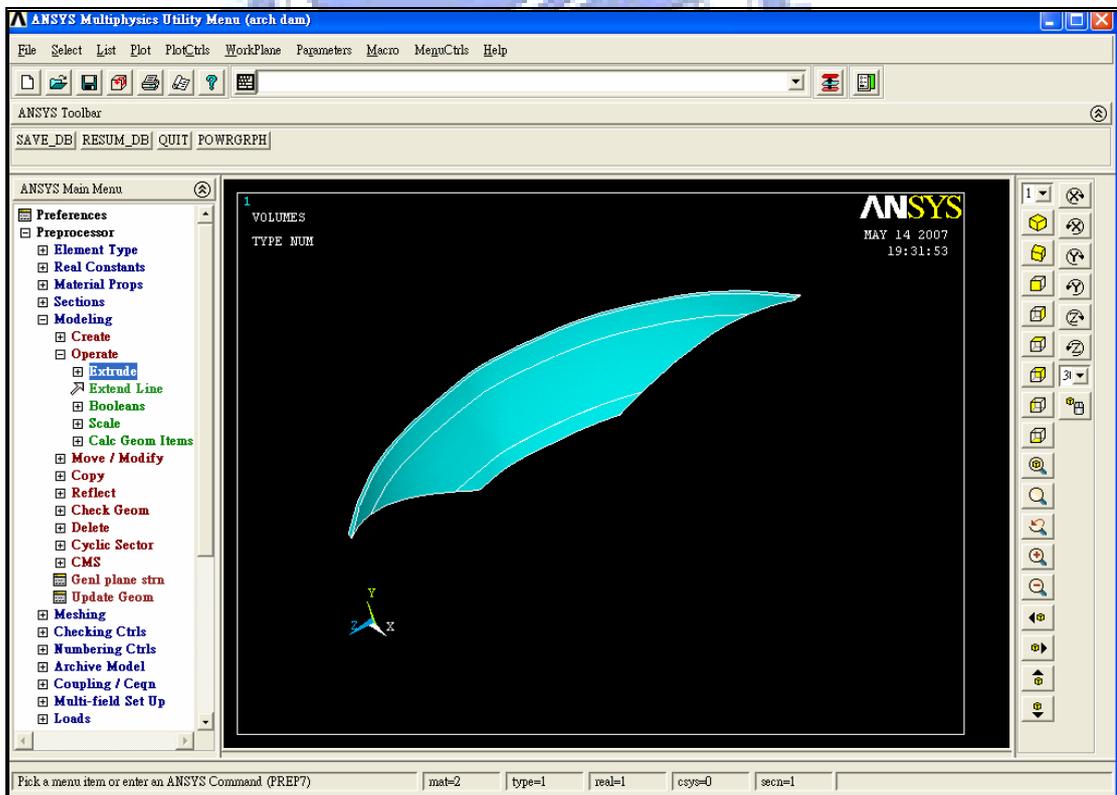


圖 4.3.1-8 壩體體積特徵修正完成

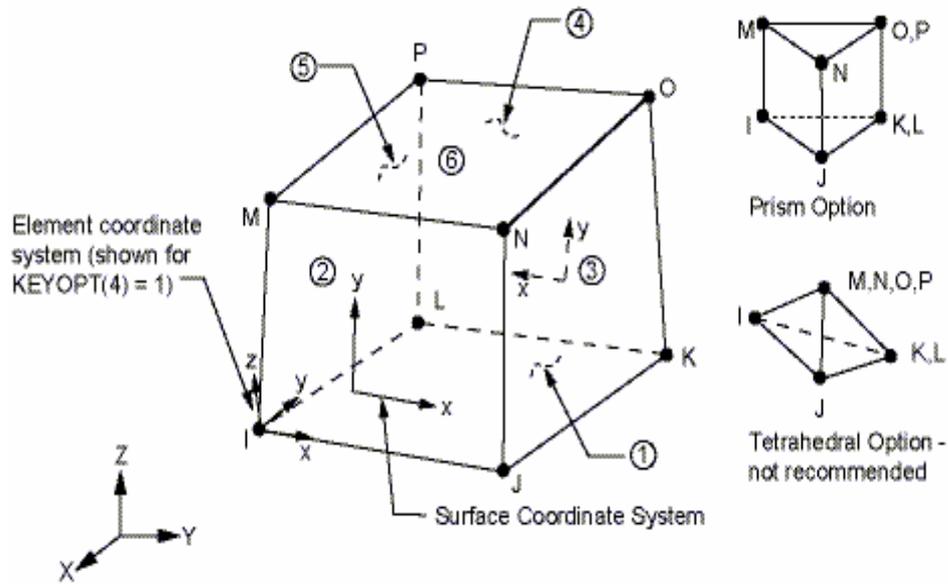


圖 4.3.2-1 SOLID45 Element

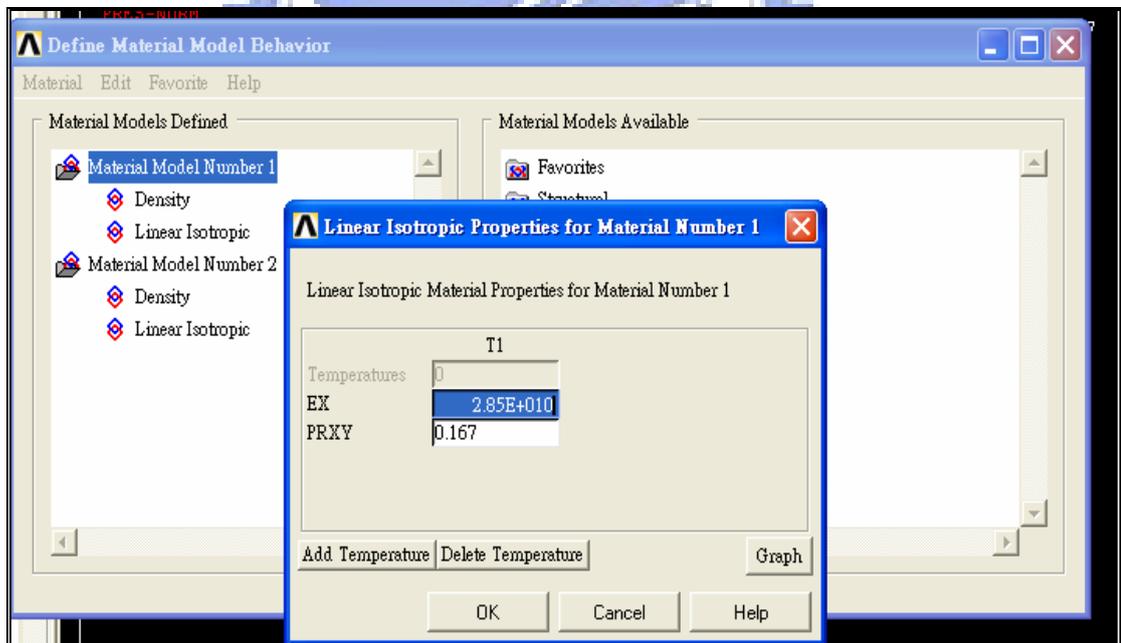


圖 4.3.3-1 壩體材料參數設定

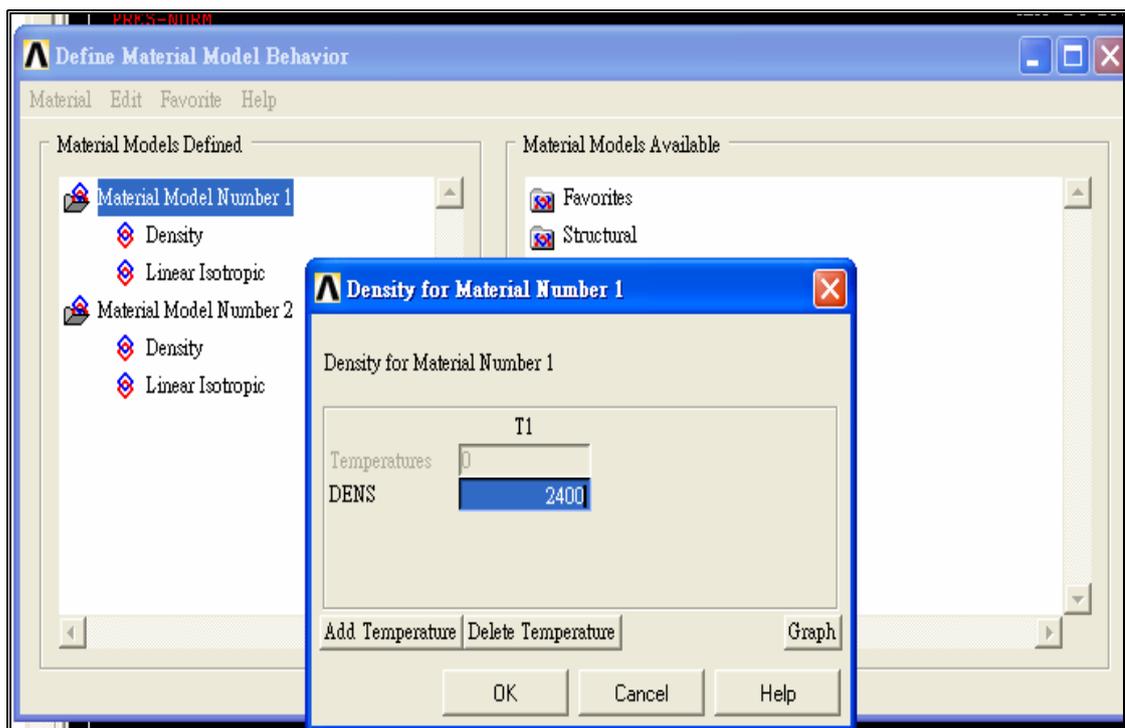


圖 4.3.3-2 壩體材料參數設定

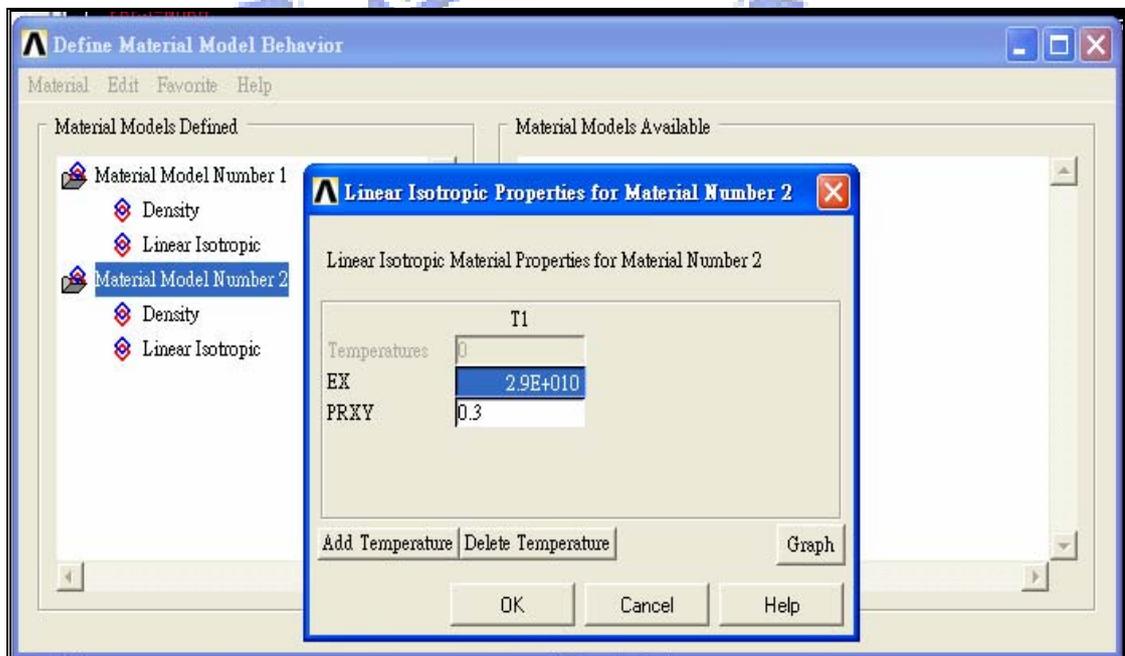


圖 4.3.3-3 岩盤材料參數設定

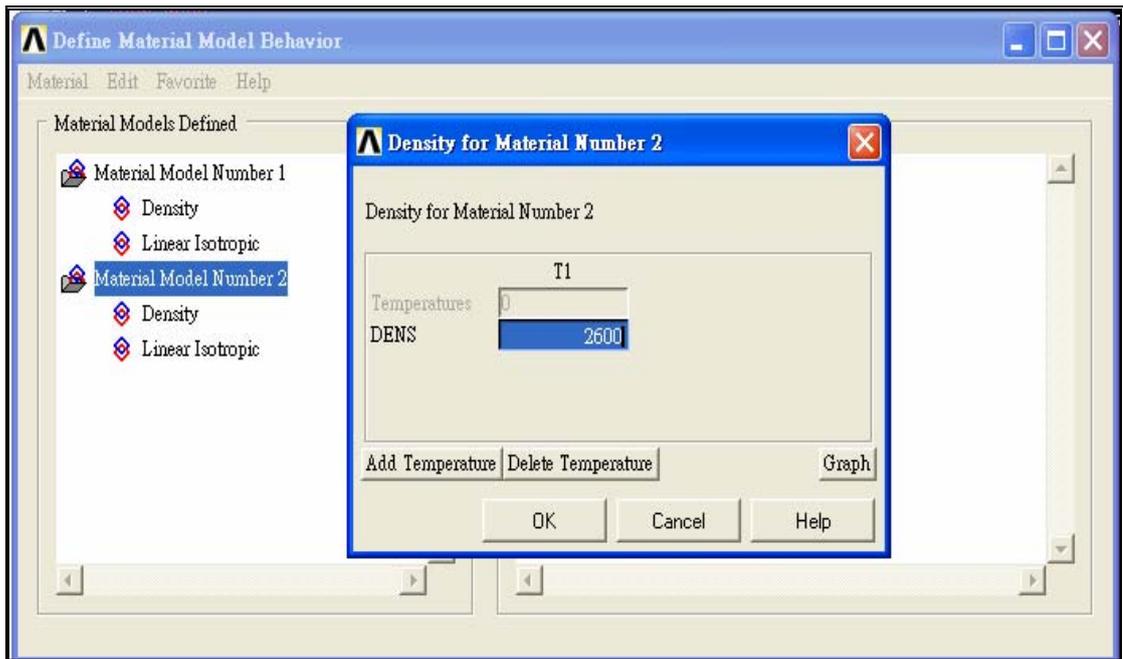


圖 4.3.3-4 岩盤材料參數設定

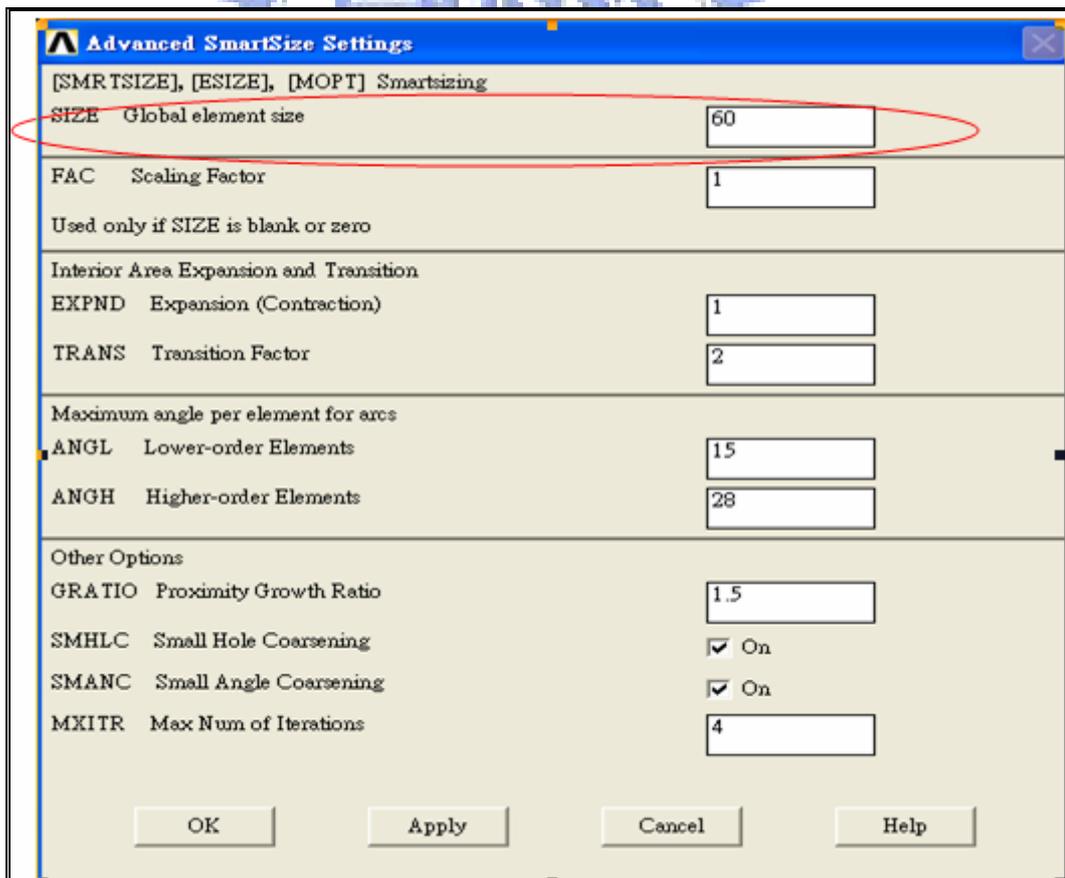


圖 4.3.4-1 壩體網格大小設定

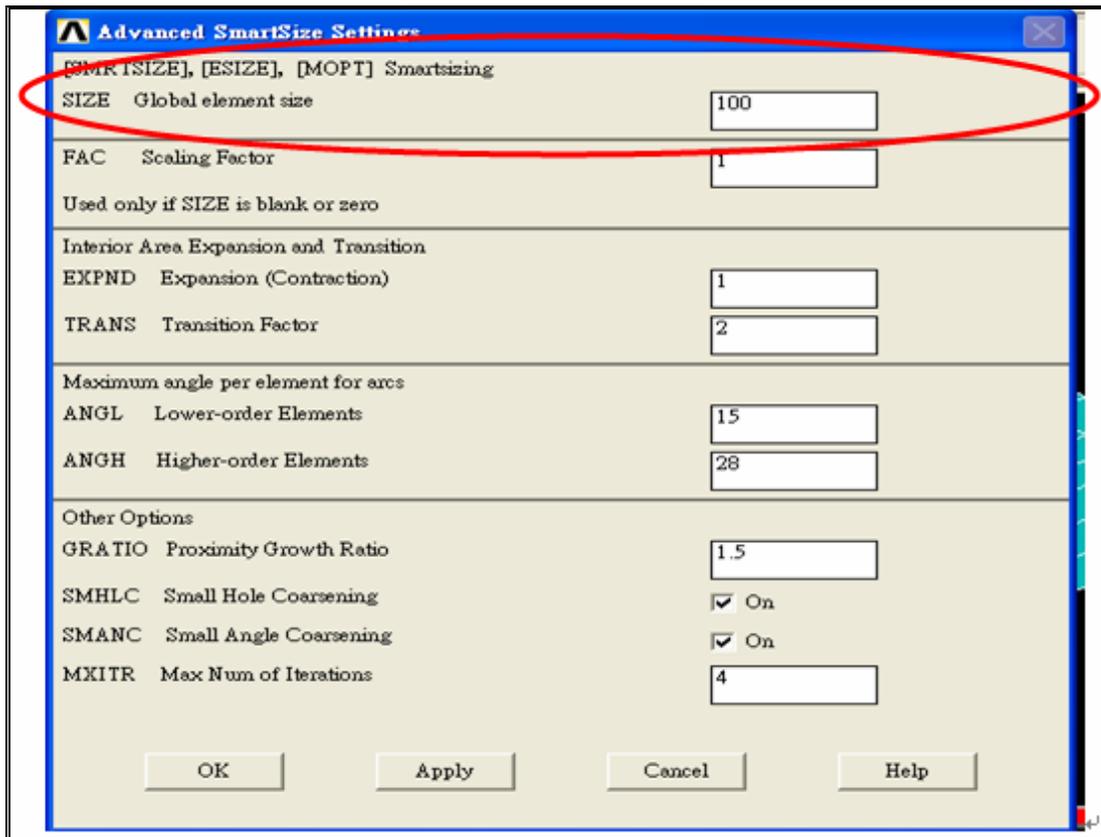


圖 4.3.4-2 岩盤網格大小設定

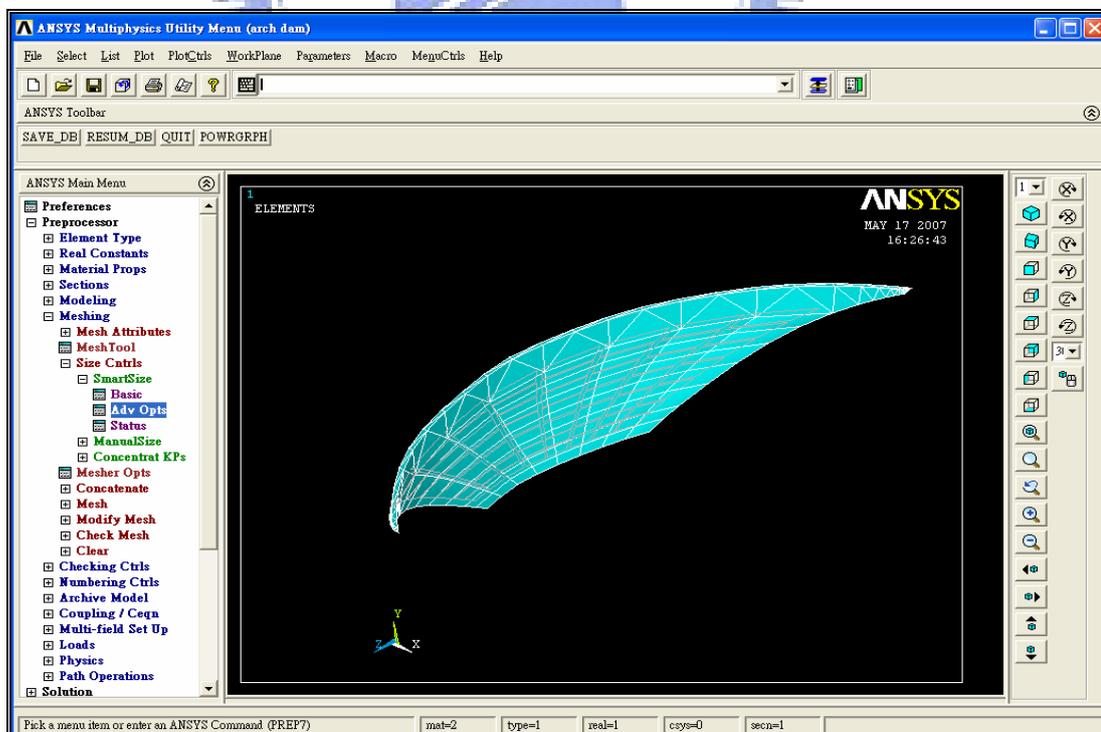


圖 4.3.4-3 壩體網格建立完成

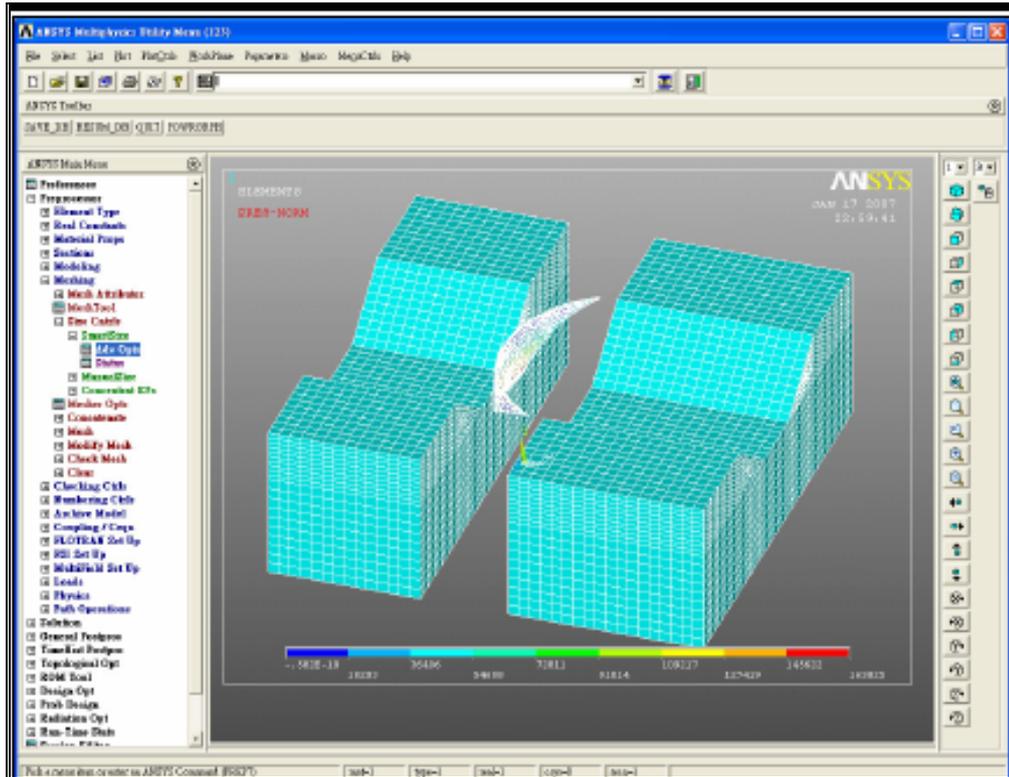


圖 4.3.4-4 岩盤網格建立完成

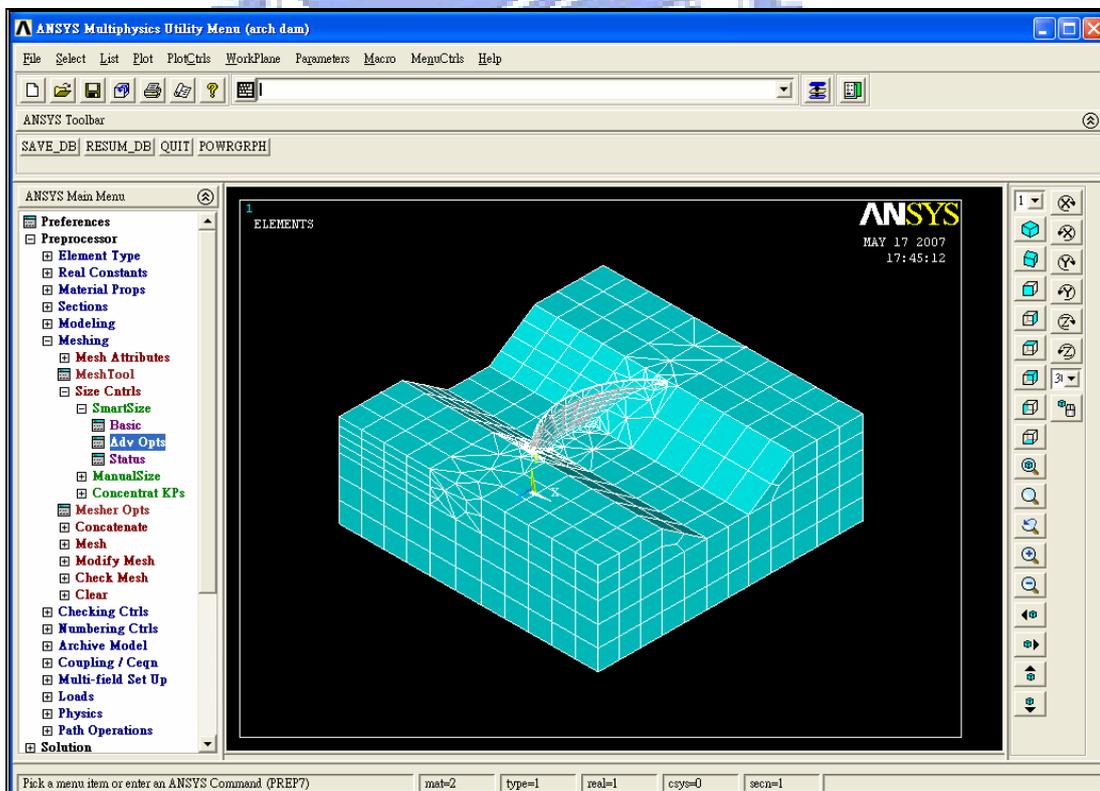


圖 4.3.4-5 水庫建立網格完成圖

ELEM	MAT	TYP	REL	ESY	SEC	NODES							
2061	2	1	1	0	1	581	582	1322	1322	410	410	410	410
2062	2	1	1	0	1	1430	1338	110	110	111	111	111	111
2063	2	1	1	0	1	576	1339	521	521	338	338	338	338
2064	2	1	1	0	1	56	15	848	848	1335	1335	1335	1335
2065	2	1	1	0	1	7	1301	1300	1300	1336	1336	1336	1336
2066	2	1	1	0	1	1424	1335	1336	1336	1299	1299	1299	1299
2067	2	1	1	0	1	1427	831	1335	1335	39	39	39	39
2068	2	1	1	0	1	1427	835	1335	1335	831	831	831	831
2069	2	1	1	0	1	1432	1434	1338	1338	58	58	58	58
2070	2	1	1	0	1	1434	1436	1437	1437	849	849	849	849
2071	2	1	1	0	1	1434	1435	1321	1321	1338	1338	1338	1338
2072	2	1	1	0	1	23	1424	1299	1299	1335	1335	1335	1335
2073	2	1	1	0	1	1423	1302	1301	1301	1337	1337	1337	1337
2074	2	1	1	0	1	1430	1423	111	111	110	110	110	110
2075	2	1	1	0	1	1423	1302	1339	1339	338	338	338	338
2076	2	1	1	0	1	836	858	835	835	1335	1335	1335	1335

圖 4.3.4-6 網格元素資料視窗圖

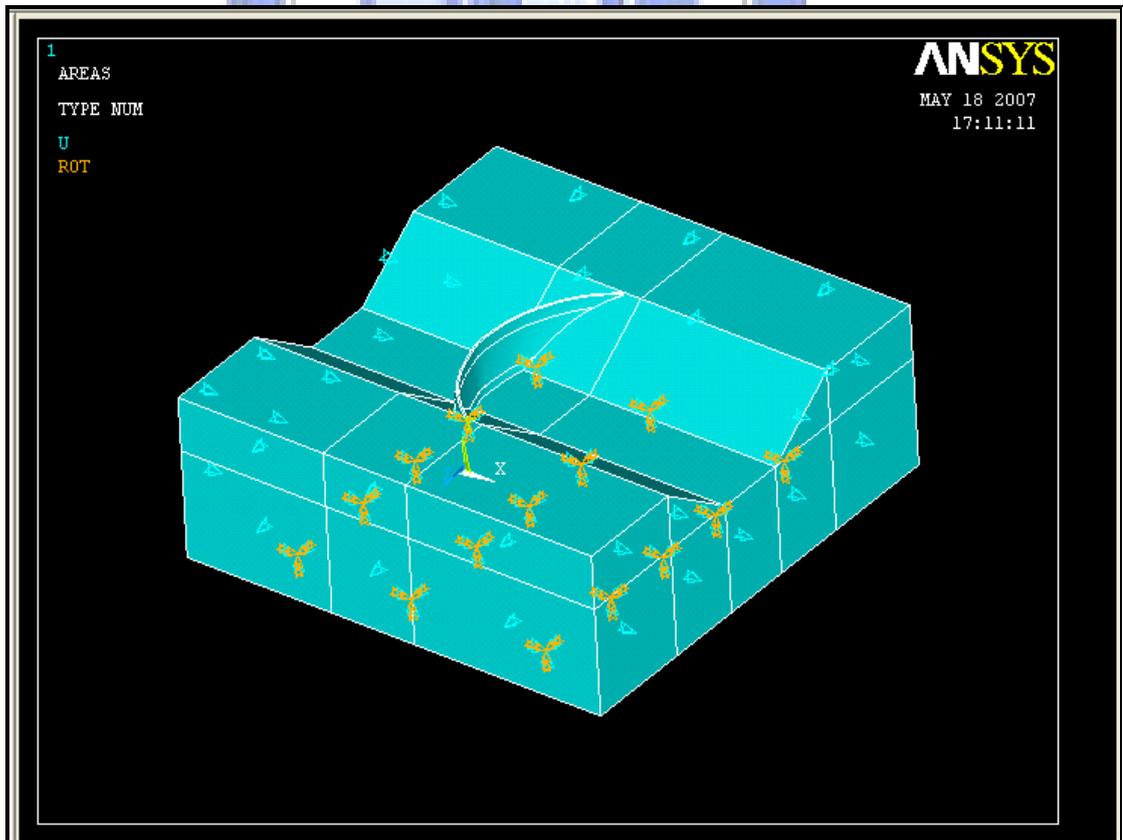


圖 4.3.5-1 模型邊界條件圖示

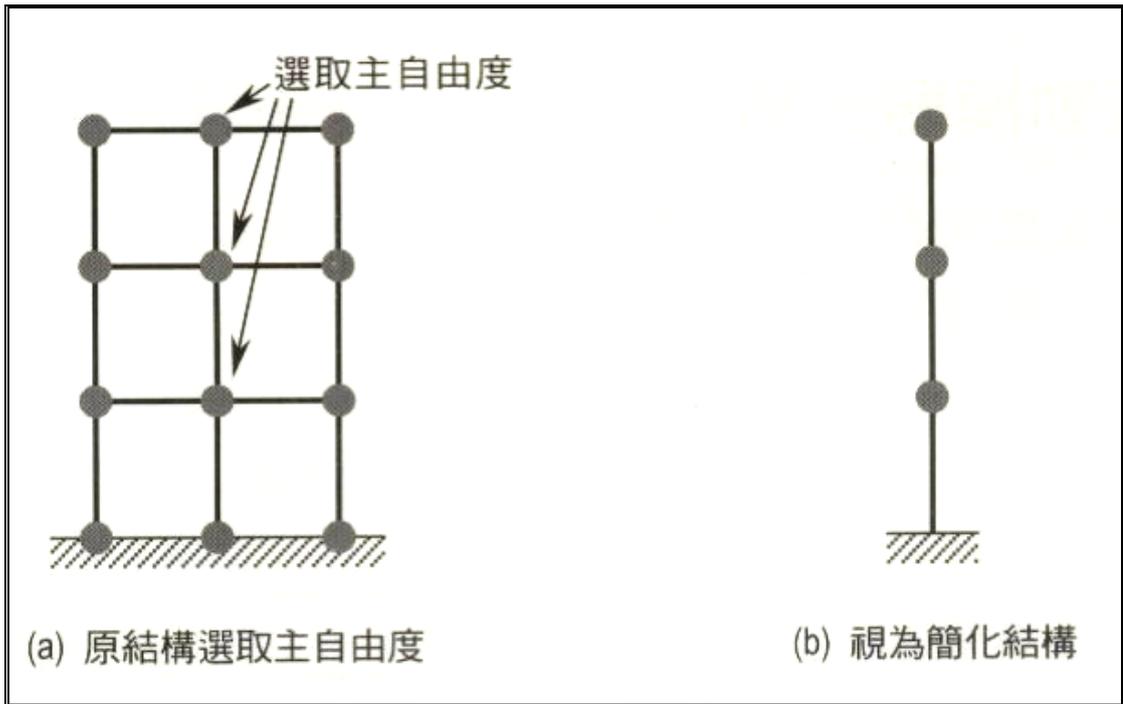


圖 4.4.1-1 降階法模態示意圖

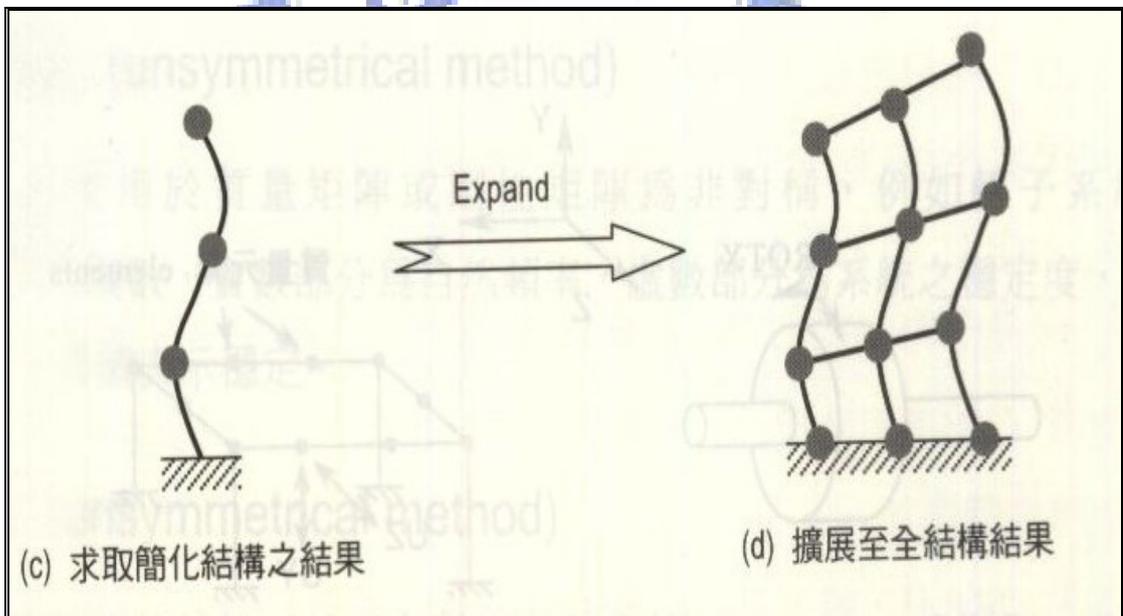


圖 4.4.1-2 降階法模態示意圖

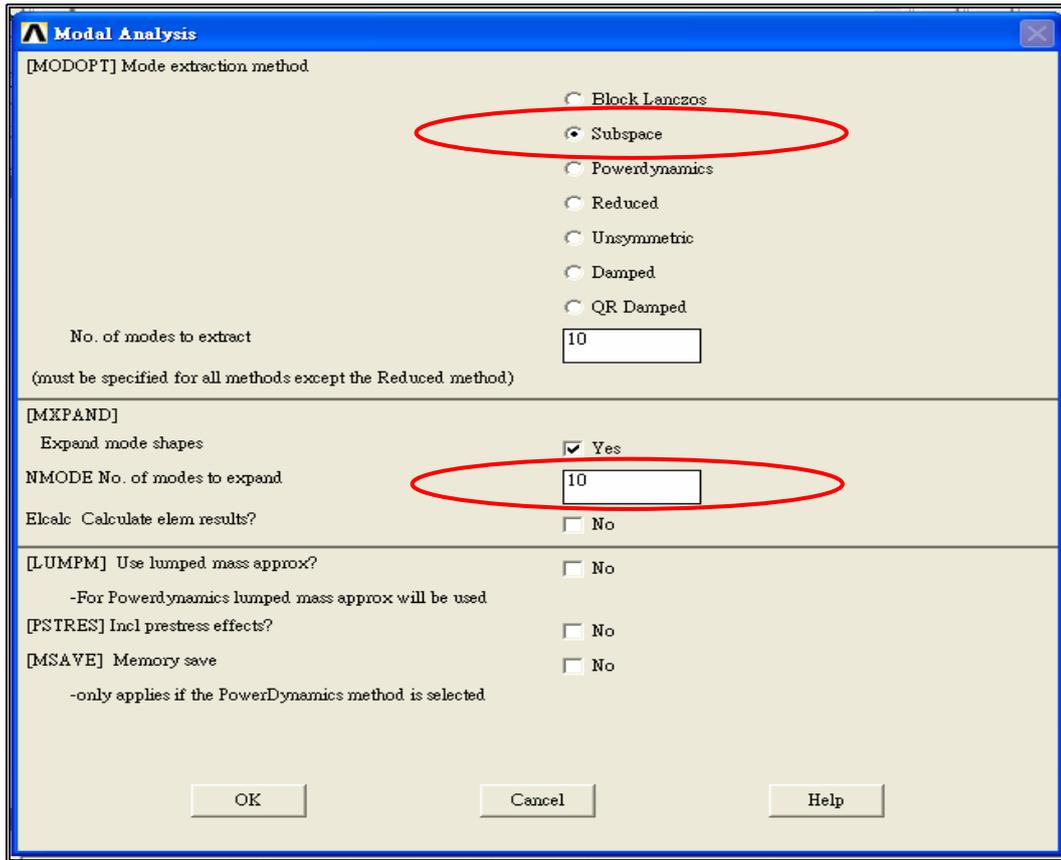


圖 4.4.1-3 模態分析參數設定

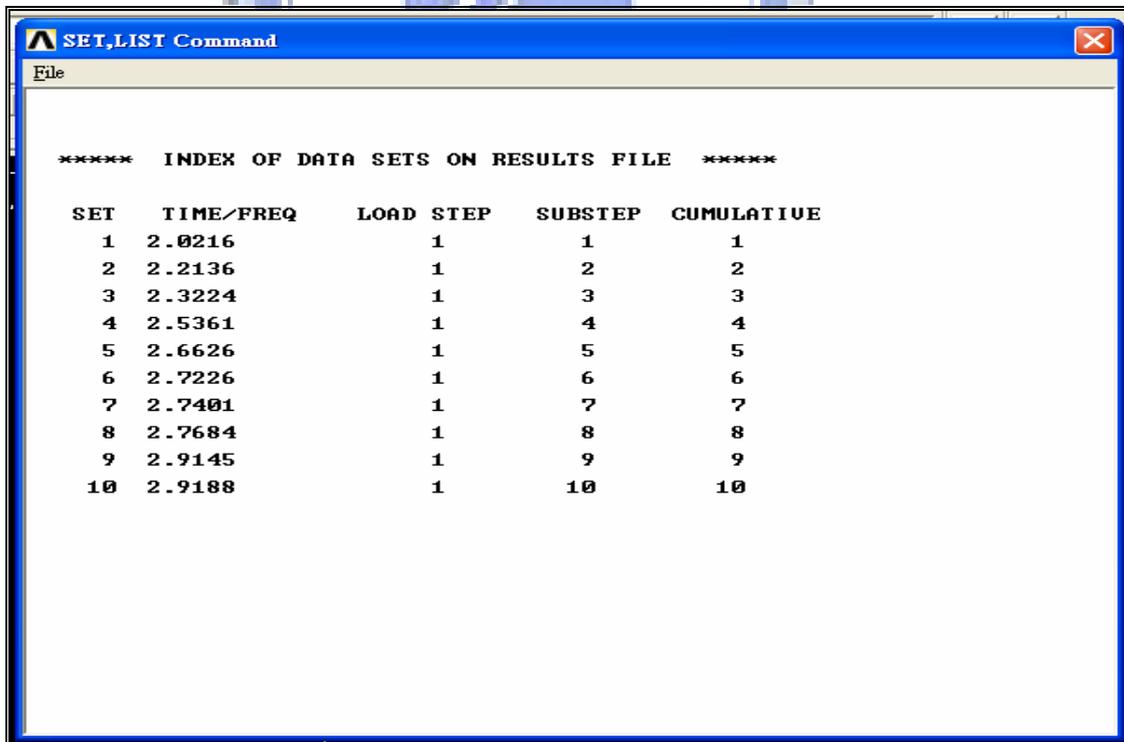


圖 4.4.1-4 模態分析結果摘要

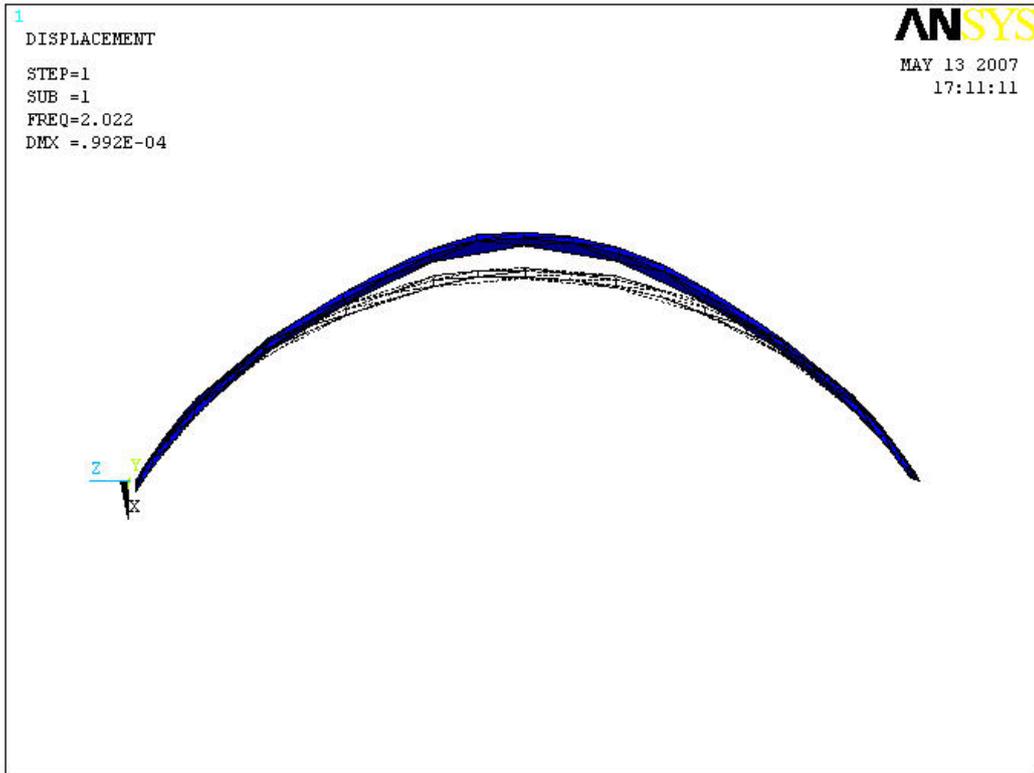


圖 4.4.1-5 翡翠水庫第一模態(2.02Hz)

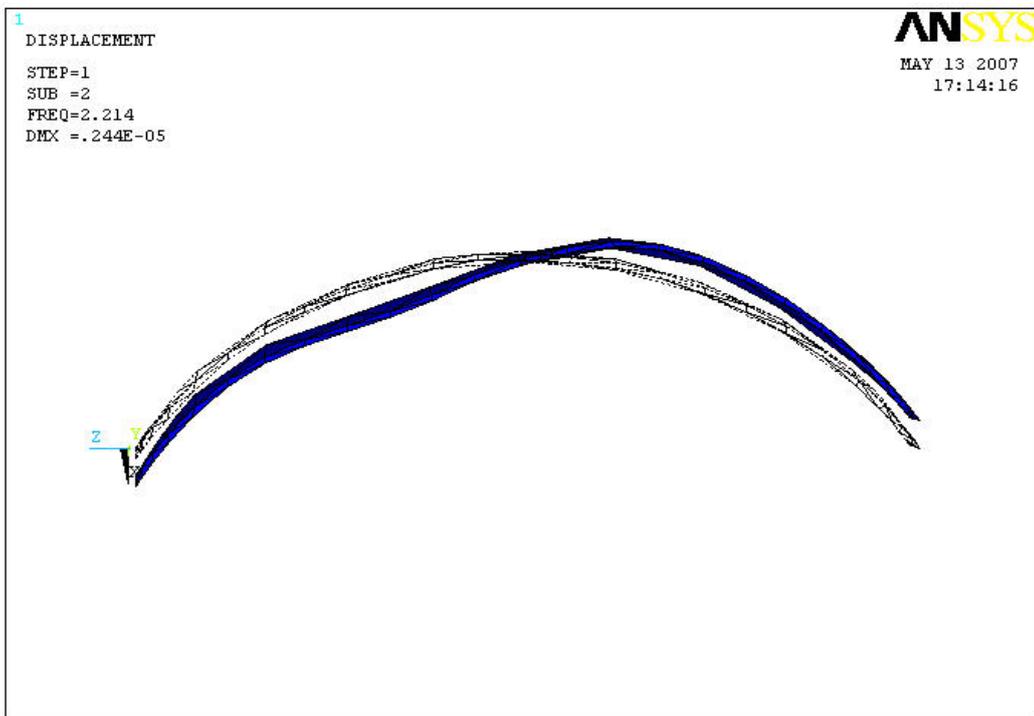


圖 4.4.1-6 翡翠水庫第二模態(2.21Hz)

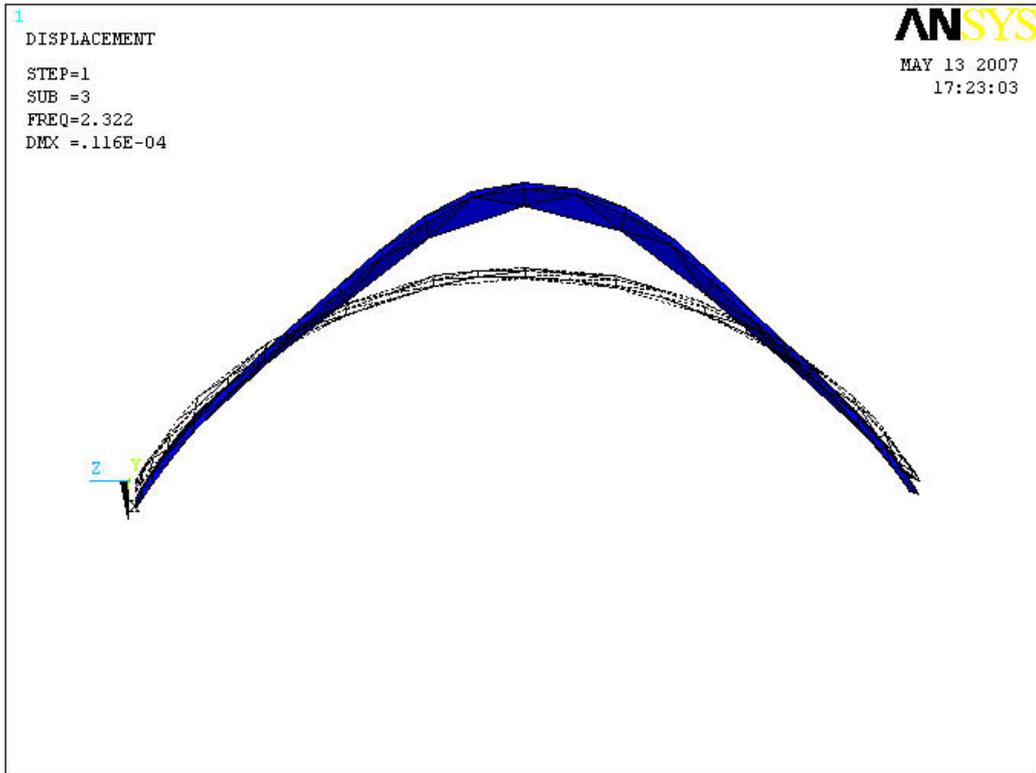


圖 4.4.1-7 翡翠水庫第三模態(2.32Hz)

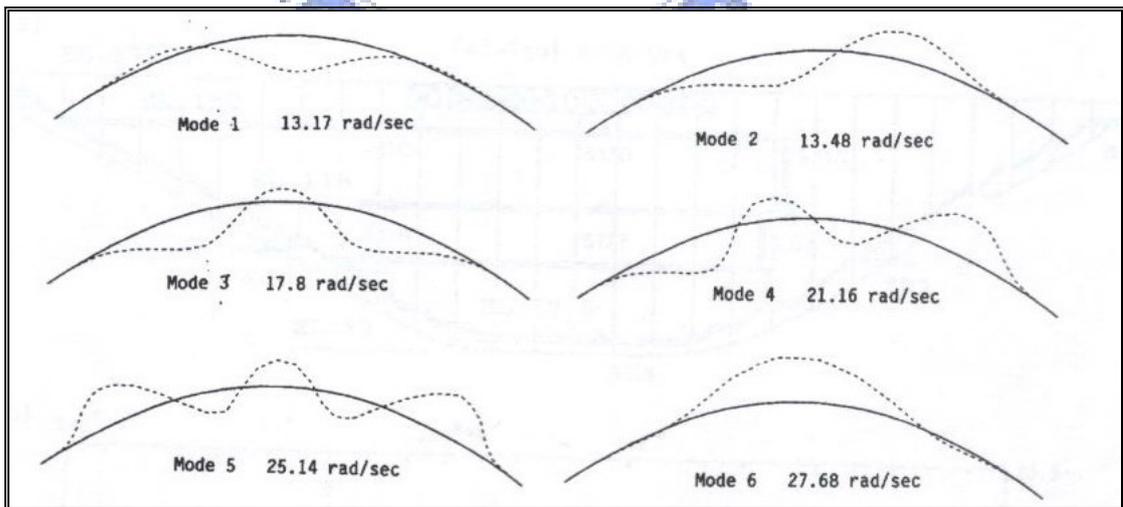


圖 4.4.1-8 翡翠水庫 SAPIV 模態圖

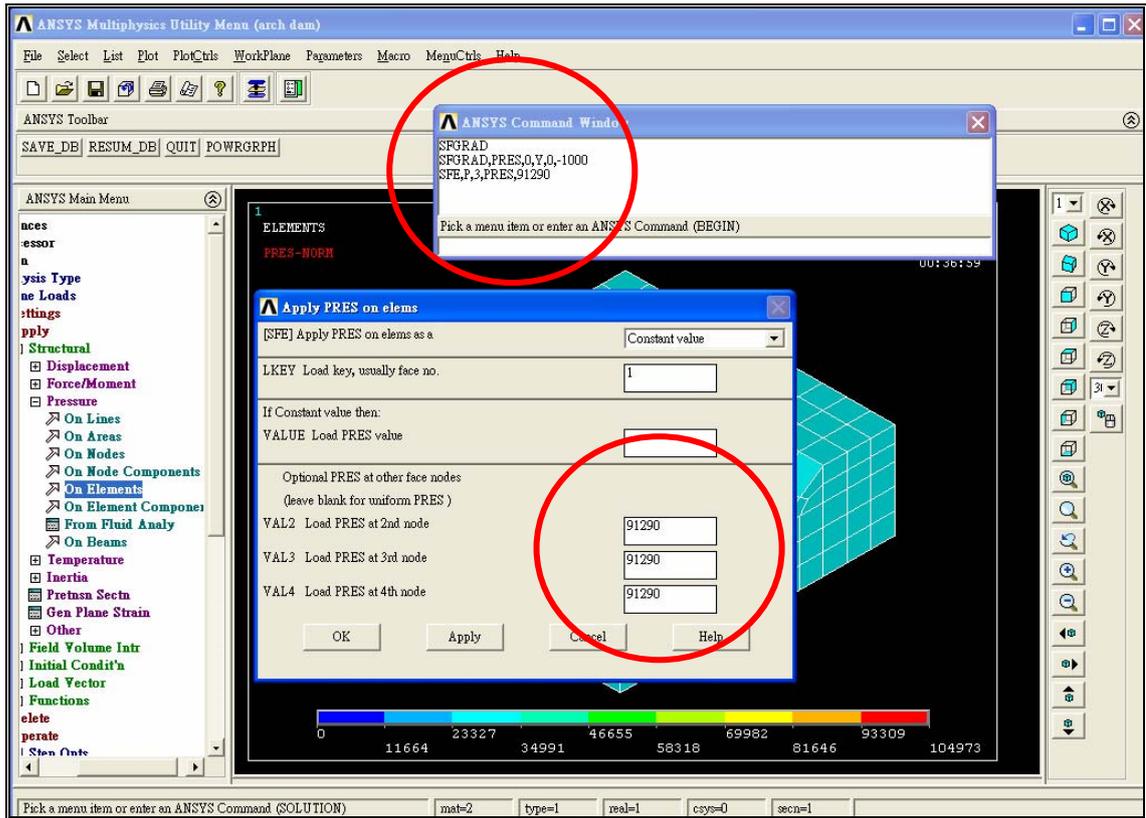


圖 4.4.2.1-1 ANSYS 施加水壓力視窗

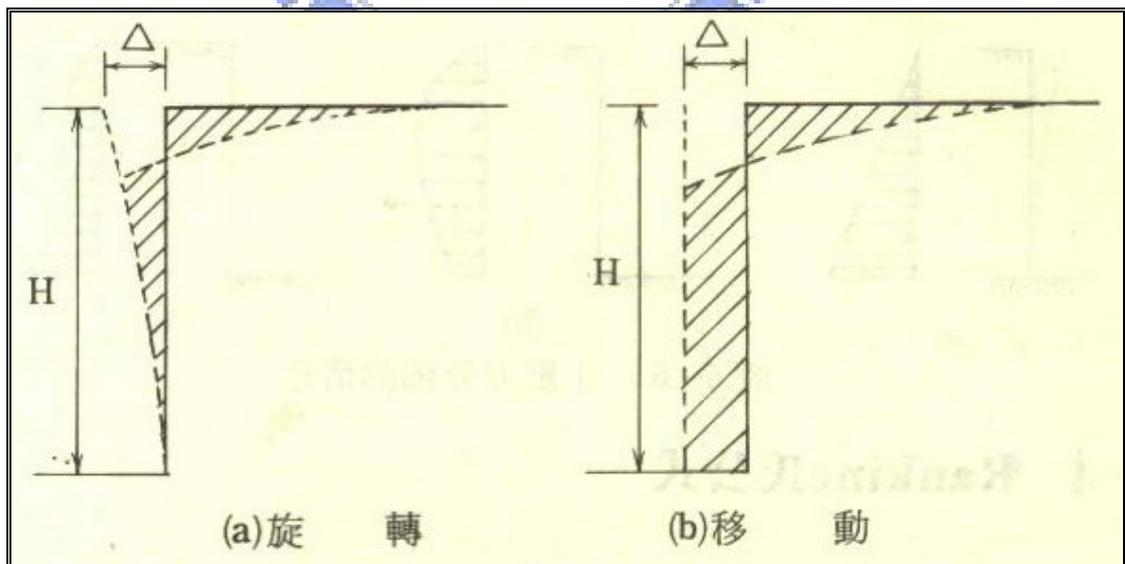


圖 4.4.2.1-2 擋土結構之移動

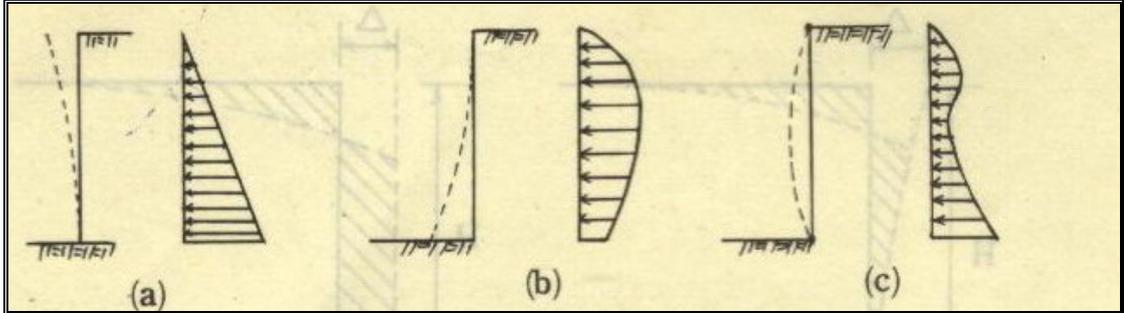


圖 4.4.2.1-3 土壓力分佈情形示意圖

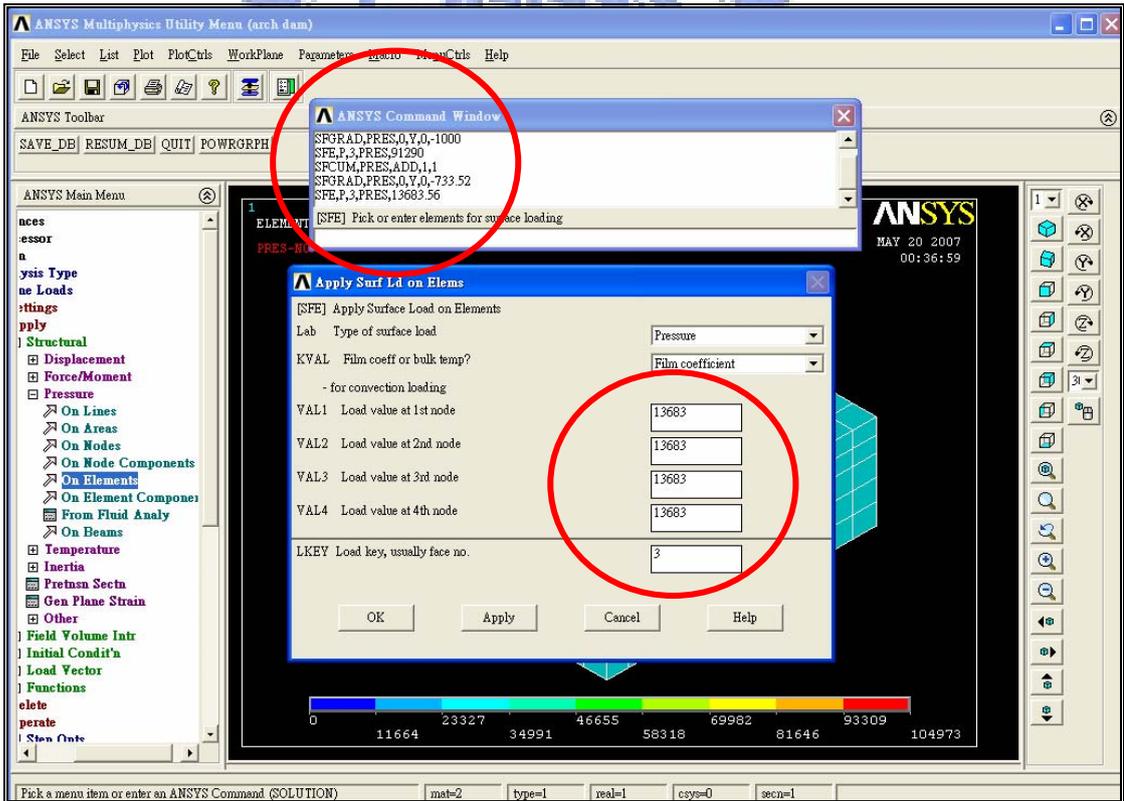


圖 4.4.2.1-4 ANSYS 施加淤泥土壓力視窗

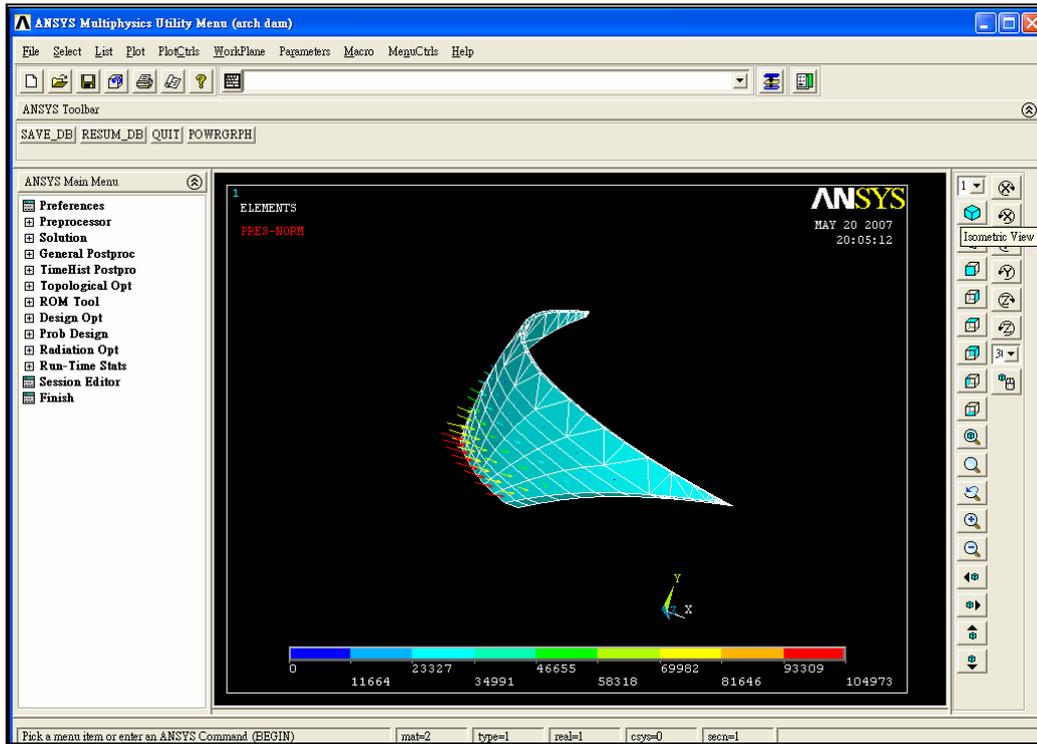


圖 4.4.2.1-5 壩體施加土壓及水壓示意圖(向量表示圖)

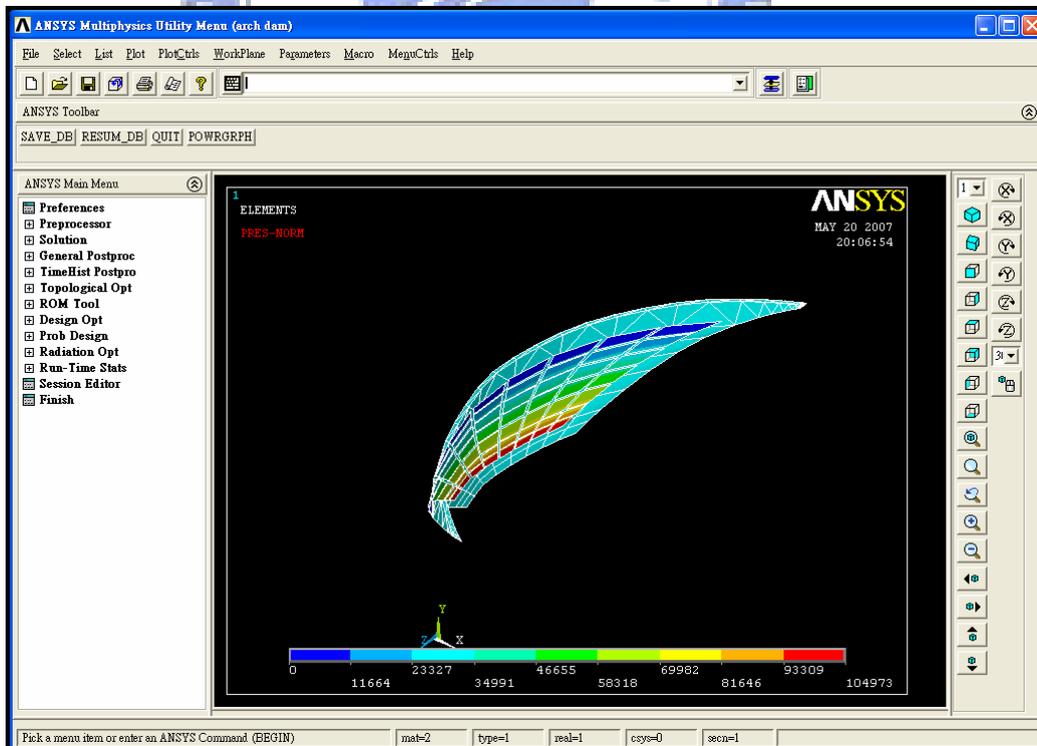


圖 4.4.2.1-6 壩體施加土壓及水壓示意圖(等高線標示圖)

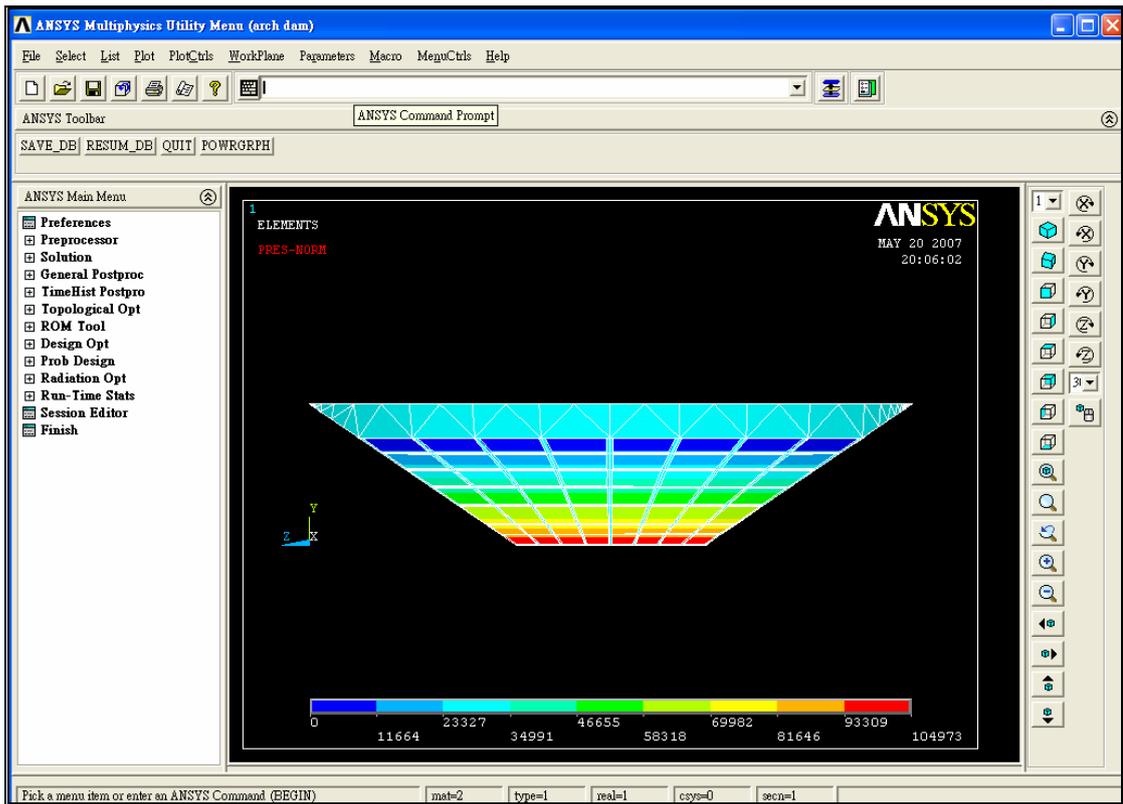


圖 4.4.2.1-7 壩體施加土壓及水壓示意圖(等高標示圖)

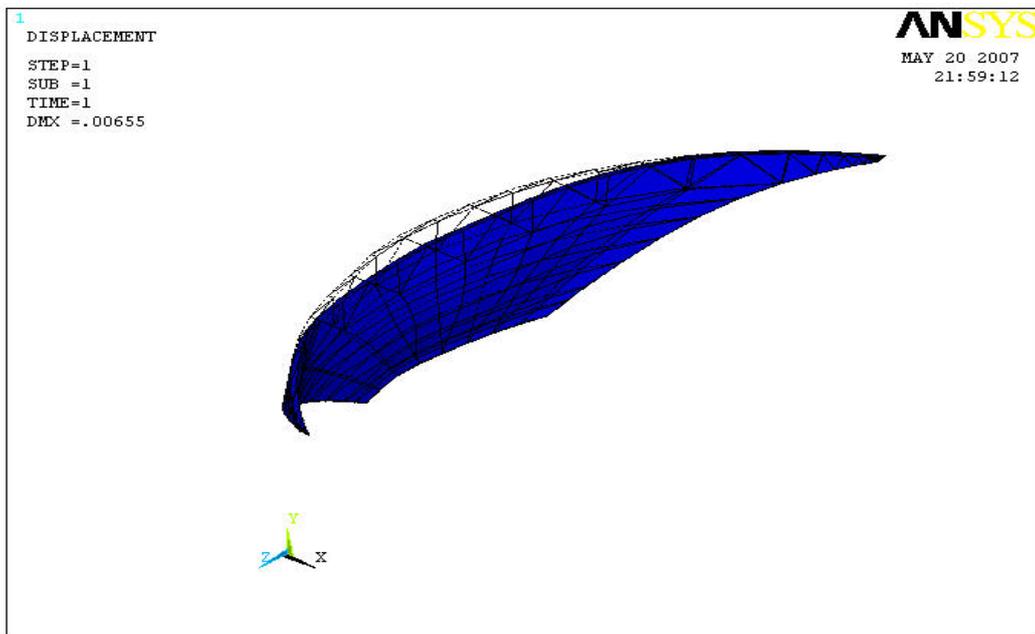


圖 4.4.2.2-1 壩體座標示意圖

PRRSOL Command

File

NODE	FX
1002	-0.58306E+06
1003	-0.56721E+06
1013	-0.15052E+07
1014	-0.24346E+07
1015	-0.14978E+07
1016	-0.23710E+07
1017	-0.14553E+07
1018	-0.22538E+07
1037	-0.36989E+07
1038	-0.12823E+08
1039	-0.94969E+07
1040	-0.45048E+07
1041	-0.57589E+07
1042	-0.77895E+07
1043	-0.83899E+07
1052	-0.86146E+07
1057	-0.43315E+07
1058	-0.93901E+07
1063	-0.37013E+07
1064	-0.12833E+08
1065	-0.95002E+07
1066	-0.57925E+07
1067	-0.77816E+07

圖 4.4.2.2-2 壩體基礎之 X 方向最大反力(壓應力)

The screenshot shows a window titled "PRRSOL Command" with a "File" menu. The main content is a list of nodes and their FY values. The value for node 1058 is circled in red.

NODE	FY
1040	-0.12660E+08
1041	-0.92029E+07
1042	-0.13418E+08
1043	-0.15740E+08
1057	-0.11613E+08
1058	-0.23318E+08
1063	-0.34033E+07
1066	-0.92451E+07
1067	-0.13498E+08
1068	-0.15959E+08
1075	-0.45487E+07
1076	-0.22464E+08
1077	-0.18697E+08
1078	-0.12648E+08
1159	-0.21060E+07
1162	-0.45507E+07
1163	-0.50591E+07
1164	-0.44960E+07
1171	-0.64456E+06
1172	-0.14776E+07
1173	-0.20587E+07
1174	-0.12049E+07
1175	-0.90418E+06
1176	-0.29910E+06
1177	-0.29401E+07

圖 4.4.2.2-3 壩體基礎之 Y 方向最大反力(壓應力)

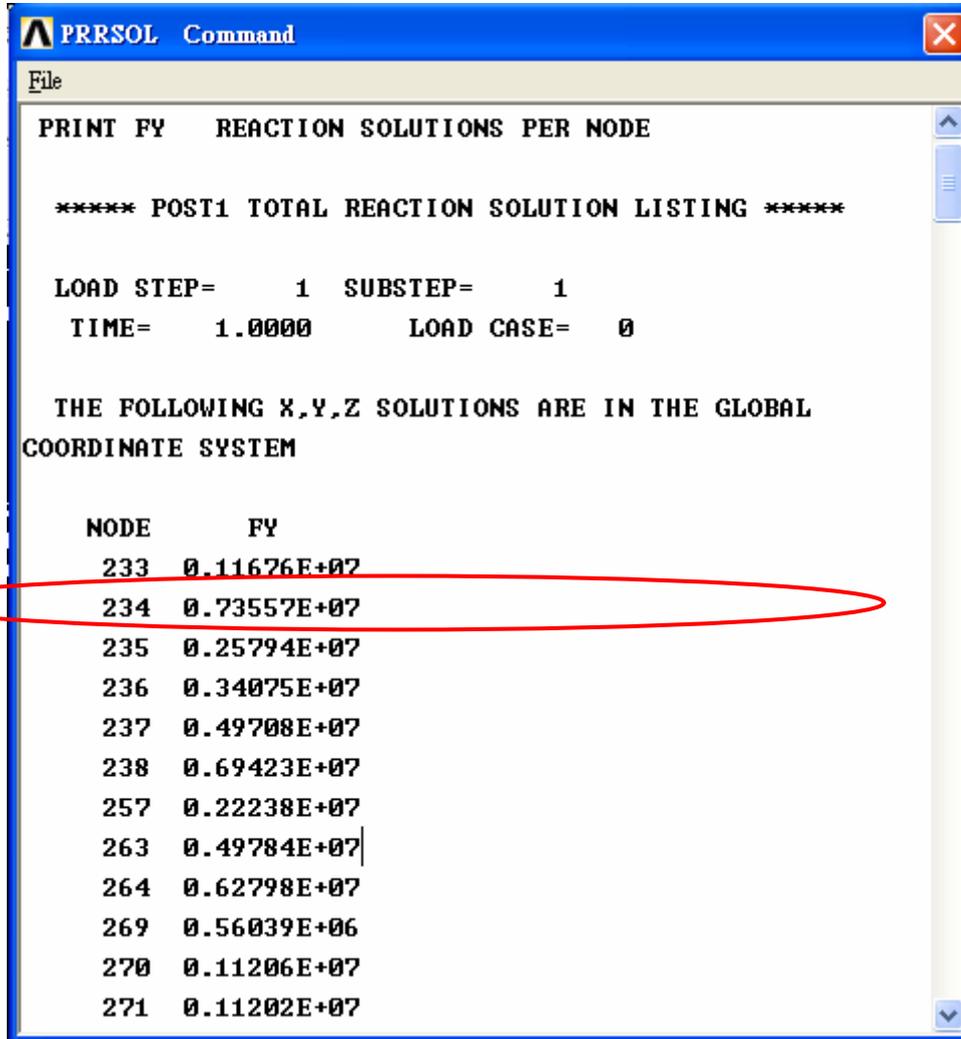


圖 4.4.2.2-3 壩體基礎之 Y 方向最大反力(拉應力)

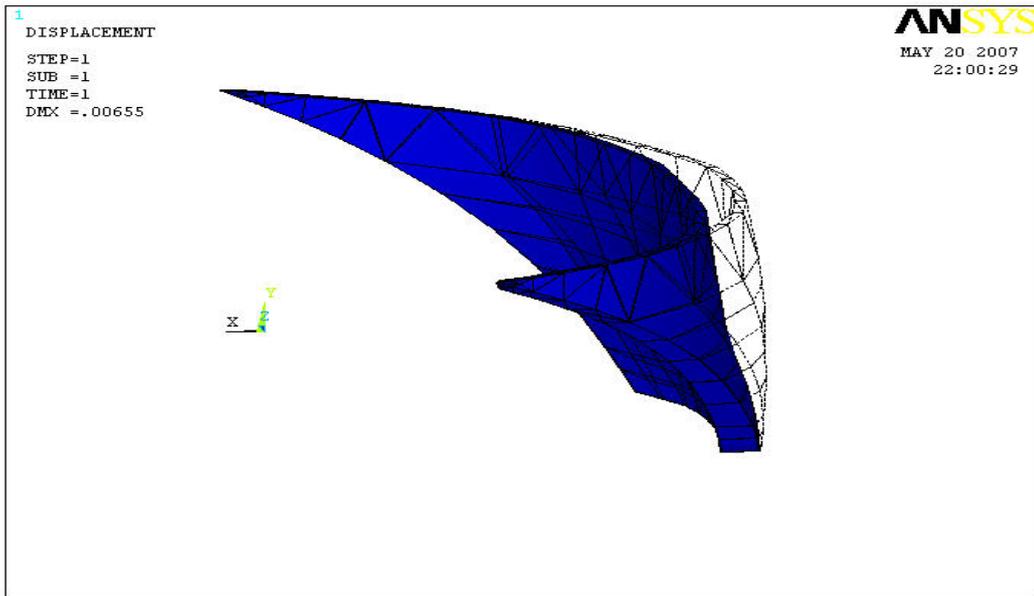


圖 4.4.2.2-4 壩體結構位移圖

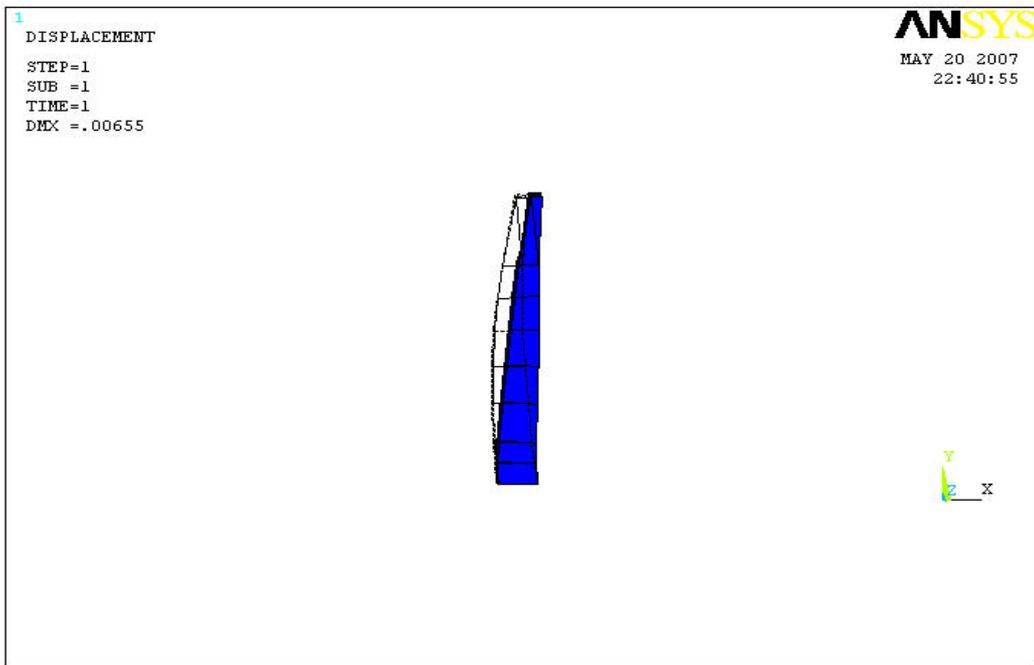


圖 4.4.2.2-5 壩體結構位移圖(壩身截面)

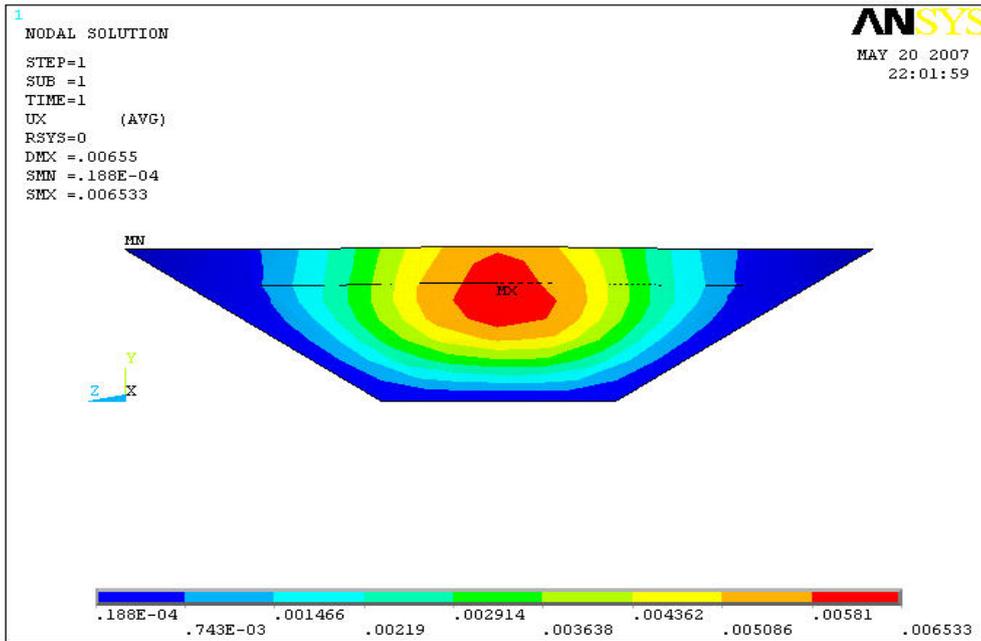


圖 4.4.2.2-6 壩體結構位移等高線圖(X 軸方向)

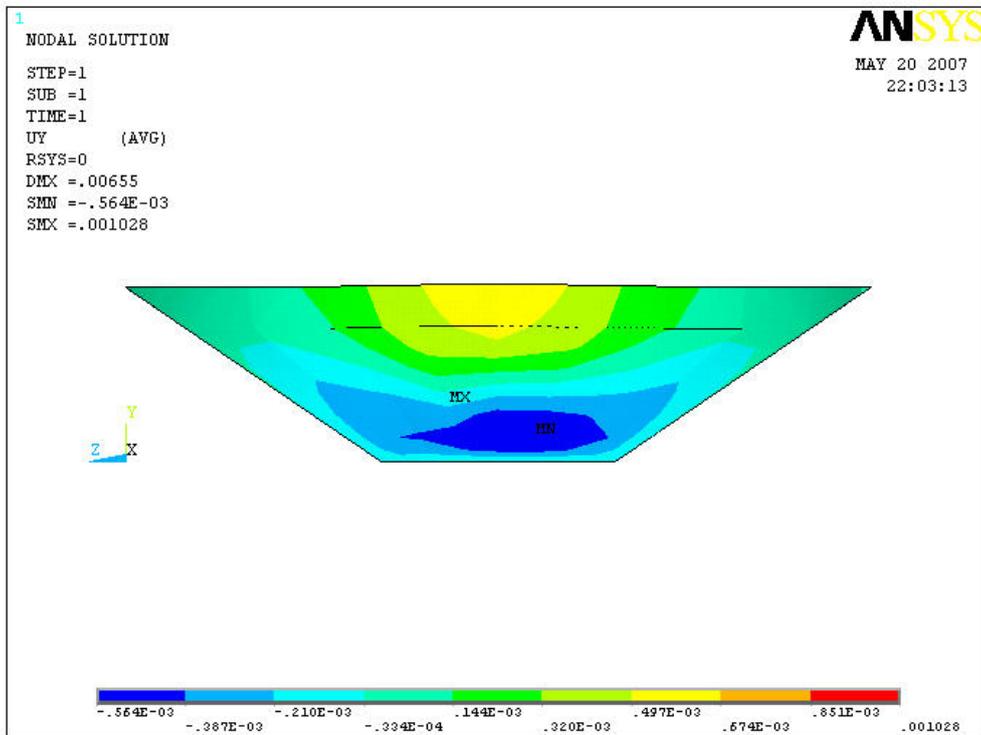


圖 4.4.2.2-7 壩體結構位移等高線圖(Y 軸方向)

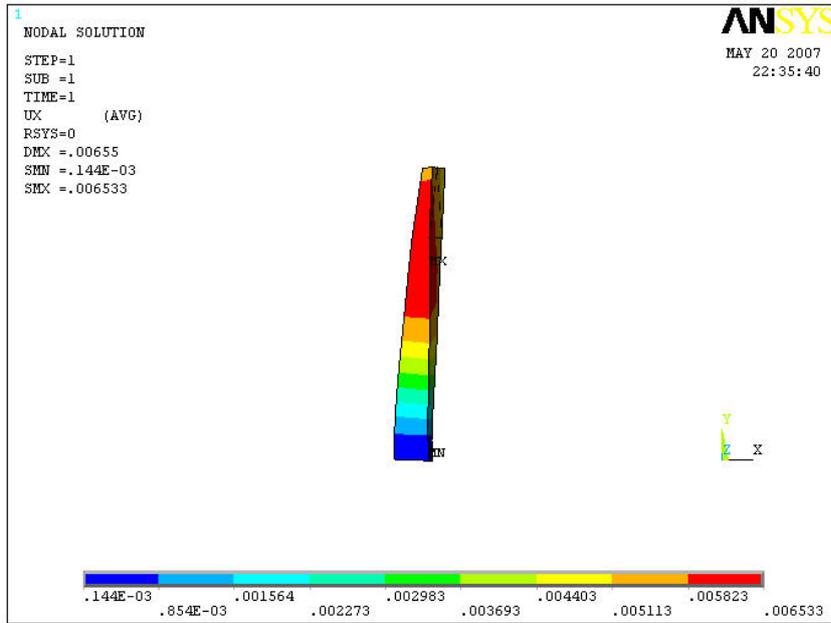


圖 4.4.2.2-8 壩身截面位移等高線圖(X 軸方向)

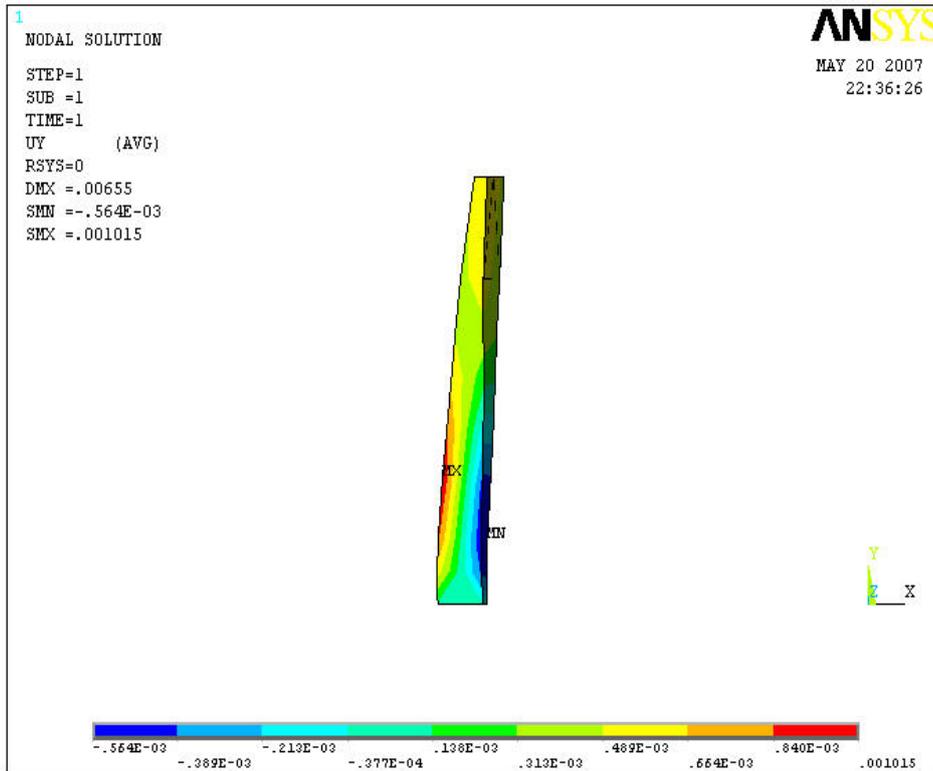


圖 4.4.2.2-9 壩身截面位移等高線圖(Y 軸方向)

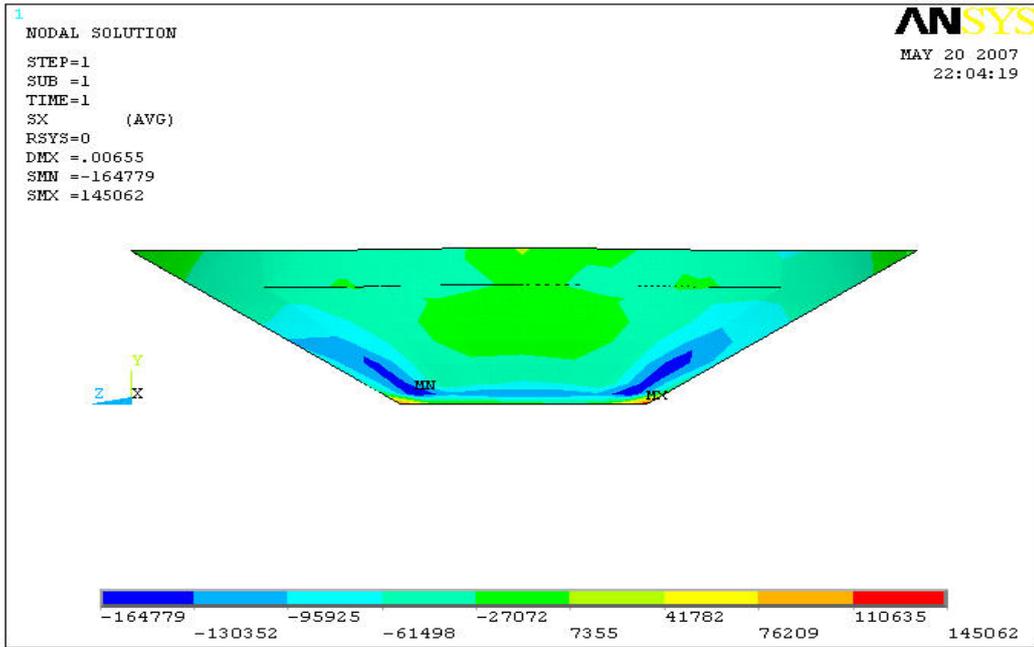


圖 4.4.2.2-10 壩體結構應力等高線圖(X 軸方向)

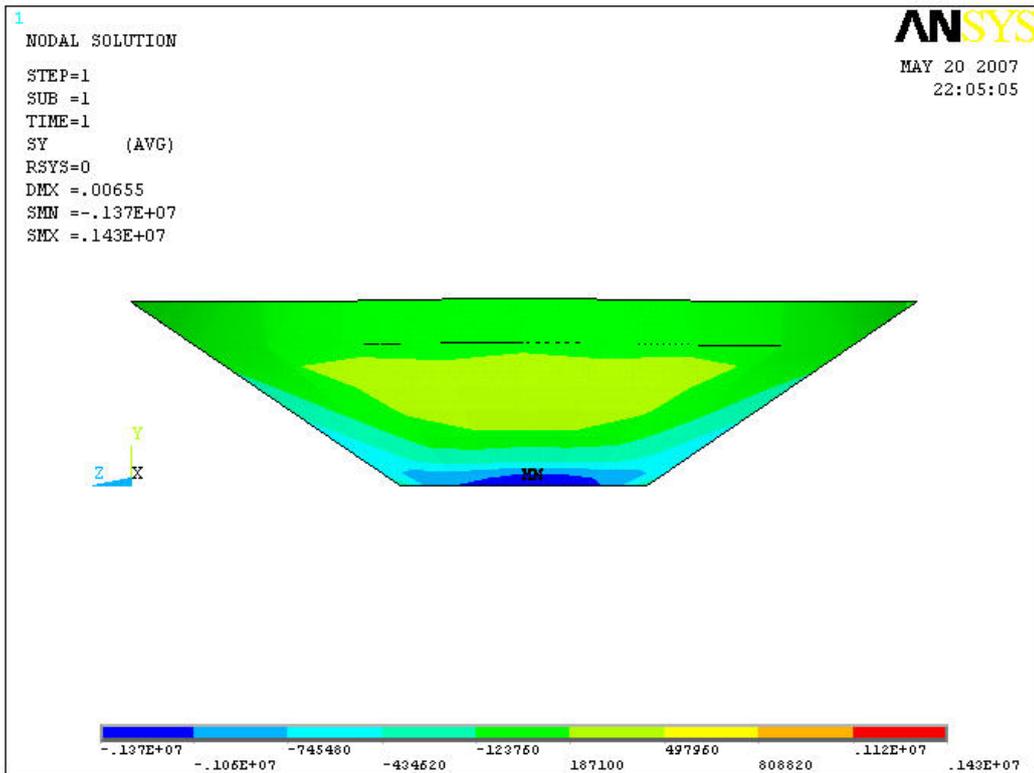


圖 4.4.2.2-11 壩體結構應力等高線圖(Y 軸方向)

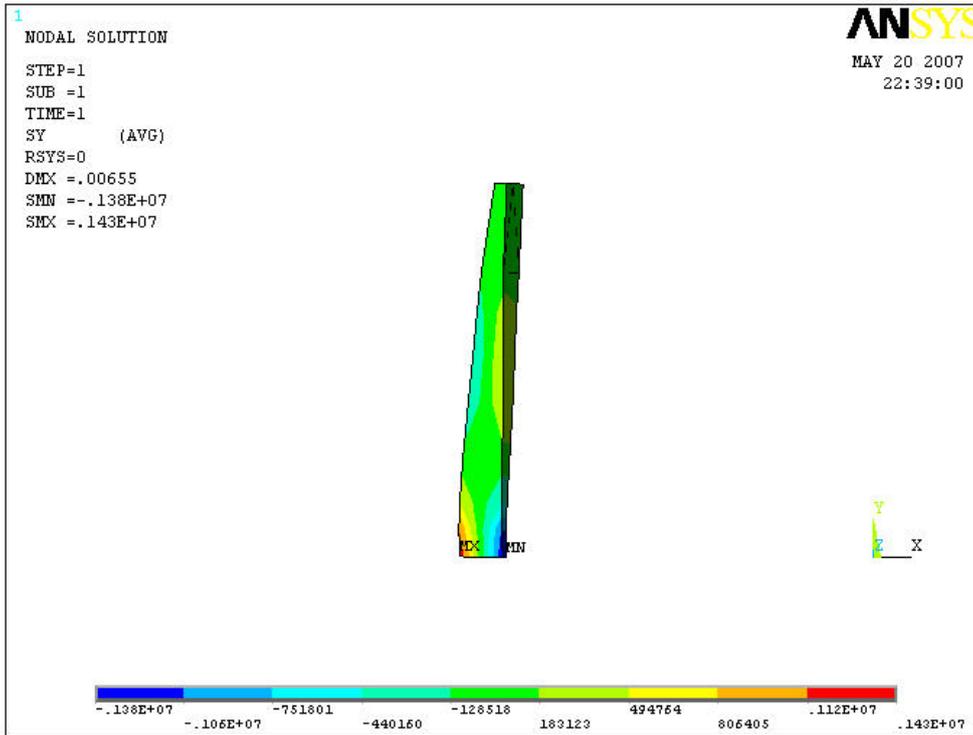


圖 4.4.2.2-12 壩身截面應力等高線圖(Y 軸方向)

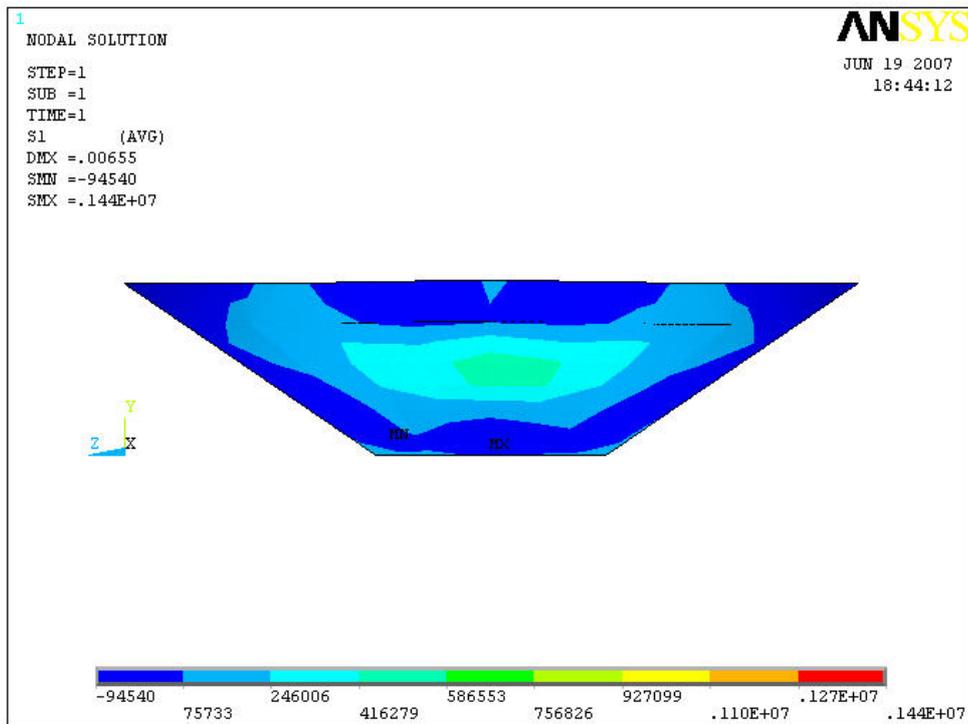


圖 4.4.2.2-13 壩體結構主應力等高線圖(XY 平面)

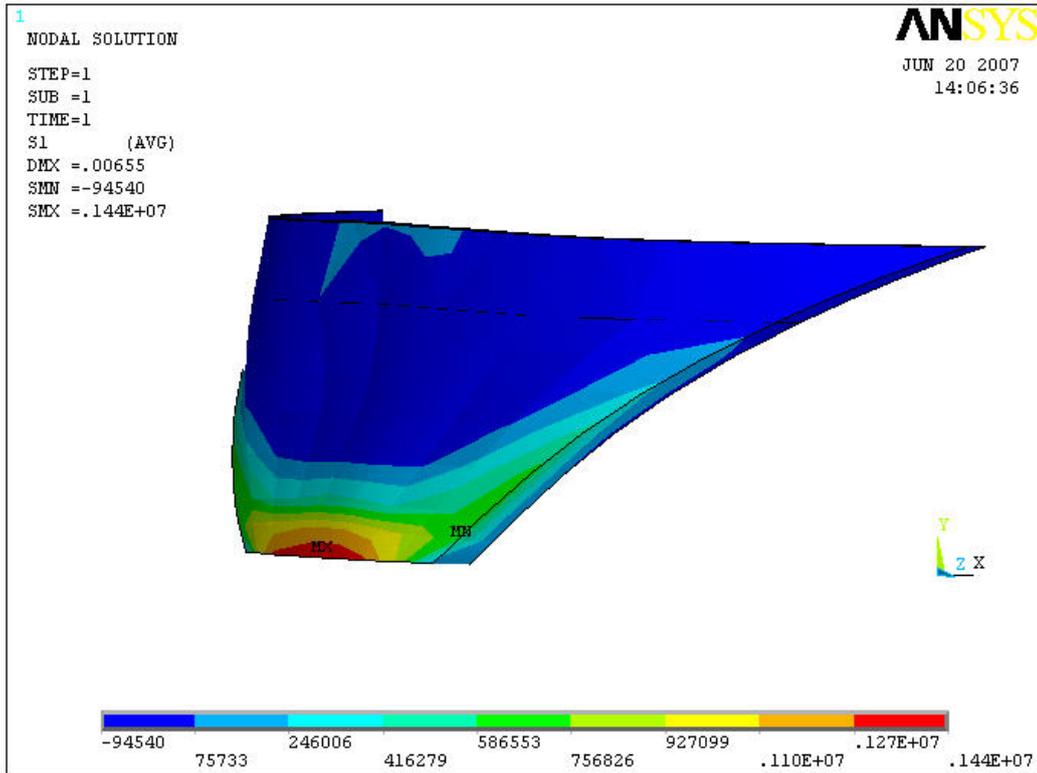


圖 4.4.2.2-14 壩體結構主應力等高線圖(XY 平面)

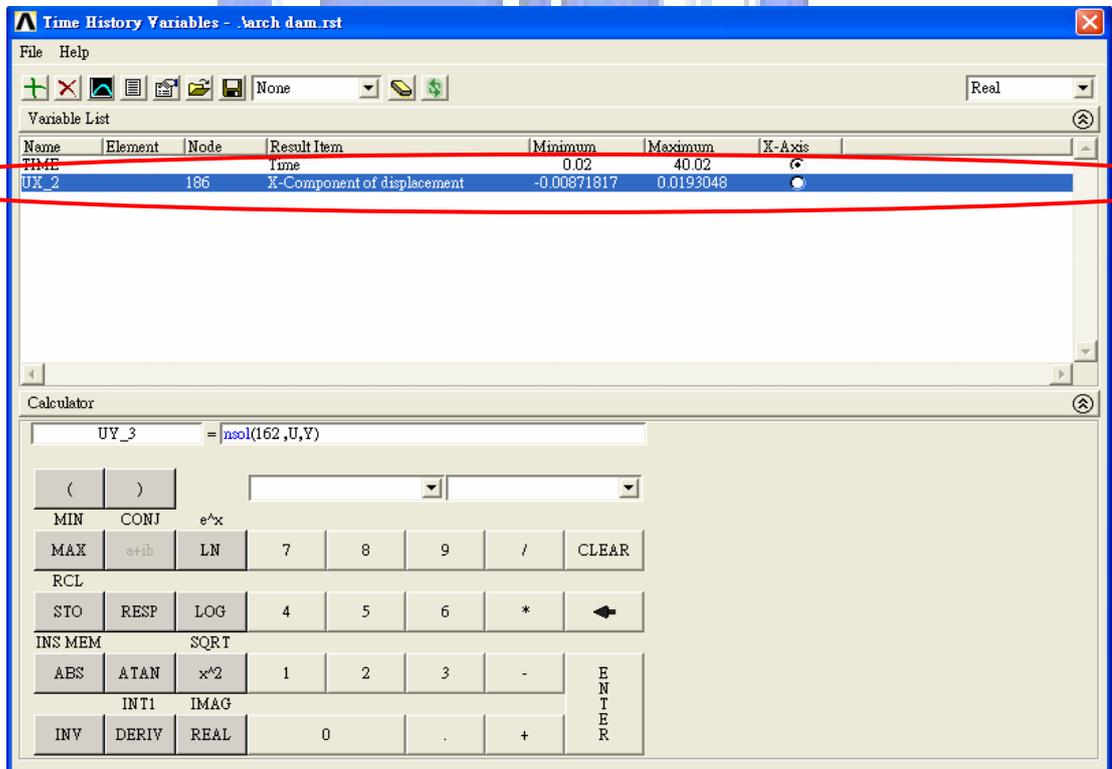


圖 4.4.3-1 壩體結構動態歷時之位移極值(X 軸方向)

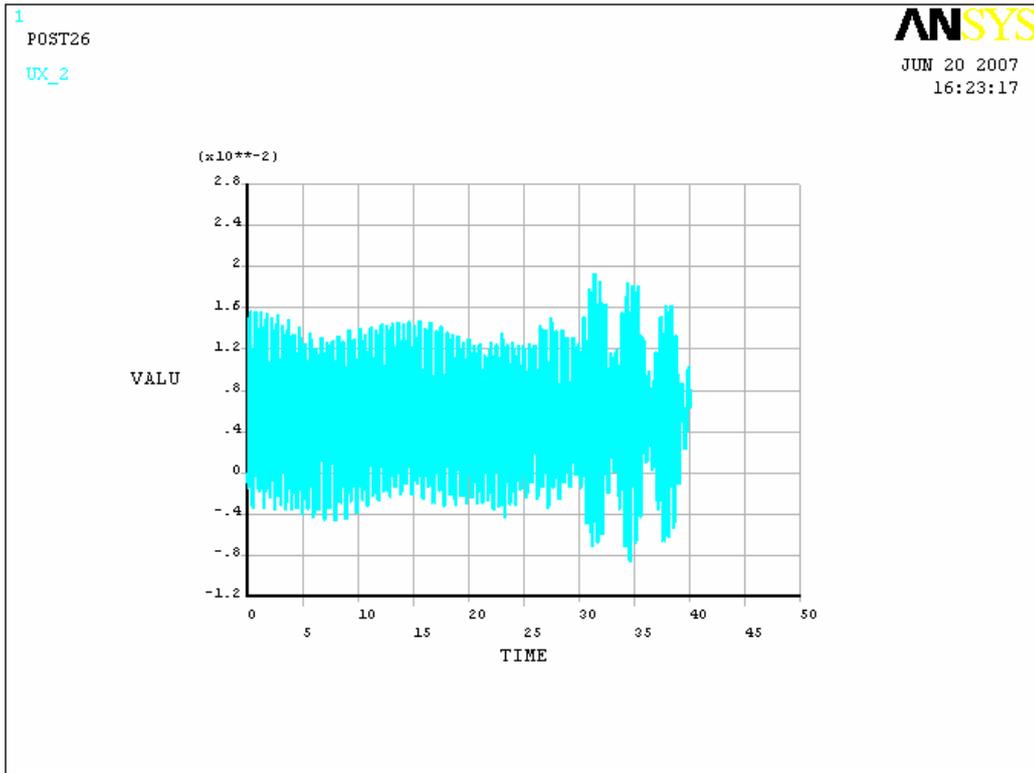


圖 4.4.3-2 壩體結構 X 軸方向位移歷時曲線(max=19.3mm)

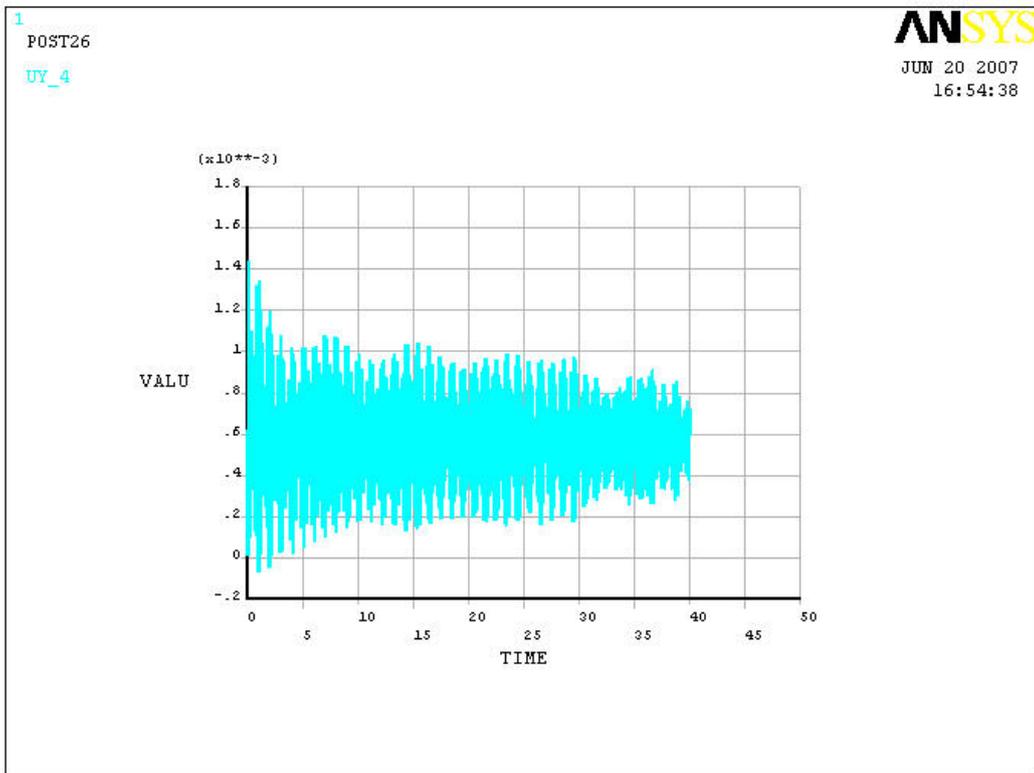


圖 4.4.3-3 壩體結構 Y 軸方向位移歷時曲線(max=1.4mm)

PRRSOL Command

File

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE	FX
1002	-0.38149E+08
1003	-0.39553E+08
1013	-0.72093E+08
1014	-0.71331E+08
1015	-0.77376E+08
1016	-0.77989E+08
1017	-0.81442E+08
1018	-0.84355E+08
1037	-0.17719E+08
1038	-0.74114E+08
1039	-0.50292E+08
1040	-0.42268E+08
1041	-0.22794E+08
1042	-0.38116E+08
1043	-0.45407E+08
1052	-0.45726E+08
1057	-0.56926E+08
1058	-0.37254E+08

圖 4.4.3-4 壩體基礎之 X 方向最大反力(壓應力；t=30 秒)

```
***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****  
  
LOAD STEP=    0  SUBSTEP=    0  
TIME=   30.000    LOAD CASE=  0  
  
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL  
COORDINATE SYSTEM  
  
NODE      FY  
1040 -0.52365E+08  
1041 -0.39439E+08  
1042 -0.51210E+08  
1043 -0.58604E+08  
1057 -0.60858E+08  
1058 -0.79516E+08  
1063 -0.20202E+08  
1066 -0.46381E+08  
1067 -0.57548E+08  
1068 -0.63238E+08  
1075 -0.22386E+08  
1076 -0.86360E+08  
1077 -0.73906E+08  
1078 -0.54709E+08  
1159 -0.10175E+08  
1162 -0.17216E+08  
1163 -0.10411E+08  
1164 -0.47000E+08
```

圖 4.4.3-5 壩體基礎之 Y 方向最大反力(壓應力；t=30 秒)

```
PRRSOL Command
File
PRINT FY REACTION SOLUTIONS PER NODE

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING
*****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 0
TIME= 30.000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE
GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE FY
233 0.21597E+08
234 0.23887E+08
235 0.40030E+08
236 0.32649E+08
237 0.25655E+08
238 0.20944E+08
257 -0.86970E+07
263 -0.92879E+07
264 0.47008E+07
269 0.44055E+07
270 0.14774E+08
```

圖 4.4.3-6 壩體基礎之 Y 方向最大反力(拉應力；t=30 秒)

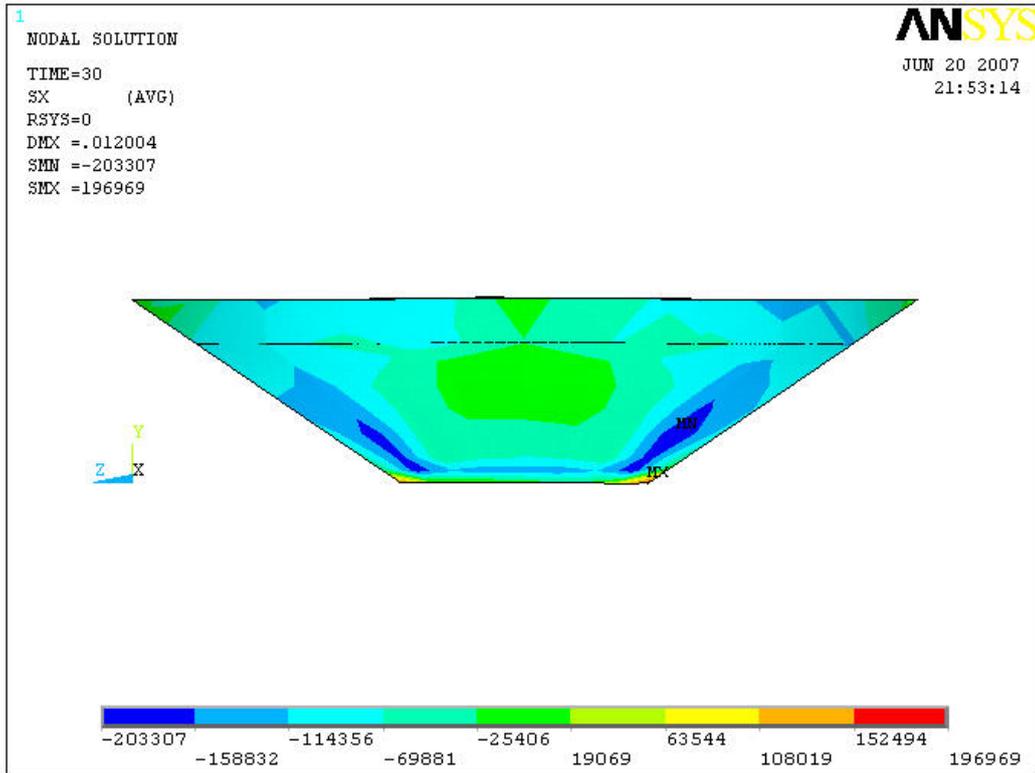


圖 4.4.3-7 壩體結構應力等高線圖(X 軸方向；t=30 秒)

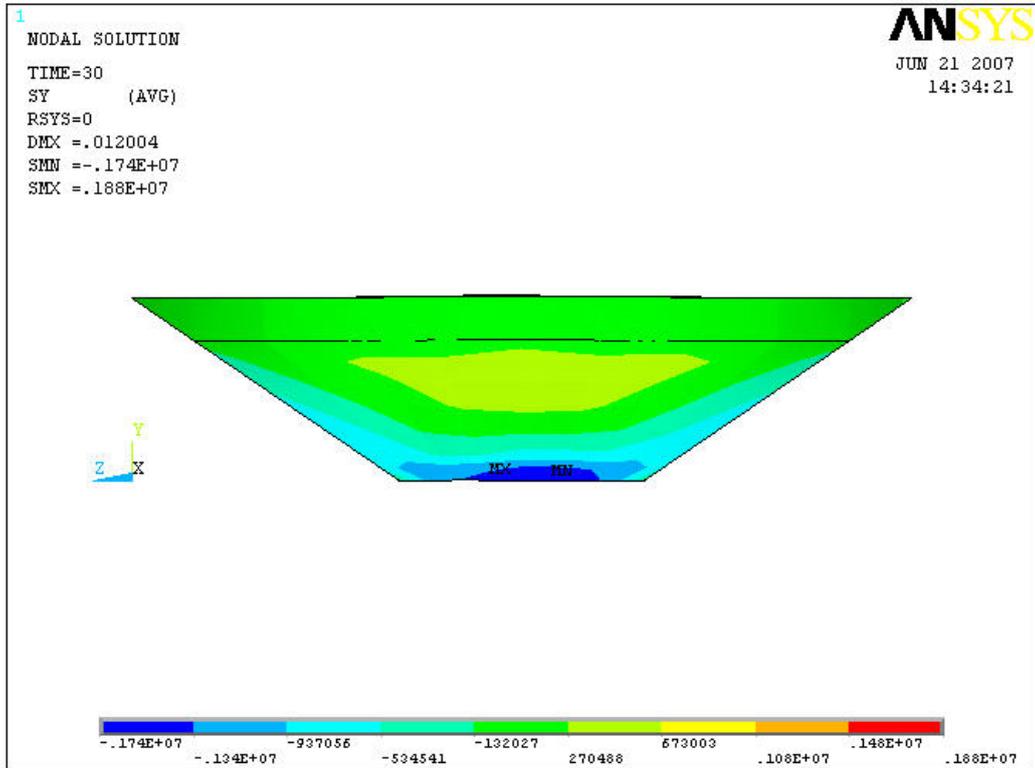


圖 4.4.3-8 壩體結構應力等高線圖(Y 軸方向；t=30 秒)

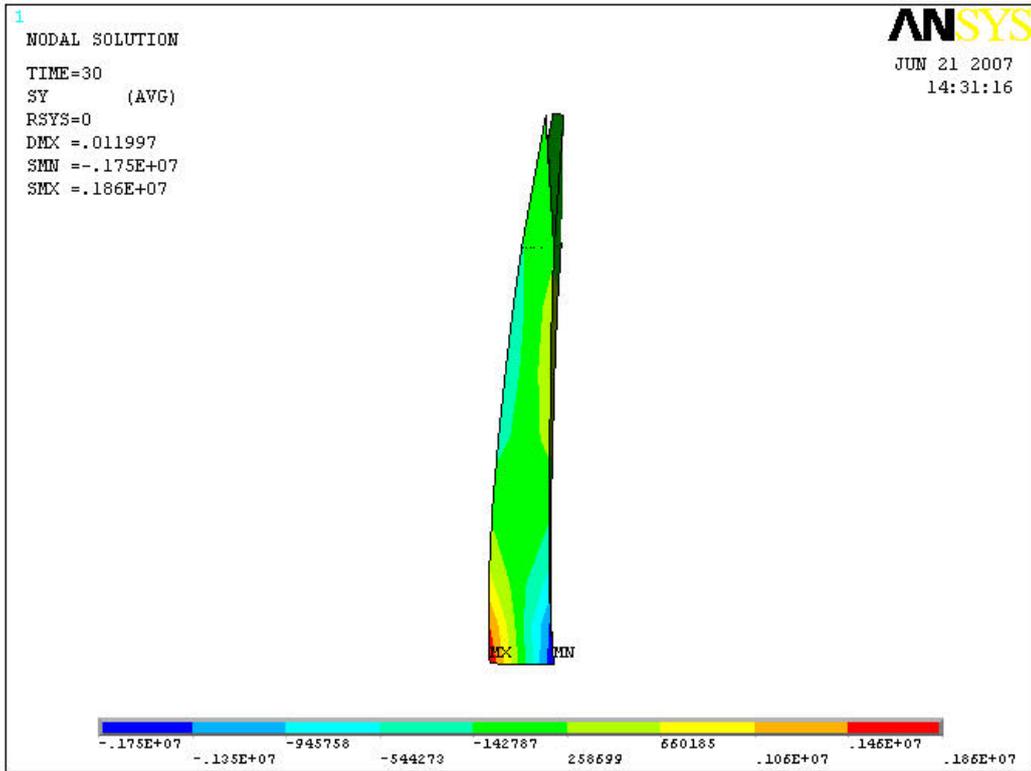


圖 4.4.3-9 壩身截面應力等高線圖(Y 軸方向；t=30 秒)

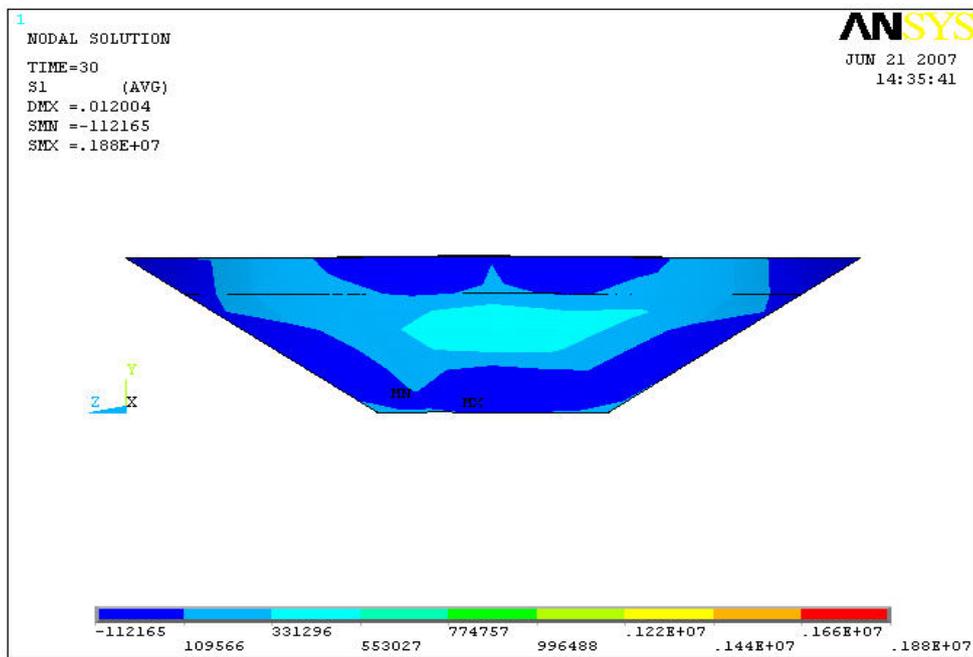


圖 4.4.3-10 壩體結構主應力等高線圖(XY 平面；t=30 秒)

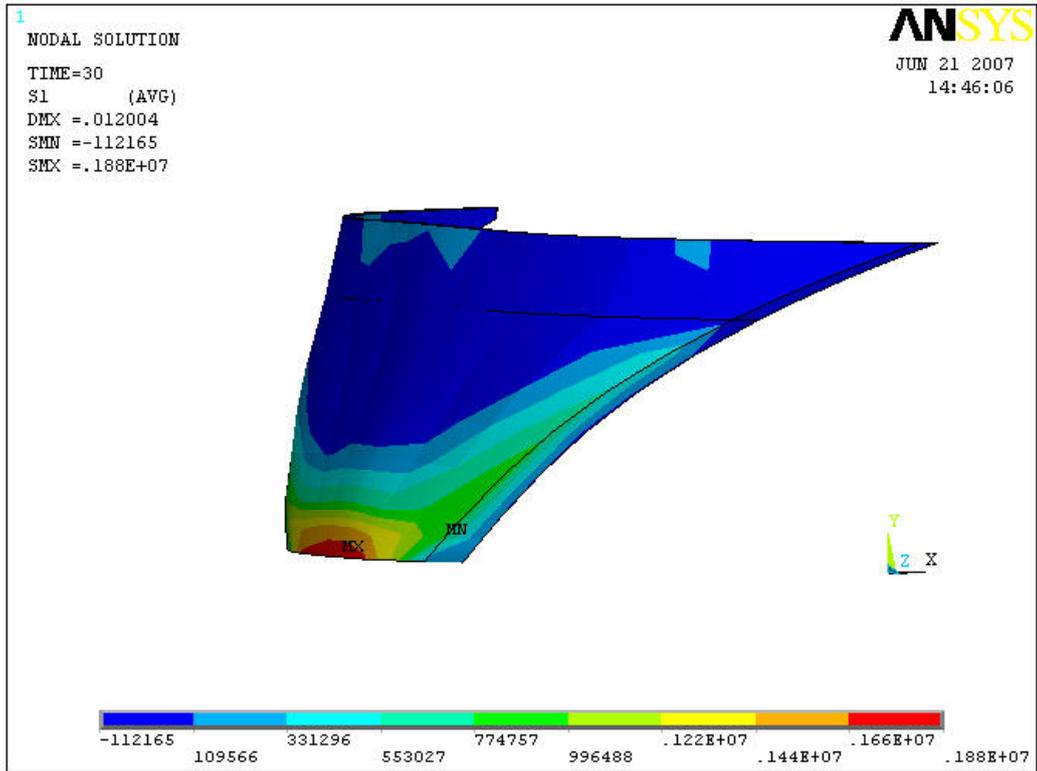


圖 4.4.3-11 壩體結構主應力等高線圖(XY 平面；t=30 秒)



附錄 A 重力壩之系統識別

A.1 前言

本節將針對天輪壩強震儀之地震加速度歷時資料進行系統識別分析，俾便了解重力壩結構之自然振動頻率等特性。天輪壩乃一混凝土重力壩，座落於大甲溪流域，蓄水量為 47 萬立方公尺，其壩體上僅安裝一部強震儀(如圖 A.1-1 所示)，本研究將利用壩體上所設置之強震儀地震加速度歷時記錄作為輸出訊號，再利用「無輸入-單一輸出」之 AR 模式識別技巧識別重力壩之自然振動頻率，期瞭解重力壩之動力特性是否有異常變化的情況及歷次地震分析結果之差異程度，以評估系統識別模式應用於重力壩安全診斷之可行性，由於壩體振動反應以上、下游方向(Y 向)最大，因此本文將利用各測站 Y 向(上下游向)之地震加速度歷時進行系統識別分析。

A.2 重力壩實測紀錄之系統識別分析

本研究選取八筆地震加速度歷時資料，進行系統識別分析，諸地震加速度歷時如圖 A.2-1(a)~ 圖 A.2-1(b)所示，其加速度峰值及所對應之蓄水位高度如表 A.2-1、A.2-2 所示。針對各地震歷時進行頻域分析，俾便瞭解時域振動訊號之頻率內涵(frequency content)，包括地表及結構(壩體)之振動頻率等特性。頻域分析主要是進行傅式轉換(Fourier Transform)，測站上下游向之加速度反應傅氏頻譜如圖 A.2-2 所示，其結果顯示，頻率內涵集中在 10Hz 以內之頻寬範圍，且峰值出現之位置即為地表或壩體的主要振動頻率。由於壩體振動加速度振動頻譜之峰值可能同時包含地表及壩體本身之振動頻率，因此有必要再利用系統識別之方法求得壩體系統之傳遞函數(Transfer

Function)，以確認壩體實際之振動頻率。

本文於系統識別分析係採用「無輸入-單一輸出」之 AR 識別模式，以強震儀加速度歷時記錄做為輸出訊號，識別階數採用 60。由於天輪重力壩僅裝設一部強震儀，因此地震記錄之傳遞函數亦僅有一條，如圖 A.2-3(a)、圖 A.2-3(b)所示，傳遞函數之峰值所對應之頻率即為重力壩之主要振動頻率，整理如表 A.2-3。其結果顯示，壩體於諸地震事件之識別頻率分別為：2.9Hz(阻尼比 17%)、2.7Hz(阻尼比 12%)、2.9Hz(阻尼比 17%)、2.7Hz(阻尼比 12%)、2.7Hz(阻尼比 10%)、2.3Hz(阻尼比 16%)、2.4Hz(阻尼比 14%)、2.6Hz(阻尼比 10%)，其中，2.9Hz、2.7Hz、2.9Hz、2.7Hz、2.7Hz、2.3Hz、2.4Hz、2.6Hz 應為重力壩之主要振動模態頻率(平均值為 2.65 Hz)，此外，由於 2001/09/16 及 2002/09/27 兩次地震事件之振動反應較大，因此其阻尼比之識別結果應較為可靠，其值分別為 17% 及 16%。

綜上所述，天輪重力壩於歷次地震事件下，其壩體之振動特性並無顯著之變化，顯示重力壩應無結構性損傷發生。由於本研究取得之資料很有限，未來應考慮不同蓄水位深度及淤泥深度進行系統識別分析，以瞭解重力壩合理之振動頻率變化範圍，可作為重力壩結構安全之評估依據。

表 A.2-1 天輪壩諸地震事件峰值統計表

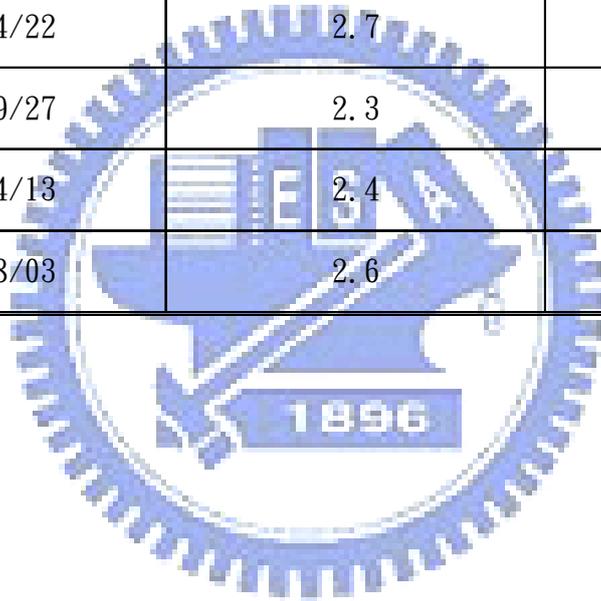
	地震事件	峰值(gal)
天 輪 壩	2001/06/08	16.8
	2001/07/09	24.0
	2001/09/16	63.5
	2001/11/21	17.3
	2002/04/22	18.3
	2002/09/27	55.8
	2003/04/13	20.5
	2003/08/03	8.5

表 A.2-2 天輪壩諸地震事件蓄水位高度對應表

地震事件	蓄水位高度(m)
2001/06/08	745.9
2001/07/09	746.2
2001/09/16	745.9
2001/11/21	746.1
2002/04/22	746.3
2002/09/27	747.9
2003/04/13	746.0
2003/08/03	746.5

表 A.2-3 天輪壩諸地震事件之識別結果

地震事件	頻率(Hz)	阻尼比(%)
2001/06/08	2.9	17
2001/07/09	2.7	12
2001/09/16	2.9	17
2001/11/21	2.7	12
2002/04/22	2.7	10
2002/09/27	2.3	16
2003/04/13	2.4	14
2003/08/03	2.6	10



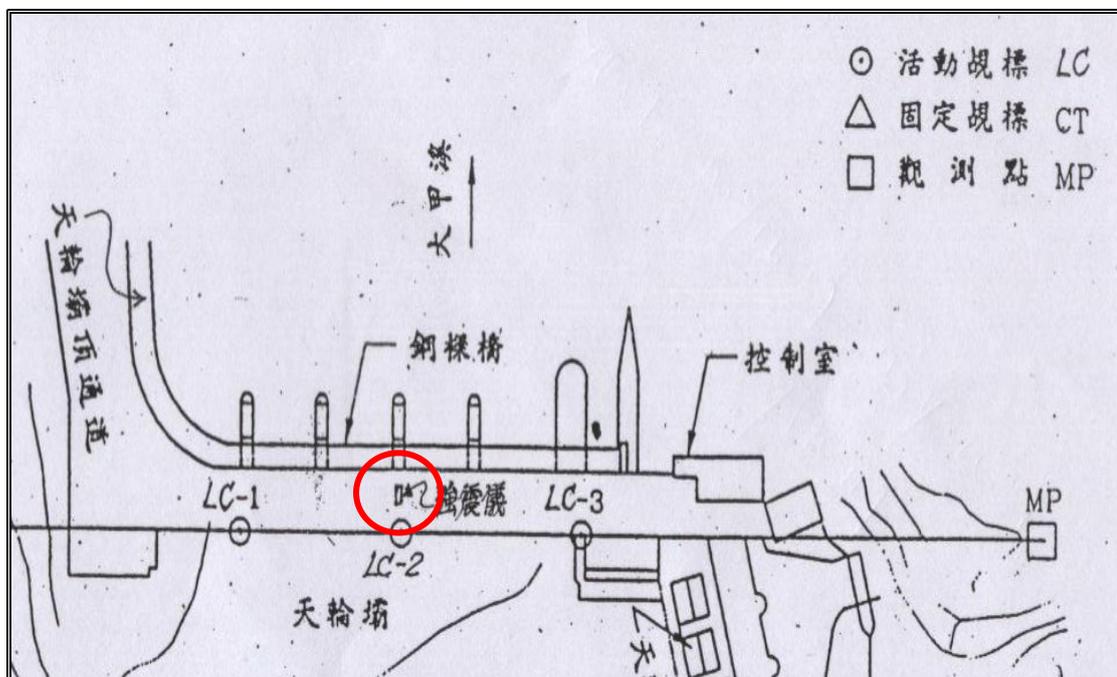


圖 A.1-1 天輪壩強震儀測站佈置圖

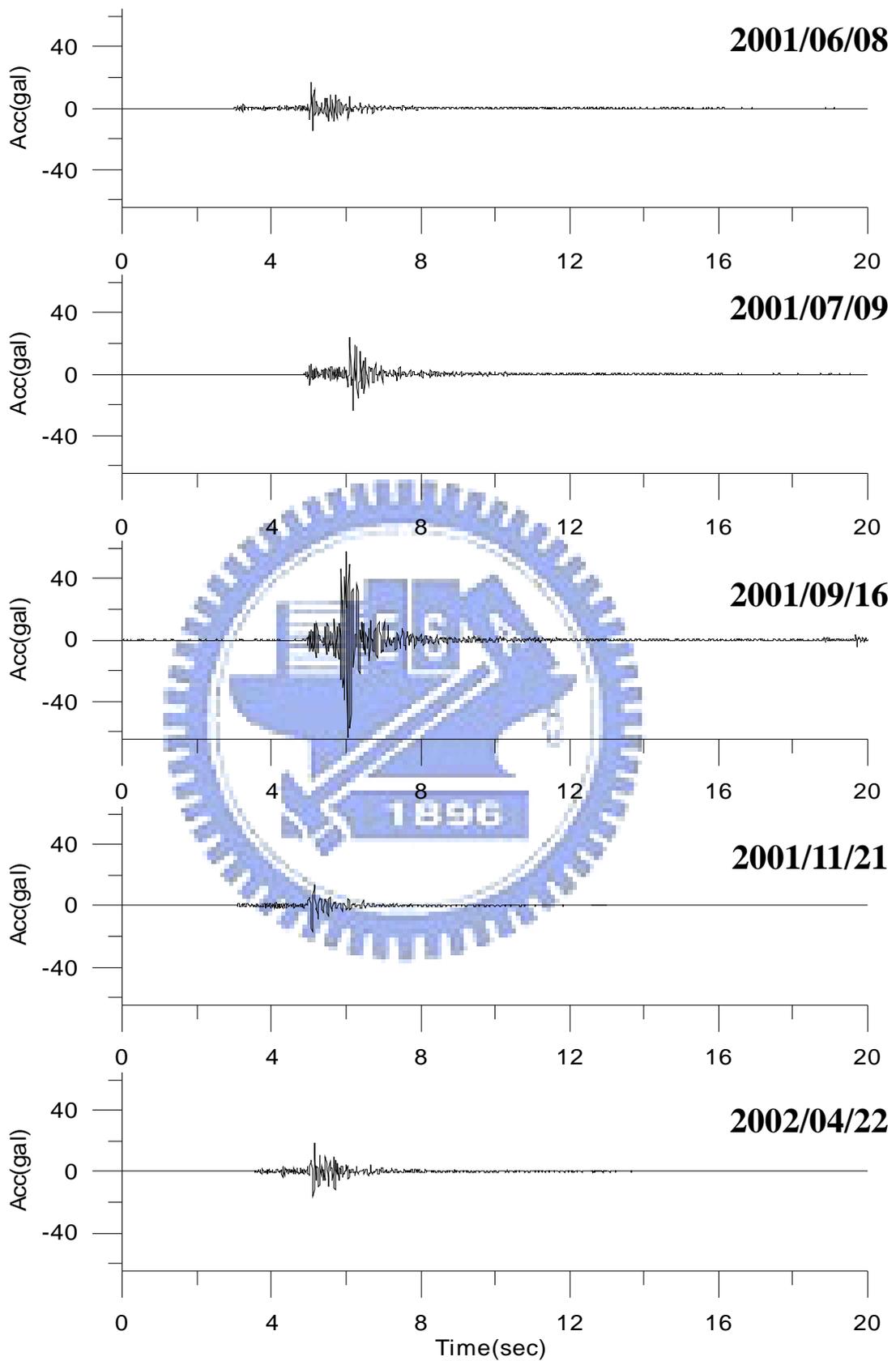


圖 A.2-1(a)天輪壩地震加速度歷時曲線圖(上下游向)

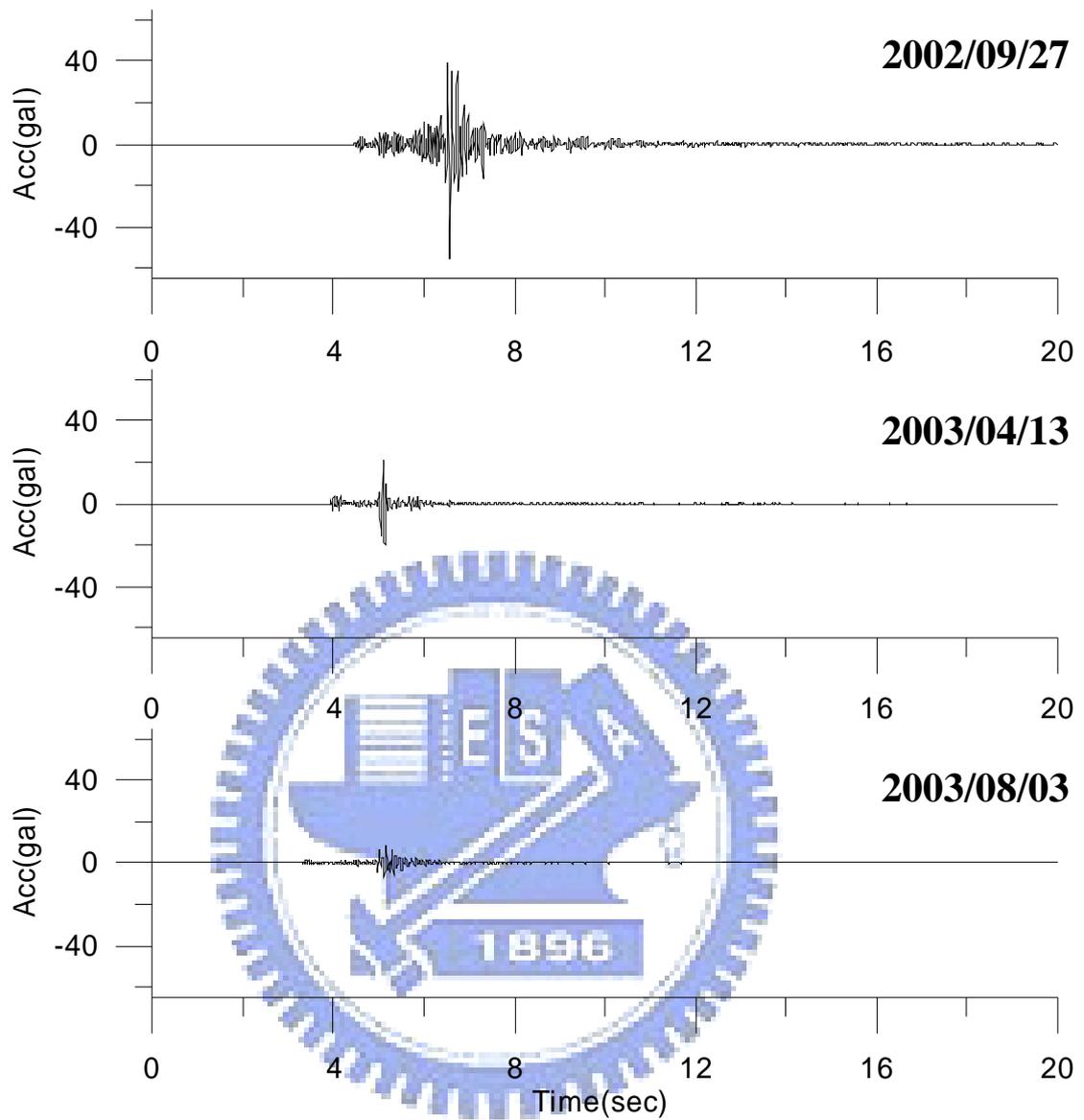


圖 A.2-1(b)天輪壩地震加速度歷時曲線圖(上下游向)

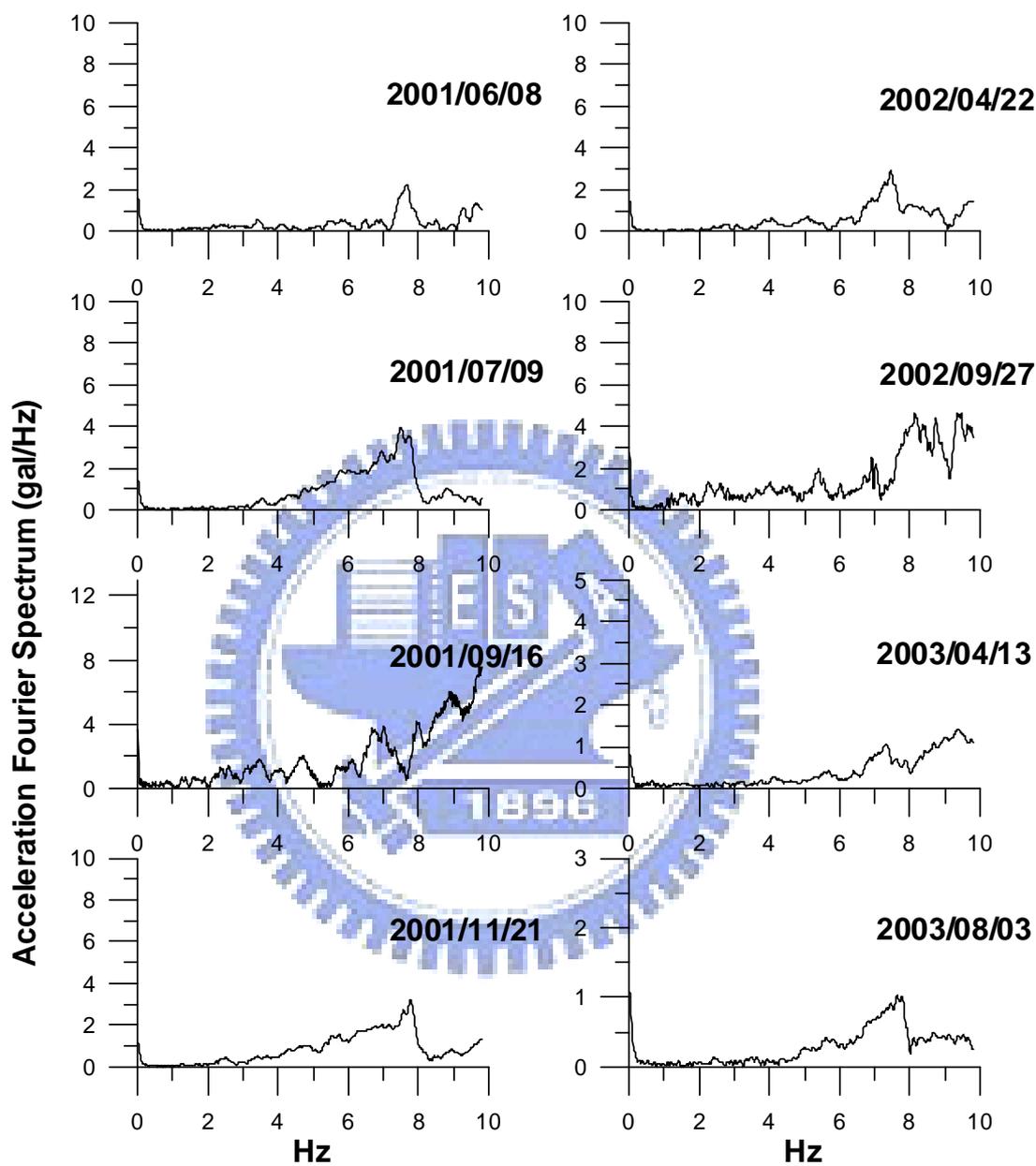


圖 A.2-2 天輪壩諸地震事件傅氏頻譜(上下游向)

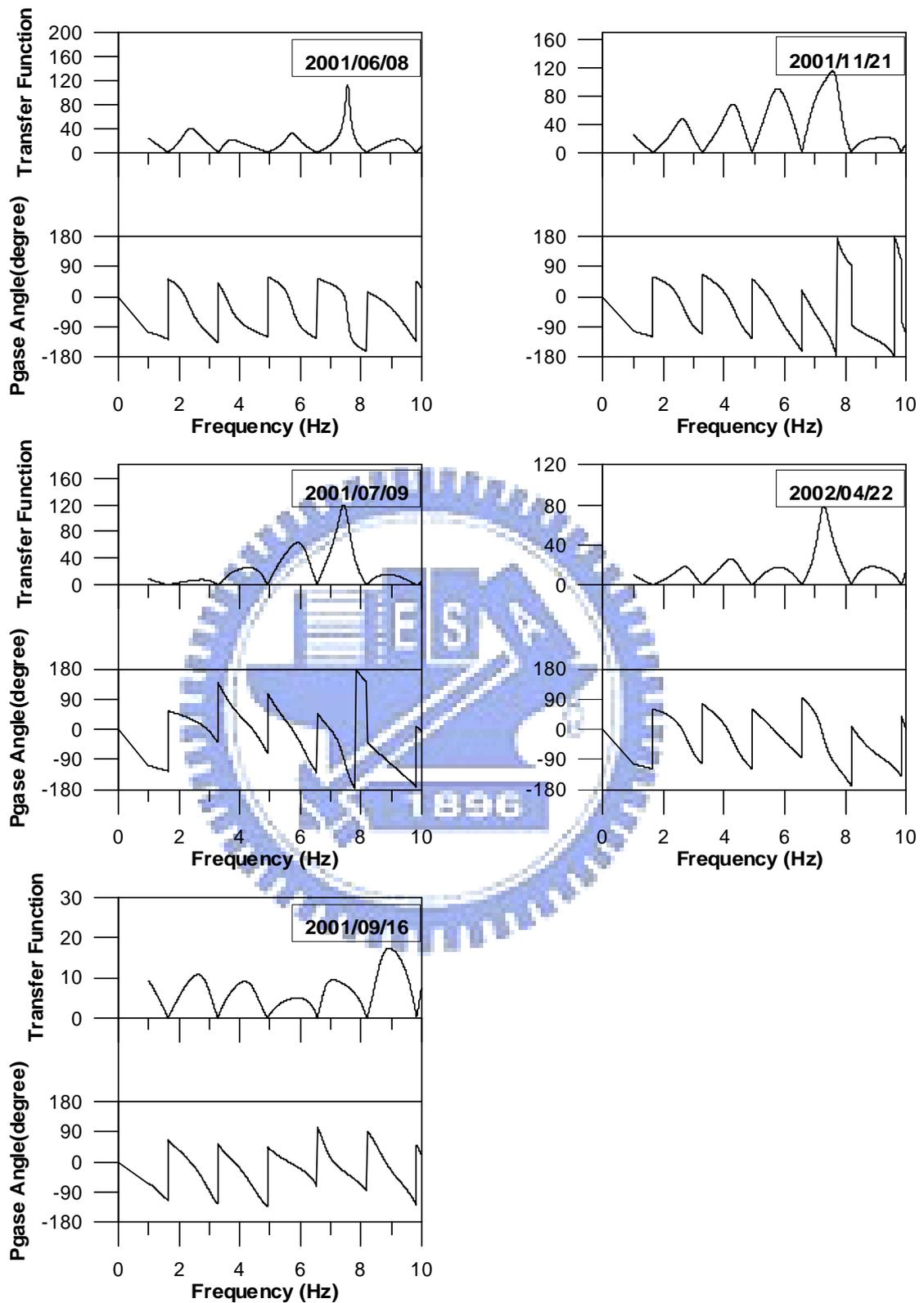


圖 A.2-3(a)天輪壩諸地震事件之傳遞函數及其相位角

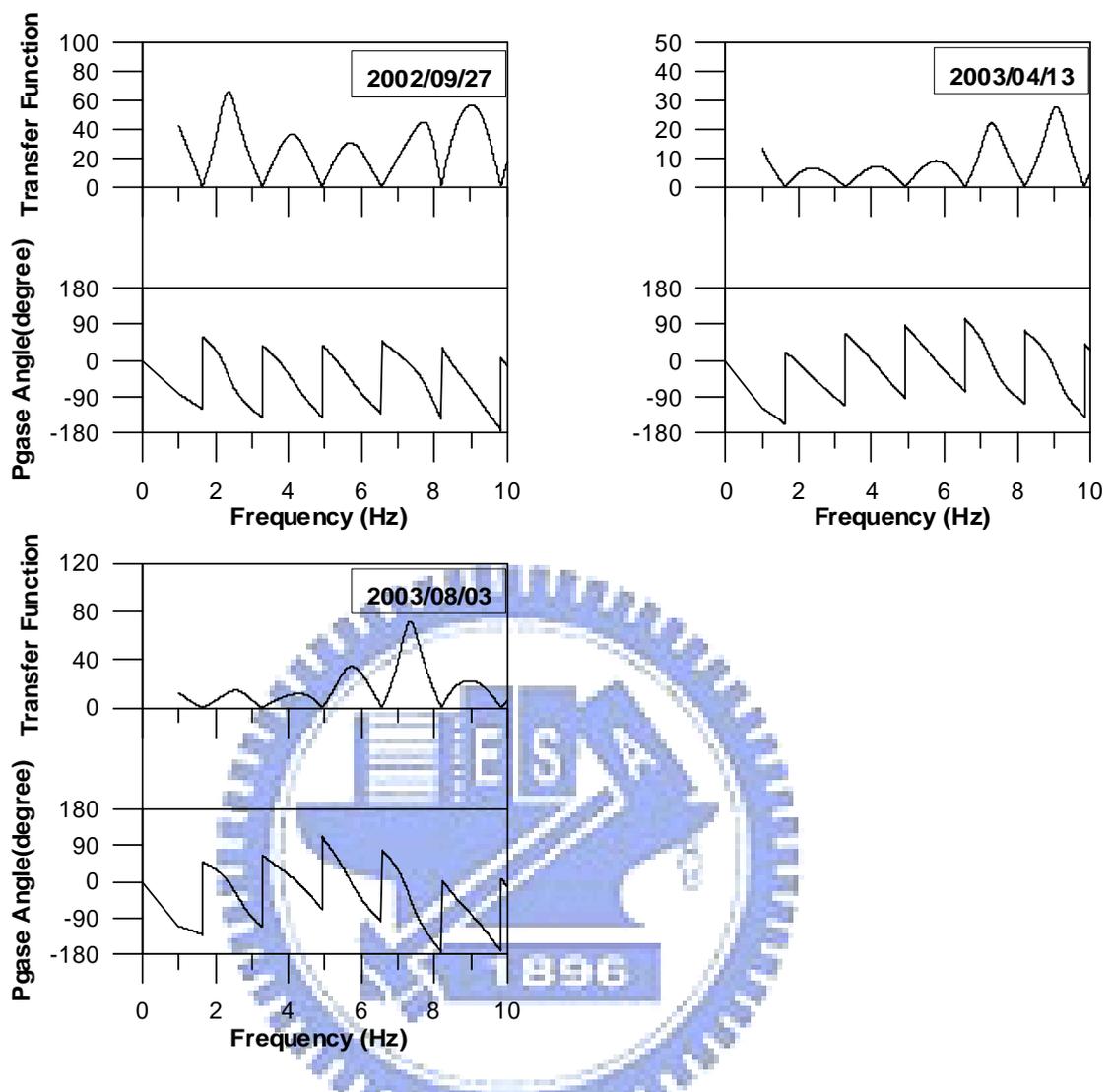


圖 A.2-3(b)天輪壩諸地震事件之傳遞函數及其相位角