

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

土壤結構互制地震分析之獨立運跑(1/2)

計畫編號：932001INER004

受委託機關（構）：中華民國大地工程學會

計畫主持人：陳正興

報告日期：93年12月15日

目 錄

一、 中文摘要.....	1
二、 英文摘要.....	2
三、 計劃目的.....	3
四、 計劃緣起.....	4
五、 執行方法與進度說明.....	5
(一).土壤結構互制分析方法.....	5
(二).羅東與花蓮大比例尺模型地震試驗計畫分析結果之評估.....	11
(三).土壤結構互制分析專業軟體優劣評估.....	21
(四).核四廠耐震一級結構之結構與土壤數學模式之建立與討論.....	24
1.簡介.....	24
2.設計反應譜與設計地震.....	25
3.SHAKE 程式反捲積分析與自由場之基礎輸入運動.....	26
4.控制廠房結構模型之建立.....	26
(五).有限元素模式與集中質量模式間之轉換.....	28
1.側向土壤彈簧與阻尼盤.....	28
2.基礎底部土壤彈簧與阻尼盤.....	29
3.有限元素模態分析.....	31
六、 結論與建議.....	32
七、 參考文獻.....	34
八、 附表.....	36
九、 附圖.....	43

一、中文摘要

核能電廠之安全攸關至鉅，而原委員會為其安全監督單位，今在核四廠興建之際，核研所為檢核其耐震一級結構之耐震設計，實應建立土壤~結構地震分析之獨立運跑能力，從事獨立分析，作為檢核比較之基礎，是以核研所於本年度起推動此項研究計畫。本研究計畫將蒐集了以往有關土壤~結構互制分析方法之研究文獻，並針對羅東與花蓮大比例尺地震試驗計畫之分析結果進行評估，了解現有各種分析方法之理論基礎、分析架構與分析能力等，將其綜合整理，分析其優缺點，作為建議購買分析軟體之參考，經評估結果，建議以購買 SASSI 程式最適宜。同時本研究亦針對核四廠耐震一級結構建立土壤結構互制分析模式，包括地震輸入運動分析模式與集中質量分析模式，前者利用 SIMQKE-1 程式製造與設計反應譜相符合之人造地震，並利用 SHAKE 程式進行地盤受震反應分析，以求取從事土壤~結構互制作用分析之基礎輸入運動；後者則利用 ABAQUS 程式分析集中質量模式之振動模態與顯著頻率，並建立如何求取基礎側壁與底部土壤彈簧與阻尼係數之計算方法。綜合前兩項研究成果，可作為下年度從事完整土壤~結構互制作用分析之基礎。

二、英文摘要

The effects of soil-structure interaction (SSI) have been recognized as one of the important issues to be considered in the seismic design of a nuclear power plant. At present, the Nuclear Power Plant No. 4 is under construction in Taiwan. In order to review the seismic design of such important structures, it is important to establish the capability of independent analysis for seismic soil-structure interaction analysis. The aim of this project is to establish the capability of independent analysis for soil-structure interaction analysis for a nuclear power plant. Based on thorough literature reviews and the results of prediction analyses obtained from both the Lotung and Hualien Large Scale Seismic Tests, it is suggested that the computer program SASSI is the most suitable tool for soil-structure interaction analysis and can be considered to be the priority program for buying. As for the analysis conducted in this project, two parts are included. The first part is to use the SIMQKE-1 program to produce an artificial earthquake accelerogram compatible to the design spectrum of the Nuclear Power Plant No. 4, and then to use the SHAKE program for ground response analysis to calculate the ground input motions for future soil-structure interaction analysis. The second part is to construct the lumped mass model for the Control Building of Nuclear Power Plant No. 4. For this model, proper methods to calculate the coefficients of soil spring and damping for an embedded foundation are developed, including the sideways component for the wall of a embedded foundation and the rocking component for the base slab of a embedded foundation. Based on the model so constructed, the vibrational modes and predominant frequencies are analyzed by using the computer program ABAQUS. Results obtained are very close to the results presented in the Designer's Report. Therefore, it is concluded that the model constructed and the analysis procedure established can be adopted for the complete soil-structure interaction analysis for the Nuclear Power Plant No. 4 in the workscopes of next year.

三、計畫目的

對於大型之結構物而言，其受外力作用時之振動反應受地盤變形性之影響很大，因此土壤～結構互制效應是耐震設計時之重要考量項目。對於核能廠而言，其土壤～結構互制反應不僅決定結構物實際所受地震力之大小，同時亦提供作為管線、設備與其他附屬結構設計所需之輸入運動，因此土壤～結構互制分析是核能廠耐震設計中最重要之課題之一。在美國原子能委員會(U.S. NRC)的標準審核計畫(Standard Review Plan, 簡稱 SRP)中，規定核能廠耐震一級結構(Seismic Category I)之耐震設計必須從事土壤～結構互制分析，基本上可採用連體力學法或有限元素法等，用以分析結構物在地震作用下之反應行為，檢核其耐震設計，以保障核能廠之安全。

目前國內正在東北角的鹽寮興建核四廠，鑑於核能廠之安全攸關甚鉅，而台灣本島及鄰近海域為地震頻繁之地區，必須特別重視核四廠之耐震安全設計。而耐震分析中的土壤～結構互制作用分析部份，為比較複雜而繁瑣的分析，必須具備相當的分析能力與經驗，因此核研所乃委託本研究計畫，以建立其對核能廠重要結構物從事土壤～結構互制分析獨立運轉之能力。

四、計畫緣起

土壤～結構互制作用分析虛同時考慮結構物之慣性效應、土壤之變形性，以及半無限域對地震波之消散效應，分析架構龐大而複雜。目前世界上已發展有許多種之土壤～結構互制作用分析方法與相關程式，惟各方法皆有其發展背景與應用性，且其分析結果具有相當之差異性，為驗證各分析方法之差異性及適用性，因此美國電力研究所與台灣電力公司首於 1985 年起於羅東進行「羅東大比例尺模型地震試驗計畫」(Large Scale Seismic Test-Lotung)，研究地震時土壤與核能廠結構之互制作用。試驗計畫期間除曾進行兩次圍阻體模型之強迫振動試驗外，亦蒐集有 30 多個地震之振動反應資料，同時邀請國內外研究機構參與分析，整編核能廠耐震設計之工作指引，成果豐碩。

由於羅東計畫的成功，引起全球的關注，亦激起各國繼續推動第二階段之「花蓮大比例尺模型震測研究計畫」。本計畫由台灣電力公司、美國電力研究所、美國核能管制委員會、日本的中央電子研究所和東京電力公司、法國集團的原子能委員會、法國電力公司和法馬通公司，以及韓國集團的韓國電力公司、韓國核能安全研究所和韓國電力工程設計公司等共同出資合作，研究核能廠圍阻體模型座落於硬質土層上之動態與地震反應，以驗證現行各種土壤～結構物互制作用分析方法之適用性。

核能電廠之安全攸關至鉅，而原委員會為其安全監督單位，今在核四廠興建之際，核研所為檢核其耐震一級結構之耐震設計，實應建立土壤～結構地震分析之獨立運跑能力，從事獨立分析(independent analysis)，作為檢核比較之基礎，是以核研所於本年度起推動本研究計畫，藉與研究單位之合作以建立其從事土壤～結構互制分析之獨立運跑能力。

五、執行方法與進度說明

依據委託研究計畫書之內容，本研究計畫第一年之工作項目包括下列三項：

- (1) 土壤結構互制分析專業軟體優劣評估
- (2) 核四廠耐震一級結構其結構與土壤數學模式之建立與討論
- (3) 有限元素模式與集中質量模式間之轉換

本章以下將針對每一項工作之執行方法與研究成果依序說明。

(一) 土壤結構互制分析方法

欲評估土壤結構互制分析專業軟體之優劣，最主要須先了解各軟體分析土壤～結構互制作用問題之能力、限制性與使用性。一般而言，土壤～結構互制作用之問題包含下列四個問題(如圖 1 所示)：

a. 地盤受震反應問題

如圖 1(a) 所示，此類問題是在決定自由場中土層隨時間深度改變之動態運動，所謂自由場是指尚未建築結構物之工址現地土壤。理論上自由場運動十分複雜，與震波種類、土壤性質、波傳方向等因素相關，在實際應用上常假設地層為水平層狀土壤，而地震波為一垂直向上傳遞之水平剪力波(SH wave)，利用單向度波傳之理論可得到近似之分析結果，如工程上常用之 SHAKE 程式分析法即是採用此一方法，分析模式如圖 2 所示。

b. 基礎散射問題

如圖 1(b) 所示，當地震波遇到基礎時，由於基礎之束制作用，使地震波產生散射現象，致使真正傳入結構物基礎之輸入運動將與自由場地盤之地震運

動不一致，此為土壤～結構互制作用分析所必須考慮之問題。

c. 基礎阻抗問題

所謂基礎阻抗(foundation impedance)係指基礎及其周圍土壤抵抗外來振動之能力，如圖 3 所示為一剛性圓形基礎座落於半無限空間之表面，當其承受扭轉方向、垂直方向、水平方向或搖擺方向之簡諧振動力時，基礎將產生向對應之簡諧運動，而基礎阻抗則為基礎任一點受到外來振動力時，基礎及其周圍土壤產生某種模式之振動變形時，所需加於基礎上之振動力。此問題之求解須考慮彈性波在半無限域傳播之特性，可用連體力學法或數值分析法求解，目前僅有之理論解僅包括圓形剛性基礎放置於均勻半無限空間表面，以及半球型剛性基礎埋置於均勻半無限空間內；至於其它形式之基礎或基礎本身具柔性時，以及土壤為層狀或不規則形狀時，目前均無直接之理論解可資應用，必須應用其他各種近似方法或數值分析法來求解。

d. 互制反應問題

綜合前述地盤受震反應分析所求得之自由場地盤運動，以及由基礎阻抗問題分析所得之基礎阻抗矩陣，並藉其計算經散射作用後之基礎輸入運動，最後才能進行土壤～結構互制作用之分析。

目前用於土壤～結構互制分析之方法與程式很多，常用的有下列幾種：

1. 土壤彈簧法(Soil Spring Method)

土壤彈簧法是工程上最常使用之簡化分析方法，如圖 4 所示，此法源自溫克基礎(Winkler foundation)之觀念，將半無限空間表面剛性基礎之阻抗函數(6 個自由度)簡化成相互獨立彈簧與阻尼盤(Richart, et al., 1970)，表示為

$$S_{ii}(\omega) = K_{ii} + i\omega C_{ii} \quad i=1,2,\dots,6$$

其中 K_{ii} 代表結構物基礎在 i 方向之勁度、 C_{ii} 代表結構物基礎在 i 方向之輻射阻尼。

上述土壤彈簧與阻尼盤之推導原本係針對半無限空間表面剛性基礎所發展，後來為考慮基礎之埋置效應或層狀土層之效應，亦有相關研究(Kausel, et al., 1975; Apsel, 1979)針對各種情況提出修正係數，目前已有許多經驗公式可資引用，擴充了土壤彈簧法之應用性。

2. CLASSI 法

CLASSI(Continuum Linear Analysis for Soil-Structure Interaction)程式係 Wong and Luco(1976)所發展，其基本構架係將結構物基礎下方之半無限空間以連體力學法來模擬，如圖 5 所示，基礎阻抗矩陣係利用彈性動力學之基本解(Green function)來組成，首先將基礎與土壤接觸面積劃分為小區域，如圖 6 所示，利用連體力學法計算其間曳引力與位移之關係，再利用邊界條件結合成基礎阻抗矩陣。對於入射地震波遭遇基礎之散射效應時，亦使用連體力學或邊界積分法求出有效基礎輸入運動(effective foundation input motion)，地震所引致土壤與結構間的互制作用力則以基礎的阻抗矩陣乘上基礎輸入運動求得。結構物則另以其他方式(譬如以有限元素法)模擬，以上述所求得之互制作用力為輸入，求得結構物的動態反應。

3. FLUSH 法

土壤～結構互制分析亦可採用有限元素法分析，通常稱之為直接法(the direct method)，主要是將整個土壤～結構系統直接以有限元素予以模擬，如圖

7 所示。本法主要之優點在於利用有限元素法的高度操作彈性以模擬結構系統(含基礎)複雜之幾何形狀與多變之土壤性質；但在處理半無限延伸的遠域土壤時，由於有限元素網不可能無限延伸，有限元素網分佈的邊界對真正問題而言乃屬虛擬，往外幅射的散射波觸及此虛擬邊界將產生不該有之反射波，幅射阻尼效應因此而無法有效模擬。為解決幅射阻尼效應之問題，前人乃發展各種非反射邊界(non-reflecting boundary)，加到有限元素網的邊界上，用以有效地模擬幅射阻尼效應，如 Wass(1972)、Kausel(1974)等所發展之非反射傳導邊界元素。據此，加州柏克萊大學之 Lysmer, et al.(1975)發展了 FLUSH 程式，基本上為一有限元素程式，為工程上最常用之分析程式之一。

FLUSH 法基本上為二維平面應變分析程式，利用傳導邊界以模擬水平向無限土壤之波傳效應，且在第三方向應用黏滯阻尼盤可作近似三維之模擬，使得分析域可相對地縮減到很小，如圖 8 所示，同時該程式利用擬線性疊代運算之技巧以考慮土壤之非線性效應，可獲得合理之分析結果，故常為工程界所採用。

4. SASSI 法

SASSI 法(System for Analysis of Soil-Structure Interaction)係由 Lysmer, et al.(1981)所發展，此法係利用有限元素法結合「柔性體積」(flexible volume)子結構分析法而成，基本上將土壤~結構系統分成如圖 9 所示之三個子結構，其中(b)圖為挖去之土壤，結構與土壤之介面則取於(b)圖或(a)圖之所有節點。首先由(a)圖求取各節點之力與位移關係，並組成阻抗矩陣，再按有限元素法之觀念結合三子結構以求解。此法之優點在於結構與土壤介面為一柔性體積，可適用於幾何條件複雜之基礎形式，又可同時考慮基礎之柔性，為一功能相當強大之分析程式。利用柔性體積法可避免基礎散射問題而直接從事土壤~結構互制分析。

5. 混合模式法

由以上討論可知，有限元素法的優點為可模擬結構系統(含基礎)複雜之幾何形狀與多變之土壤性質，而連體力學法的優點為可以有效地模擬半無限域之幅射阻尼效應，因此有結合上述兩種方法的優點而避免其缺點的「混合模式法」(hybrid method)之發展。簡單地說，混合模式法是以有限元素法模擬近域複雜之結構形狀及土壤性質之多變性等，而以連體力學法模擬遠域土壤之波動特性。

近年來有許多混合模式分析法之發展，有直接應用邊界元素法來縮小分析域，或採用其他方法以推導遠域阻抗矩陣者，在國內常用之程式有下列兩程式：

(1) HASSI (Hybrid Analysis for Soil-Structure Interaction)

HASSI 混合模式分析法由 Gupta et al.(1980)所發展，其分析模型如圖 10 所示，對於一座落於半無限空間上之土壤－結構系統，在鄰近結構物基礎周圍之土壤區域內取一幾何形狀規則之界面，將整個土壤－結構系統分成近域與遠域兩個子結構。圖 10(a)所示為 HASSI 之分析模型示意圖，近／遠域界面為一半球面，其半徑約為基礎等值半徑之 3 倍；圖 10(b)所示之近域（包含結構物與周圍土壤）以有限元素法來模擬，圖 10(c)所示之遠域（指近域以外之半無限層狀土壤）以獨立之遠域阻抗矩陣來模擬，將其加於近域模型之邊界以組成整個土壤－結構系統之阻抗矩陣，用於求解整個系統在土壤～結構互制作用下之動態反應。

HASSI 混合模式分析法之遠域阻抗矩陣係由系統識別法推得，Gupta et al.(1980)選一均質半無限域之地表半球面為遠域界面，假設其上之阻抗可用三組均勻分佈但互相獨立之阻抗係數來代表，如圖 11 所示， s_r 、 s_θ 與 s_ϕ 分別為徑向、切向與環向之單位面積阻抗係數。

據此假設，Gupta et al. 根據均質半無限空間表面圓形剛性基礎之理論解，以系統識別之方法求出三組隨頻率變化之無因次化阻抗係數，據此結果即可直接組成遠域阻抗矩陣，加於近域之邊界從事混合模式法之分析。本法之阻抗係數原係針對均質半無限空間問題所推導而得，後經台電公司委託 EIE 公司針對 HASSI 程式進行研究，提出改善之版本，包括 HASSI-7 與 HASSI-8，具有更佳之分析能力，可延伸應用於層狀土層，只須針對各層土壤採用所對應土層之剪力模數即可，相當方便。

(2) LAYSSI (LAYered Soil-Structure Interaction analysis)

HASSI 混合模式分析法係由李洋傑(1992)所發展，其分析模型如圖 12 所示，其近／遠域界面可為通過基礎周圍土壤區域之任意規則界面，對於軸對稱之問題，一般常取包圍基礎結構之圓柱體界面。LAYSSI 程式之遠域係考慮一層狀土壤覆於半無限空間上，推導其彈性動力學解，再利用間接邊界元素法推得遠域阻抗矩陣，將其加於近域有限元素之邊界從事混合模式法之分析。本法除已發展軸對稱之分析程式外，更已發展三維模式分析程式(LAYSSI-3D)，經過許多如羅東、花蓮試驗等案例分析證明為一相當有效之分析法。

(二) 羅東與花蓮大比例尺模型地震試驗計畫分析結果之評估

對於核能電廠之耐震設計而言，土壤～結構互制效應是一非常重要之課題，在世界各國之核能法規內，均規定核能電廠重要性結構物之耐震設計必須要考慮土壤～結構互制作用之效應。然而目前各國所採用之土壤～結構互制分析方法諸如連體力學法或有限元素法，模式本身都包含有很多的假設與限制，其工程應用性實有必要經由現地試驗或量測加以驗證。

有鑑於此，台灣電力公司乃與美國電力研究所等機構合力推動大型之現地試驗計畫，自 1980 年起，先在羅東進行大比例尺模型地震試驗計畫(Large Scale Seismic Test at Lotung, 以下簡稱羅東 LSST 計畫)，獲得相當豐碩之研究成果。由於羅東計畫之成果引起世界各國之興趣，因此美國、日本、韓國、法國及台灣等五國之電力公司及核能研究單位遂共同出資，於 1990 年開始籌備推動第二期之試驗計畫，選在花蓮地區硬質地盤上進行第二期大比例尺模型地震試驗計畫(Large Scale Seismic Test at Hualien, 以下簡稱花蓮 LSST 計畫)。

兩次試驗計畫之內容包括各興建一座大比例尺的圍阻體實體模型，並佈設密集之監測儀器，包括地震儀、水壓計、土壓計及沉陷儀等，記錄地震時結構體與土壤之動態反應以評估土壤～結構互制效應。同時各參與單位均利用不同的土壤～結構互制分析方法針對兩次計畫中之結構物與地盤反應作預測分析，並與實際量測結果作比較，以評估現有各種土壤～結構互制分析方法的適用性。由於此兩計畫之研究成果頗值參考，因此本計畫特蒐集其分析報告，比較各土壤～結構互制分析方法之分析成果，作為下節評估各分析專業軟體優劣之參考。

A. 羅東大比例尺模型地震試驗計畫

羅東 LSST 試驗之場址位於羅東台電順安變電所內，試驗場址為厚層之沖積土層所形成，其厚度達 200 公尺以上，淺層表土為砂與粘土互層軟弱土層，由於其土壤~結構互制應相當顯著，評估為一理想之試驗之地點。試驗場址之佈置如圖 13 所示，在四分之一比例尺圍阻體周圍佈設有三組呈輻射分布之表面式地震儀陣列，另有二組沉埋式地震儀陣列，可完整記錄遠域及近域之地盤運動。

圍阻體模型為一中空之圓柱體，如圖 14 所示，模型總高度為 1524cm，埋置深度為 457cm，頂版厚 107cm，底版厚 91cm，圓柱體之外徑為 1050cm，壁厚為 30cm。為配合圍阻體模型地震反應之研究，在模型之底板建好與整箇模型建好但周圍尚未回填土壤前，曾分別從事強制振動試驗，以事先瞭解圍阻體與土壤系統之動力特性，繼則在圍阻體內埋設大量地震反應監測儀器，地震儀佈置如圖 15 所示，可記錄結構物之地震反應，以評估土壤與結構互制作用對圍阻體動力反應之影響。

在羅東 LSST 試驗中，台灣電力公司與美國電力研究所曾分別邀請各單位利用各種土壤與結構互制作用分析之方法，針對圍阻體之強制振動試驗及地震反應進行 round-robin 方式之預測與相關性研究，並舉行數次研討會發表分析結果。其中美國電力研究所曾委託美國貝泰(Bechtel)工程顧問公司利用土壤彈簧法、FLUSH 程式、CLASSI 程式、以及 SASSI 程式進行土壤~結構互制作用之比較分析(EPRI, 1991)，由於這四種分析均使用相同之土壤參數，因此其分析結果特別具有意義，可用來比較使用各分析方法所得結果之差異性，以下將舉其針對 1986 年 11 月 14 日花蓮地震(地震編號 LSST16)之分析結果作比較，以探討各分析模式的使用性。

1. 土壤彈簧法分析結果

針對 1986 年 11 月 14 日地震時羅東圍阻體模型之地震反應，美國貝泰工程顧問公司所採用之土壤彈簧法係根據表面基礎之阻抗係數(Richart et al., 1970; Whitman, 1970)，所採用之地震輸入運動包含兩種模式，其一為直接採用地表面之 FA15 加速度記錄作為輸入運動，其二則為將地表面之 FA15 加速度記錄作反捲積分析至基礎底面深度位置之自由場運動，再作為輸入運動進行土壤~結構互制作用分析。兩種分析模式所求得圍阻體地震反應之 5%阻尼比反應譜如圖 16 所示。

由圖 16 之比較可知，利用地表面輸入運動分析模式之分析結果將嚴重高估圍阻體之地震反應，包括底版與頂版之反應。至於使用基礎底面位置運動為輸入運動之分析結果相對較好，由圖 16 中與實際地震紀錄之比較可知，對 EW 方向之反應，此模式之分析結果已能模擬圍阻體底版 F4LS 與頂版 F4US 之地震反應，但對 NS 方向之反應，此模式之分析結果則仍然稍微高估圍阻體底版 F4LS 與頂版 F4US 之地震反應。

檢討上述分析範例，顯然使用基礎底面位置運動為輸入運動之分析模式較合理，整體而言，採用土壤彈簧法之分析結果將較保守。

2. FLUSH 分析結果

在羅東 LSST 試驗中，美國貝泰(Bechtel)工程顧問公司與 Sargent & Lundy (S&L)曾使用 FLUSH 程式進行土壤~結構互制作用之分析，由於 FLUSH 程式本身為 2D 的分析程式，兩分析均首先將羅東圍阻體模型等值為方形結構，取其等值之平面應變模式進行分析，而在第三方向加上等值阻尼盤以模擬其能量消散作用。

針對 1986 年 11 月 14 日地震之地震反應分析，兩公司使用 FLUSH 程式所

求得圍阻體地震反應之 5%阻尼比反應譜如圖 17 所示。由圖 17 之比較可知，兩分析結果之高頻反應均比圍阻體之地震反應為高，但對於低頻反應部份，兩分析結果均比圍阻體之地震反應為小，由於羅東圍阻體模型之顯著頻率約在 2.8Hz 左右，因此兩分析結果均低估圍阻體之地震反應，此乃由於使用等值阻尼盤以模擬能量在第三方向之消散作用所致。

3. CLASSI 分析結果

在羅東 LSST 試驗中，美國貝泰(Bechtel)工程顧問公司與 Luco & Wang 曾使用 CLASSI 程式進行土壤~結構互制作用之分析，前者採用較簡單之分析模式，忽略基礎互制所引起之散射作用，所得分析結果雖不如 Luco & Wang 採用較複雜分析模式之分析結果，但仍在合理之範圍內，且由於其分析模式較簡單，比較適合工程分析使用，因此以下將舉美國貝泰公司使用簡化 CLASSI 模式之分析結果作說明。

在貝泰公司之研究報告中，僅有針對 1986 年 5 月 20 日地震之地震反應分析結果，使用簡化 CLASSI 模式所求得圍阻體地震反應之 5%阻尼比反應譜如圖 18 所示。由圖 18 中與實際地震紀錄之比較可知，對 EW 方向之反應，此模式之分析結果已能模擬圍阻體底版 F4LS 與頂版 F4US 之地震反應，但對 NS 方向之反應，此模式之分析結果則仍然稍微高估圍阻體底版 F4LS 與頂版 F4US 之地震反應。整體而言，使用簡化 CLASSI 模式之分析結果在可接受之範圍內。

4. SASSI 分析結果

在羅東 LSST 試驗中，美國貝泰(Bechtel)工程顧問公司與 Impell 公司均曾使用 SASSI 程式進行土壤~結構互制作用之分析，兩分析之主要差異在於所使用之土壤參數，Impell 分析模式之土壤參數值較大，因此所得分析結果相

對較小。

檢視圖 19 中貝泰公司使用 SASSI 程式針對 1986 年 11 月 14 日地震之地震反應分析結果，與實際地震紀錄之比較可知，對 EW 方向之反應，此模式之分析結果已能模擬圍阻體底版 F4LS 與頂版 F4US 之地震反應，至於對 NS 方向之反應，此模式之分析結果仍然相當不錯，對於羅東圍阻體之顯著振動頻率已能充分掌握，僅稍微高估圍阻體底版 F4LS 與頂版 F4US 之地震反應。整體而言，使用 SASSI 程式之分析結果相當不錯，顯示其為一功能不錯之分析程式。

5. HASSI-7 分析結果

在羅東 LSST 試驗中，台灣電力公司曾委託東方國際工程顧問公司(Eastern International Engineering Consultant, Inc)發展混合模式分析法之 HASSI-7 (Hybrid Analysis for Soil-Structure Interaction – Version 7) 程式，並利用其針對羅東圍阻體之地震反應進行預測分析。

HASSI-7 程式之分析模式為軸對稱模式，針對羅東圍阻體模型所建立之軸對稱分析模型如圖 20 所示，其中近域有限元素之 Region I 為較靠近結構物基礎之土壤，此區域之土壤結構互制效應將較顯著，必須考慮此區域土壤在受較大應變時之非線性行為。針對 1986 年 11 月 14 日地震之地震反應分析，HASSI-7 分析採用 FA15 加速度記錄作為控制運動，先進行自由場場址受震反應分析，求得基礎底版深度位置之運動作為輸入運動，再進行土壤～結構互制作用分析求得圍阻體與地盤之歷時反應，並計算 5% 阻尼比之反應譜如圖 21 所示，將其與相對應位置之真實地震反應譜作比較。由圖 21 之比較可知，利用 HASSI-7 分析所得圍阻體底版 F4LS 與頂版 F4US 之地震反應譜與真實地震記錄之反應譜非常接近，顯示此模式之分析結果已能模擬圍阻體之地震反應。

B. 花蓮大比例尺模型地震試驗計畫

花蓮 LSST 試驗之場址位於美崙台地上，美崙台地為厚層之卵礫石層所形成，其厚度達 200 公尺以上，上覆有約 5m 厚之淺層表土，為一理想之硬質地盤之試驗場所。試驗場址之佈置如圖 22 所示，在四分之一比例尺圍阻體周圍佈設有三組呈輻射分布之表面式地震儀陣列，另有三組沉埋式地震儀陣列，可完整記錄遠域及近域之地盤運動。

圍阻體模型為一中空之圓柱體，如圖 23 所示，模型總高度為 1628cm，埋置深度為 515cm，頂版厚 150cm，底版厚 300cm，圓柱體之外徑為 1052cm，壁厚為 30cm。為配合圍阻體模型地震反應之研究，在模型建好周圍尚未回填前，以及回填土壤後，曾分別對圍阻體模型從事強制振動試驗，以事先瞭解圍阻體與土壤系統之動力特性，繼則在圍阻體內埋設大量地震反應監測儀器，地震儀佈置如圖 24 所示，可記錄結構物之地震反應，以評估土壤與結構互制作用對圍阻體動力反應之影響。

本合作計畫之各資助單位為瞭解各研究機構所發展關於土壤與結構互制作用分析方法之分析能力，特針對圍阻體之強制振動試驗及地震反應進行 round-robin 方式之預測與相關性研究，曾數次舉行研討會交換研究心得。本研究蒐集有各次研討會之報告，並比較各分析方法之分析結果，選取其中對地震反應之分析結果較完整者作比較。

1. HASSI-8 分析結果

針對 1999 年 9 月 21 日集集地震時花蓮圍阻體模型之地震反應，台大慶齡工業研究中心接受台灣電力公司委託採用 HASSI-8 程式進行地震反應之預測分析(台電報告，2001)，所建立之分析模型如圖 25 所示，此模型所採用之土層性質係根據花蓮圍阻體模型強制振動試驗 FVT-2 分析所歸納之最佳參數，各土壤元素之初始土壤性質選自圖 27 所示之地盤模型。

檢視 1999 年 9 月 21 日集集地震之地震記錄，本分析採用 A15 加速度記錄作為控制運動，先進行自由場場址受震反應分析，求得 HASSI-8 分析模型（圖 25）中 N 區域節點位置之自由場運動，再進行土壤～結構互制作用分析求得圍阻體與地盤之歷時反應，所得分析結果則與相對應位置之真實地震記錄比較。為方便比較，直接以 5% 阻尼比之反應譜作比較，便於識別分析結果與真實地震反應之特性是否相符。

利用 HASSI-8 程式分析所得底版頂 BAW 位置與頂版頂 RFW 位置之 5% 阻尼比反應譜分別如圖 28 與 29 所示，圖中亦同時繪有該位置地震記錄之反應譜以資比較。對於 EW 方向之分析，HASSI-8 分析所得之底版與頂版反應譜之顯著頻率約為 2Hz，與地震記錄反應譜非常接近，且兩者隨頻率變化之趨勢與反應值均一致，顯示 HASSI-8 分析已能充分模擬圍阻體之地震反應。對於 NS 方向之分析，HASSI-8 分析所得之底版反應譜仍然與地震記錄一致，頂版反應之顯著頻率仍與地震記錄一致，約在 3~4Hz 之間，惟反應值則稍低，推測其原因仍為所用之地盤模型高估了 NS 方向剪力波速所致，若將其修正，將可獲得更合理之 NS 方向分析結果。

綜上之比較，使用 HASSI-8 程式對花蓮圍阻體地震反應之模擬均與地震記錄相當接近，顯見此程式之分析能力已可用於工程分析之用。

2. LAYSSI 分析結果

針對 1999 年 9 月 21 日集集地震時花蓮圍阻體模型之地震反應，台大慶齡工業研究中心亦同時採用 LAYSSI 程式進行地震反應之預測分析，所建立之分析模型如圖 26 所示，此模型所採用之土層性質與上述 HASSI-8 分析模式完全一樣，亦係根據花蓮圍阻體模型強制振動試驗 FVT-2 分析所歸納之最佳參數，各土壤元素之初始土壤性質選自圖 27 所示之地盤模型。

針對 1999 年 9 月 21 日集集地震之地震反應分析，本分析亦採用 A15 加速

度記錄作為控制運動，先進行自由場場址受震反應分析，求得 LAYSSI 分析模型（圖 26）中最外圍元素節點位置之自由場運動，再進行土壤～結構互制作用分析求得圍阻體與地盤之歷時反應，並計算其 5% 阻尼比之反應譜與相對應位置之真實地震記錄之反應譜作比較。

利用 LAYSSI 程式分析所得底版頂 BAW 位置與頂版頂 RFW 位置之 5% 阻尼比反應譜分別如圖 30 與 31 所示，圖中亦顯示 LAYSSI 之分析結果與地震記錄反應譜之比較。比較 LAYSSI 與 HASSI-8 之分析結果，可知兩程式之分析結果幾乎相同，EW 方向之分析結果與地震記錄反應譜完全一致，而 NS 方向之分析所得頂版反應之顯著頻率一致，而反應值則稍低，其原因仍為花蓮基地地層之異向性。綜上之比較，使用 LAYSSI 程式對花蓮圍阻體地震反應之模擬均與地震記錄相當接近，顯見此程式具有相當不錯之分析能力。

3. 土壤彈簧法分析結果

針對 1994 年 1 月 20 日花蓮地震時花蓮圍阻體模型之地震反應，日本東京電力公司採用土壤彈簧法進行地震反應之預測分析，所建立之分析模型如圖 32 所示，其所採用之土層性質共有三組如圖 33 所示，分別為統一模式(Unified soil model)與其它兩組修正之 D1 與 D2 模式，後兩組修正模式係該研究團隊根據花蓮圍阻體模型強制振動試驗 FVT-2 分析所歸納之參數。

針對 1994 年 1 月 20 日花蓮地震之地震反應預測分析，該分析採用 A15 加速度記錄作為控制運動，先進行自由場場址受震反應分析，求得 -2.5m 深度位置之自由場運動，作為輸入運動進行土壤～結構互制作用分析求得圍阻體與地盤之歷時反應，並計算其 5% 阻尼比之反應譜與轉換函數(transfer function)，再與相對應位置真實地震記錄之反應譜與轉換函數作比較。

利用土壤彈簧法分析所得底版頂 BAW 位置之 5% 阻尼比反應譜與轉換函數分別如圖 34 所示，圖中亦同時繪有該位置地震記錄之反應譜與轉換函數以資

比較。由比較可知，底版之地震記錄顯示在周期 0.2sec(頻率 5Hz)位置有一明顯之尖峰值，但該分析利用三組不同土壤參數所得分析結果均無法顯現此特性。該分析所得頂版頂 RFW 位置之 5%阻尼比反應譜與轉換函數分別如圖 35 所示，同樣亦顯現出同樣之特性，利用三組不同土壤參數分析所得結果均無法顯現地震記錄在周期 0.2sec(頻率 5Hz)位置之明顯尖峰值。

檢討上述分析範例，雖利用三組不同土壤參數進行分析，其所得結果均無法模擬地震時之反應記錄，其原因主要在於土壤彈簧法所使用之土壤等值彈簧係數與阻尼比，很難掌握其正確性，此為使用土壤彈簧法時所受到的最大限制。

4. FLUSH 分析結果

針對 1994 年 1 月 20 日花蓮地震時花蓮圍阻體模型之地震反應，日本東京電力公司亦採用軸對稱 FLUSH 程式進行地震反應之預測分析，所建立之分析模型如圖 36 所示，其所採用之土層性質亦有三組，分別為統一模式(Unified soil model)與其它兩組修正之 D3 與 D4 模式，後兩組修正模式係該研究團隊根據花蓮圍阻體模型強制振動試驗 FVT-2 分析所歸納之參數。

針對 1994 年 1 月 20 日花蓮地震之地震反應預測分析，該分析採用 A15 加速度記錄作為控制運動，先進行自由場場址受震反應分析，求得分析模型之基盤深度位置之自由場運動，作為輸入運動進行土壤～結構互制作用分析求得圍阻體與地盤之歷時反應，並計算其 5%阻尼比之反應譜與轉換函數(transfer function)，再與相對應位置真實地震記錄之反應譜與轉換函數作比較。

利用 FLUSH 程式分析所得底版頂 BAW 與頂版頂 RFW 位置之 5%阻尼比反應譜與轉換函數分別如圖 37 與 38 所示，圖中亦同時繪有該位置地震記錄之反應譜與轉換函數以資比較。由反應譜之比較可知，此研究利用 FLUSH 程式所進行三種模式分析之反應譜均與地震紀錄類似，表示 FLUSH 分析能初步掌握分析系

統之特性；但若更仔細之檢討，地震記錄顯示底版與頂版頂之反應在周期 0.2sec(頻率 5Hz)位置有一明顯之尖峰值，而該分析利用 D3 與 D4 土壤模式分析所得之顯著頻率均約在 6Hz 左右，該分析利用統一土壤模式分析所得之顯著頻率更高達約在 7Hz 左右，且三分析所得之尖峰反應譜值均比地震記錄值稍低。檢討上述分析範例，利用三組不同土壤參數進行軸對稱 FLUSH 程式分析，其所得結果雖與地震紀錄類似，但在顯著頻率與尖峰反應譜值方面仍有稍許之差異。

5. SASSI 分析結果

在花蓮 LSST 計畫中，韓國核能安全研究所 KINS(Korea Institute of Nuclear Safety) 使用 SASSI 程式進行圍阻體模型之地震反應分析，曾分別針對 1995 年 5 月 1 日與 1995 年 5 月 2 日兩次地震進行分析。

KINS 所採用之 SASSI 分析模型如圖 39 所示，為一四分之一之模型，其所採用之土層性質為 CRIEPI 所提出之修正土壤模式，如圖 40 所示。針對 1995 年 5 月 1 日地震之地震反應預測分析，該分析採用 A25L(NS 方向)之加速度記錄作為控制運動，分析所得頂版頂、牆高處、強低處與底版頂四位置之 5%阻尼比反應譜與轉換函數分別如圖 41 與 42 所示，圖中亦同時繪有該位置地震記錄之反應譜與轉換函數以資比較。由反應譜之比較可知，此研究利用 SASSI 程式分析所得反應譜之型式均與地震紀錄類似，尖峰反應值所對應之頻率相當一致，僅尖峰反應值略小於地震記錄之反應值。針對 1995 年 5 月 2 日地震之模擬分析亦得類似之結果。

檢討上述針對 1995 年 5 月 1 日與 1995 年 5 月 2 日兩地震之分析結果，顯示利用 SASSI 程式之分析結果相當不錯，為一功能不錯之分析程式。

(三) 土壤結構互制分析專業軟體優劣評估

根據前述目前較常使用於土壤～結構互制分析方法之理論架構，以及其應用於羅東與花蓮大比例尺模型地震試驗計畫之分析成果，本節將評估各專業分析軟體之優劣，作為核研所選購分析軟體之參考。

1. 土壤彈簧法(Soil Spring Method)

土壤彈簧法是工程上最常使用之簡化分析方法，此法基本上將結構物周圍之土壤簡化成相互獨立彈簧與阻尼盤，用以模擬土壤～結構互制作用。

土壤彈簧法之優點為分析模式簡單、易於計算，而其重點在於如何選定適用之土壤彈簧及阻尼係數，目前已有許多經驗公式可資引用，一旦有了模擬土壤基礎之土壤彈簧及阻尼係數，使用一般具有動力分析能力之程式即可進行土壤～結構互制分析，因此市面上雖有應用土壤彈簧法之分析程式如 SIM Code 等，實際上並沒有需要購買此種程式之必要性，只要掌握如何選定適用之土壤彈簧及阻尼係數即可，再使用一般熟悉慣用之程式反而較方便，容易掌握分析之結果。

此外，土壤彈簧法雖然簡單方便使用，但應注意此法較適用於模擬均勻半無限空間上表面承載之剛性基礎，而其缺點則在於無法考慮基礎之散射作用，應用於埋置基礎之效果將較差。

2. CLASSI 法

CLASSI 程式之理論基礎係利用彈性動力學之基本解(Green function)以組成基礎阻抗矩陣，本方法最大的優點在於對遠域土壤阻抗問題之處理，可以有效地模擬半無限域之幅射阻尼效應，但只有簡單之基礎形式才具有理論解可資

應用，同時並不適於結構物附近土壤材料性質的複雜變化之模擬。

目前 CLASSI 程式已經修正，可以考慮層狀土層、粘彈性土壤或基礎埋置效應，亦採用修正係數之方法表示之。但此法之分析步驟較麻煩，且程式之使用性較差，流通性亦不佳，不易使用為其主要缺點。

3. FLUSH 法

基本上，FLUSH 程式為一有限元素程式，為工程上最常用之分析程式之一。FLUSH 法基本上為二維平面應變分析程式，利用傳導邊界以模擬水平向無限土壤之波傳效應，且在第三方向應用黏滯阻尼盤可作近似三維之模擬，使得分析域可相對地縮減到很小，同時該程式利用擬線性疊代運算之技巧以考慮土壤之非線性效應，可獲得合理之分析結果，故常為工程界所採用。但該程式須有一剛性基盤為其底部邊界條，且結構必須簡化為平面之結構系統，為其在工程應用上所受之限制。

由上所述，可知 FLUSH 程式之應用性很廣，為一般核能廠設計分析時最常使用之分析程式，且此程式流通甚廣，國內很多單位都已有此程式，且已有改進之版本可供使用，建議核研所至少應具備本分析程式，可供一般檢核時使用。

4. SASSI 法

SASSI 法係利用有限元素法結合「柔性體積」子結構分析法而成，此法之優點在於結構與土壤介面為一柔性體積，可適用於幾何條件複雜之基礎形式，又可同時考慮基礎之柔性，為一功能相當強大之分析程式。利用柔性體積法可避免基礎散射問題而直接從事土壤～結構互制分析。

於羅東大比例尺圍阻體地震試驗計劃之總結報告中，美國貝泰公司曾將各種土壤～結構互制分析程式之分析結果與試驗結果作比較，顯示利用 SASSI 程式可得令人滿意之結果，為目前所有程式中功能最完整、且分析結果最合理之分析程式，故建議核研所若欲購買分析程式，應將此程式列為第一優先考慮。

5. 混合模式法

混合模式法之優點是以有限元素法模擬近域複雜之結構形狀及土壤性質之多變性等，而以連體力學法模擬遠域土壤之波動特性。近年來有許多混合模式分析法之發展，有直接應用邊界元素法來縮小分析域，或採用其他方法以推導遠域阻抗矩陣者，如 HASSI(Gupta et al., 1980)混合模式分析法(如圖 8 所示)之遠域阻抗矩陣係由系統識別法推得，如李洋傑(1992)所發展 LAYSSI 程式(如圖 9 所示)之遠域阻抗矩陣係由間接邊界元素法推得，具有模擬層狀土壤覆於半無限空間之能力(三維模式分析程式 LAYSSI3D)，經過許多如羅東、花蓮試驗等案例分析證明為一相當有效之分析法。

台電公司曾經委託 EIE 公司針對 HASSI 程式進行研究，提出改善之版本，具有更佳分析能力，但屬於台電公司之程式，並未對外公開。至於 LAYSSI 程式雖具有很強之分析能力，但仍為研究用之版本，尚未發展成套裝之商業軟體可供使用。

(四) 核四廠耐震一級結構之結構與土壤數學模式之建立與討論

1. 簡介

台灣電力公司核四廠控制廠房 (Control Building) 為地上兩層地下四層的結構物，結構剖面示意圖如圖 43 所示。整棟建築物南北向長 56.4 米、東西向寬 24.4 米，地上結構物高度 10.2 米、埋置深度 23.2 米、基礎版厚達 3 米。一樓樓版高程為 12.3 米，地表高程為 12 米。控制廠房附近場址地層主要可概分為兩層，高程由 12 米至 9.7 米之間的地層為碎石回填層 (crushed stone backfill)，而高程 9.7 米以下至 -88 米者，全為堅硬的完整岩石層 (intact rock)，各地層的主要資料如表 1 所述。

本研究主要是針對核四廠控制廠房進行土壤～結構系統互制分析，本年度進度可細分為三部份：

首先由現地場址的地層條件與土層的動力性質建立自由場的地盤模型，並以核四廠耐震一級結構之設計反應譜求得人造地震，以作為地表輸入運動。再則利用工程上常用的單向度波傳理論之 SHAKE 程式進行反捲積分析，求得在基礎處的土層自由場運動以及地層受震後反應，作為日後動力分析之依據。

其次根據核四廠控制廠房的結構資料建立集中質量模式的結構模型，並進行結構模態的計算。依此結構模型再進行下一階段的土壤～結構系統互制分析。

最後考慮整體現地場址的土壤與結構條件，將結構周圍地層簡化為等值的側向土壤彈簧以及基礎底部的土壤彈簧，再結合集中質量模式的結構模型，可有效的模擬結構側移運動 (side swaying) 以及基礎搖擺運動 (base rocking)，此即為一簡化後的土壤～結構系統互制分析模型。同樣進行模態分析，可作為日後土壤結構互制完整分析之結果比較。

2. 設計反應譜與設計地震

進行核四廠一級耐震設計時，必須以設計地震輸入進行結構物歷時反應分析，經由動力分析結果作為結構物抗地震力設計之依據。一般可由知名之地震紀錄將其 PGA 值比例放大或縮小至設計 PGA 來模擬，亦可以用與設計反應譜相符合之人造地震來代替。本研究設計地震的建立主要是利用 SIMQKE-1 程式製作符合核四廠耐震一級結構之設計反應譜的人造地震。核四廠控制廠房場址之加速度設計反應譜 ($\xi=1\%$) 如圖 44 所示，譜加速度值 Sa 與週期 T 的關係可表示如下

$$\left\{ \begin{array}{ll} Sa=0.29 / T & T \geq 0.3 \text{sec} \\ Sa=1.001 & 0.3 \text{sec} \geq T > 0.105 \text{sec} \\ Sa=7.712T + 0.239 & 0.105 \text{sec} \geq T > 0.04 \text{sec} \\ Sa=40.133T - 1.068 & 0.04 \text{sec} \geq T > 0.036 \text{sec} \\ Sa=30.546T - 0.726 & 0.036 \text{sec} \geq T > 0.03 \text{sec} \\ Sa=0.2 & 0.03 \text{sec} \geq T \end{array} \right.$$

SIMQKE-1 程式是 1976 年由 Vanmarcke 等人所發展，程式製造出來之人造地震主要是由一連串的隨機相位角之正弦波所疊加合成的，再乘上代表地動強度隨著時間變化的視窗函數，並藉由程式本身的迭代調整使得人造地震與設計反應譜之譜密度函數趨於一致，得出符合設計反應譜之人造地震。

本研究之設計地震歷時為 20 秒，設計 PGA 值為 0.2G，所得之人造地震歷時紀錄如圖 45 所示，並根據 US NRC 之 R. G. 1.122 內頻率點要求（如表 2）計算該設計地震之反應譜。圖 46 則是該設計地震阻尼比 $\xi=1\%$ 之反應譜與設計反應譜之比較，結果顯示兩者大致符合，應可以此一人造地震進行下階段分析。

3. SHAKE 程式反捲積分析與自由場之基礎輸入運動

本研究所採用自由場地地震反應之分析方法為 Schnabel 等人所提出的 SHAKE 程式，其分析模型如圖 2 所示，假設地盤為由水平層狀土層所構成，而地層之水平方向振動主要是由一垂直傳遞之水平剪力波（SH waves）所引致，故各地層間的地震運動可利用一維波傳理論所推導各土層間的轉換函數計算得到。此種分析模型雖然簡單，但經許多分析案例顯示具有不錯的分析結果，故為目前工程實務上最常使用之地盤受震反應分析程式。

核四廠控制廠房之自由場地盤主要分為表面 2.3 米深之碎石回填層以及底下之堅硬岩層。為了使用 SHAKE 程式作反捲積分析，將深度 100 米以上之地層細分為 12 層，而在深度 100 公尺以下之地層則視為均勻的半無限域，本研究所採用之自由場地盤模型如圖 47 所示。圖 48 則是代表回填層與岩石層兩種地層土壤剪力模數隨剪應變振幅增大而衰減，以及其阻尼比隨剪應變振幅增大而增加之動力性質曲線，SHAKE 程式分析時將使用等值擬線性法來調整土壤性質以模擬地層之非線性反應特性。

將前述之人造地震當作地表面之輸入運動並且代入表 1 中土層基本資料來進行反捲積分析，以求取深度 23.2 米處之地盤運動，作為日後動力分析時結構基礎之輸入運動，分析所得之歷時紀錄可參見圖 49。與地表輸入運動相互比較可發現基礎深度處地盤運動之最大加速度值只有達到 176 gal 左右，明顯小於地表面輸入運動者。表 3 則為 SHAKE 程式反捲積分析結果，可發現表面回填之碎石土壤層之剪力模數受震後折減的情況較岩石層者為明顯，且在兩層面交界處土層所受之剪應變最大。

4. 控制廠房結構模型之建立

欲進行結構動力分析之前，首先必須建立結構分析模型，但核能廠結構系統複雜，若使用大量且精細之有限元素做完整之模擬，將費時費力又不易達

成分析目的。因此必須針對分析目標作最佳化分析，將部份子結構轉換為集中質量模式 (lumped mass model)，以節省細部模擬的成本，使其可完整代表原有的子結構系統，又方便應用於整個土壤～結構系統互制分析，提高分析之效率與正確性。

(1). 載重與質量慣性矩之模擬

在考慮結構構材呆重、機電設備與管線之載重與設計活載重下，將每一樓層結構之質量集中分布於該樓版之位置，故整體結構之質量與質量慣性矩則是以分散在各樓版高程處節點之質量塊來模擬。經過質量集中後，整個有限元素模型一共有八個節點，其示意圖如圖 50 所示。各節點之質量與質量慣性矩資料參見表 4。

(2). 構件勁度之模擬

在計算有效剪力面積時，內牆與箱型構造物其剪力變形的形狀因子皆為 1.0；在計算時，均假設構件受相同之剪力位移來求得等值剪力勁度。最後計算各樓層中之軸力面積與慣性矩，將每樓層中的構件均以單一樑元素來模擬其等值勁度。在此值得注意的是代表基礎樓版之元素（元素編號 17），由於假設本結構為剛性基礎，故改以剛體元素模擬之。整體有限元素模型示意圖如圖 50 所示，其中共有七個元素，各樓層間元素之軸向面積、慣性矩、剪力面積、材料參數等資料可參見表 5。

(3). 有限元素模態分析

將上述集中質量之簡化結構模型以有限元素法軟體 ABAQUS 進行水平向模態分析，其分析結果如表 6 所示。在 EW 方向 (X 方向)，第一個振動模態發生於頻率 6.84Hz；在 NS 方向 (Y 方向) 之第一個振動模態則為頻率 8.36Hz。

(五) 有限元素模式與集中質量模式間之轉換

實際結構物受地震作用時的動態反應行為會受到基礎土壤變形行為之影響，基礎鄰近土壤會分散消耗震波能量，以及土壤與結構體間位移必須保持諧和一致之關係，並非單純由結構物本身的動態性質就可完整描述，故在進行完整結構動力分析時，必須針對土壤～結構互制作用來進行分析。

本研究在此採用一般結構動力分析常用之結構～土壤彈簧模型來進行簡易的土壤～結構互制分析，將結構側壁與基礎底部之土壤簡化為等值之彈簧元素來模擬，並且以阻尼盤元素來模擬震波能量被土體消散之情況，整體分析模型如圖 51 所示。圖中 K13 至 K18 表示分別連接到 3 至 8 號節點的水平側向土壤彈簧，而 D13 至 D18 則表示 3 至 8 號節點上的水平側向土壤阻尼盤，用以模擬土壤水平側向阻抗；K38 與 D38 則為表示基礎底部搖擺阻抗之土壤彈簧與阻尼盤，基礎底部側移阻抗則是以基礎底部等值側移土壤彈簧 K_{HH} 值與等值側移土壤阻尼盤 D_{HH} 來代表。

1. 側向土壤彈簧與阻尼盤

Novak (1978) [14] 根據粘彈性介質中之波動方程式，以平面應變之假設推導出在水平振動下土壤單位長度之複數水平向勁度值 k_u

$$k_u = G[S_{u1}(a_0, \nu, D) + iS_{u2}(a_0, \nu, D)] \quad (5-1)$$

其中 G 值為土壤剪力模數、 $a_0 = \omega r_0 / C_s$ 為無因次頻率參數（ ω 表振動頻率、 r_0 表基礎等值半徑、 C_s 為土壤剪力波速）、 ν 為土壤包松比（Poisson's ratio）、 $D = \tan \delta$ （ δ 為相位損失角）表在剪力波作用下材料之遲滯阻尼（hysteretic damping）。由式中可知 S_{u1} 代表土壤勁度之部份， S_{u2} 則代表土壤阻尼之部份，

兩者隨著 a_0 、 ν 、 D 參數之變化可由圖 52 查得。

在 (5-1) 式中，虛部數值 $G \cdot S_{u2}$ 為土壤單位長度下之遲滯阻尼力，若要以結構分析常用之黏滯阻尼 (viscous damping) 來進行分析，必須經由下列關係式將阻尼力轉換為以黏滯阻尼盤 (dashpot) 來表示之型態

$$\begin{aligned} G \cdot S_{u2} &= C a \\ C &= \frac{G \cdot S_{u2}}{a} \end{aligned} \quad (5-2)$$

其中 C 為黏滯阻尼係數、 ω 為振動頻率。

根據 (5-1) 與 (5-2) 式，代入經 SHAKE 程式反捲積分析後所得之土壤剪力模數 G 值，可計算在考慮土層非線性動力性質下之等值側向土壤彈簧 K_i 以及等值側向阻尼盤 D_i

$$\begin{aligned} K_i &= G_i \cdot S_{u1i} \cdot \bar{L}_i \\ D_i &= \frac{G_i \cdot S_{u2i}}{a} \cdot \bar{L}_i \end{aligned} \quad (5-3)$$

其中 i 表示節點標號、 $\bar{L}_i = (L_{i-1} + L_i)/2$ 為第 i 個節點處等值側壁長度 (L_{i-1} 、 L_i 表接鄰第 i 個節點之上下兩個元素長度)、 ω 表振動頻率。計算所得之側向土壤彈簧與阻尼盤數值如表 7 所示。在此處，振動頻率是用前節結構模態分析之第一振態頻率 (first mode) 代入 (5-1) 與 (5-2) 式計算，意即 EW 方向以振動頻率 6.84Hz 代入，而 NS 方向振動頻率則以 8.36Hz 來計算。

2. 基礎底部土壤彈簧與阻尼盤

Veletsos and Wei (1971) 曾發表於彈性半空間上無質量剛性表面基礎之阻抗，可將土壤阻抗表示為下列形式

$$\begin{Bmatrix} F_H \\ M \end{Bmatrix} = Gr_0 \begin{bmatrix} \frac{8}{(2-\nu)} K_{HH} & \frac{8}{(2-\nu)} K_{HM} \\ \frac{8}{(2-\nu)} K_{MH} & \frac{8r_0}{3(1-\nu)} K_{MM} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_H \\ r_0\theta \end{Bmatrix} \quad (5-4)$$

其中 F_H 、 M 代表剛性基礎所受之動態水平力與彎矩； G 表土壤剪力模數； r_0 為基礎等值半徑； K_{HH} 、 K_{MM} 分別代表土壤正規化水平阻抗與搖擺阻抗，而 K_{HM} (K_{MH}) 則為土壤水平與搖擺運動之正規化耦合阻抗。

上述這些正規化土壤阻抗函數可寫成

$$K_{mn} = k_{mn} + ia_0 c_{mn} \quad (m, n = H, M, V) \quad (5-5)$$

實部數值表正規化土壤勁度係數，虛部數值為正規化土壤阻尼係數，而這些數值則與無因次頻率參數 a_0 有關，可由圖 52 查得。

值得注意的是由式 (5-4)、(5-5) 所計算得出之土壤搖擺阻抗，乃是根據剛性表面基礎形式所推導求出，因此若直接將由 (5-5) 所求出之土壤阻抗帶入分析模型進行模態分析，勢必會因為未考慮埋置深度效應而低估基礎底部的土壤阻抗值。因此，若要求出基礎底部之有效等值土壤搖擺阻抗 K'_M 與土壤水平阻抗 K'_H ，則必須由 (5-5) 所求出之土壤阻抗再進行埋置效應修正。Roesset(1980)建議可用下列關係式來考慮土壤阻抗之埋置效應

$$\begin{aligned} K'_H &= K_H \left(1 + \frac{2E}{3R}\right) \left(1 + \frac{5E}{4H}\right) = \alpha K_H \\ K'_M &= K_M \left(1 + 2\frac{E}{R}\right) \left(1 + 0.7\frac{E}{H}\right) = \beta K_M \end{aligned} \quad (5-6)$$

其中 K_M 為剛性表面基礎模式所得之土壤搖擺阻抗、 K_H 為剛性表面基礎模式所得之土壤水平阻抗、 E 表示基礎埋置深度、 R 為基礎有效半徑；若為處理有限空間中土壤阻抗問題則 H 表示該有限土層之深度。修正過後的基礎底部土壤等值彈簧與阻尼盤數值如表 8 所示。

3.有限元素模態分析

將上述所求之土壤側向等值彈簧與基礎底部土壤彈簧結合先前結構有限元素模型可得一完整之結構～土壤彈簧模型，同樣以 ABAQUS 程式進行水平向模態分析，表 8 詳細列出其分析結果。在 EW 方向，第一模態由先前結構模型之 6.84Hz 提高至 9Hz；在 NS 方向第一振動模態則為 8.36Hz 提高至 10.22Hz。

此外，由質量參與因子來觀察，兩方向之第一振動模態皆以搖擺運動為主，顯示基礎底部之等值土壤搖擺彈簧 K38 與阻尼盤 D38 對於整體土壤結構之動力行為反應扮演了非常重要的角色，再加上土壤彈簧之效應使得結構～土壤彈簧模型的第一模態提高，先前所計算之土壤彈簧與阻尼盤必須重新檢驗計算，才可使得本研究所建立之結構～土壤彈簧模型能夠對於整體土壤結構系統作有效模擬，以便能夠掌握控制廠房在受震後實際的動力反應行為。

在 EW 與 NS 方向分別以振動頻率為 9Hz 及 10.22Hz 來代入上述各個計算式，重新計算後的土壤彈簧與阻尼盤如表 10 所示，再以此兩組參數重新進行水平模態分析，其結果如表 11 所示，重算後的第一振動模態分別為 8.99Hz 與 10.21Hz，顯示此時的土壤彈簧與阻尼盤已經可以有效模擬整個系統之第一模態反應，日後可以此進行時間域動力分析。

六、結論與建議

基於本年度研究計畫之研究成果，可得下列數點結論如次：

1. 評估現有可供商業使用之土壤～結構互制分析套裝軟體，其中屬於土壤彈簧法者，只要自行建立如何選定土壤彈簧與阻尼係數之資料庫，再使用一般具動力分析功能之軟體即可，並不須購買特殊之分析程式；其中屬於 2-D 分析之有限元素 FLUSH 程式，為一般核能廠耐震分析時最常使用之分析程式，且其流通性甚廣，故核研所應設法建立使用此程式之分析能力；至於 3-D 之分析程式 SASSI，經羅東與花蓮大比例尺圍阻體模型地震試驗計畫之比較分析，顯示其具有完整與不錯之分析能力，故本研究計畫建議應優先考慮購買此程式，並熟悉其分析方法，以提昇核研所整體之分析能力。
2. 本研究利用 SIMQKE-1 程式製作與反應譜相符合之人造地震，並利用 SHAKE 程式進行地盤受震反應分析，以求取供土壤～結構互制作用分析使用之基礎輸入運動，此兩程式均可技術移轉至核研所供分析使用。
3. 本研究針對核四廠控制廠房建立集中質量模式，並擬具埋置基礎側壁與底版土壤彈簧與阻尼係數之計算方法，可供建立集中質量模式使用。
4. 本研究針對核四廠控制廠房之集中質量模型分析其振動模態與顯著頻率，分析所得兩水平方向之第一振動模態頻率均與原設計分析報告之結果非常接近，顯見所建分析模式之正確性，惟第二振動模態所對應之頻率則稍有差異，應在後續研究中繼續探討。

基於上述研究成果與建議，針對後續研究尚有下列兩點建議：

1. 本研究計畫所提分析步驟相當完整，建議核研所可據此建立安全檢核之標準分析程序，並積極培訓人才，提昇分析能力，以從事國內核能廠耐震能力之

安全檢核分析。

2. 建議核研所與本研究計畫研究人員，針對核四廠控制廠房進行平行與獨立之分析，相互比較分析結果，以檢核不同分析程式間之差異，以確實掌握核四廠之受震反應。

七、參考文獻

1. 李洋傑，(1992) ”層狀土壤與結構物之互制作用分析”，台灣大學土木工程學研究所博士論文。
2. 陳正興，吳偉特，蔣繼忠，黃俊鴻，陳立言，江志俊，1989/06, "羅東核能廠模型基地土壤地震反應之量測(一)", 行政院國家科學委員會防災科技研究報告 77-61 號。
3. 陳正興，吳偉特，黃俊鴻，1991/1, "羅東核能廠模型基地土壤地震反應之量測(三)", 行政院國家科學委員會防災科技研究報告 79-41 號。
4. 陳正興、李洋傑，2001/11, "花蓮圍組體模型地震反應之相關性研究"，台灣電力公司研究計畫成果報告，pp. 142。
5. Apsel, R.J., and J.E. Luco, 1987, "Impedance Functions for Foundations Embedded in A Layered Medium: An integral Equation Approach", *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 15, 213-231.
6. Miller, C. A. and Costantino, C.J., 1979, 'Soil-structure interaction methods: SIM code', *NUREG/CR-1717, III*, Brookhaven National Laboratory, New York.
7. Chen, C.H., Lee, Y.J., Jean, W.Y., Katayama, I. and Penzien, J., 1990/10, "Correlation of Predicted Seismic Response Using Hybrid Modeling with EPRI/TPC Lotung Experimental Data", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.19, No.7, 993-1024.
8. Chen, C.H., Yang, S.H., 1999/09, "Use of Simple Model to Predict the Forced Vibration Response of Hualien Model Structure," *The Chinese Journal of Mechanics*, Series A, Vol. 15, No.3, 117-126.
9. Wong, H. L. and Luco, J. E., 1976, 'Dynamic response of rigid foundation of arbitrary shape', *Earthquake engineering and structural dynamics*, **4**, 576-587, 1976.
10. Tang, H. T. et al., 1991, 'The Hualien Large-Scale Seismic Test for soil-structure interaction research', *Trans. of the 11th SMiRT*, Tokyo, Japan, **K04/4**, 1991.
11. Lysmer, J., Tabatabaie, M., Tajirian, F., Vahdani, S. and Ostadan, F., 1981, 'SASSI – A System for Analysis of Soil-Structure Interaction', *Report No. UCB/GT/81-02*, University of California, Berkeley, CA, 1981.
12. Novak, M. et al.: 'Dynamic soil Reactions for plane strain case,' *The Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, 1978.
13. Gupta, S., Penzien, J., Lin, T.W. and Yeh, C. S., 1982, 'Three-dimensional hybrid modelling of soil-structure interaction', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**, 69-87, 1982.
14. Wong, H.L. and J. E. Luco, 1980, "Soil-Structure interaction: A Linear Continuum Mechanics Approach (CLASSI)", Report CE79-03, USC, Los Angeles, Cal., U.S.A.
15. Lysmer, J., T. Utaka, C.F. Tsai, and H.B. Seed, 1975, 'FLUSH – A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure interaction Problem', Report EERC-75-30, University of California, Berkeley.

16. Gupta, S., T.W. Lin, J. Penzien and C.S. Yeh, 1980, "Hybrid-Modeling of Soil Structure interaction", Report No. EERC 80-09, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, U.S.A.
17. Chen, C.H. and J. Penzien, 1986, "Dynamic Modeling of Axisymmetric Foundations", J. of Earthquake Eng. and Structural Dynamics, Vol.14, 823-840.
18. TEPCO., 1993a, 'Hualien LSST Project, Status Report of the forced Vibration Test Results, (Before Backfill)', Report, Tokyo Electric Power Co., Tokyo, Japan.
19. CRIEPI., 1993a, "The Unified Model of the Ground for FVT-1 Analysis," Report, Central Research institute of Electric Power industry, Tokyo, Japan.
20. CRIEPI., 1993b, "Soil Investigation Report for Hualien Project," Report, Central Research institute of Electric Power industry, Tokyo, Japan.
21. TEPCO., 1993b, "Hualien LSST Project, Status Report of the forced Vibration Test Results, (After Backfill)," Report, Tokyo Electric Power Co., Tokyo, Japan.
22. TEPCO., 1996, "Hualien LSST Project Status Report – Post Correlation Analyses of the Earthquake Records on Jan. 20, 1994", Report, Tokyo Electric Power Co., Tokyo, Japan.
23. Richart, F.E., Hall Jr., J.R. and Woods, R.D., 1970, "Vibrations of Soils and Foundations", prentice-Hall, New Jersey.
24. Whitman, R.V., 1970, "Soil-Structure Interaction, Seismic Design for Nuclear Power Plants", MIT Press.
25. Schnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed, 1972, "SHAKE – A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", Report EERC72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA.
26. Taiwan Power Company, 1987, "Computer Program HASSI-7, Hybrid Analysis of Soil-Structure Interaction", Report by Eastern International Engineers, Inc.
27. Taiwan Power Company, 1989, "Computer Program HASSI-8, Hybrid Analysis of Soil-Structure Interaction", Report by Eastern International Engineers, Inc.
28. Veletsos, A.S. and Y.T. Wei, 1971, "Lateral and Rocking Vibration of Footings", Report No. 8, C.E. Dept., Rice University, Houston, Texas, U.S.A.
29. Luco, J.E. and R.A. Westmann, 1971, 'Dynamic Response of Circular Footings', J. Eng. Mech. Eng. Div., ASCE, Vol. 97, 1381-1395.
30. Day, S.M., 1977, 'Finite Element Analysis of Seismic Scattering Problems', Ph.D. Dissertation, University of California, San Diego, CA.
31. KINS, 1996, "Earthquake Response Analysis by SASSI – May 1 and 2, '95 Earthquakes", Korea Institute of Nuclear Safety.
32. EPRI, 1991, "A Synthesis of Predictions and Correlation Studies of the Lotung Soil-Structure Interaction Experiment", Final Report, EPRI NP-7307-M, Project 2225-9.

表 1 核四廠控制廠房場址土層參數

Soil type	Level. (m)	Vs(m/s)	ξ (%)	ρ (t/m ³)	ν
Crushed stone Backfill	12 ~ 9.7	192	0.46	2.24	0.48
Intact Rock	9.7 ~ -88	1370	0.307	2.63	0.40

表 2 US NRC 之 R. G. 1. 122 設計反應譜內頻率點之規定

頻率範圍(Hz)	頻率增量(Hz)
0.2-3.0	0.10
3.0-3.6	0.15
3.6-5.0	0.20
5.0-8.0	0.25
8.0-15.0	0.50
15.0-18.0	1.0
18.0-22.0	2.0
22.0-34.0	3.0

表 3 SHAKE 程式反捲積分析結果

LAYER NO.	THICKNES S (m)	NEW D (%)	NEW G (KN/m ²)	NEW Vs (m/s)	ν	ρ (T/m ³)	AVG Vs (m/s)
1	2	0.036	51148.27	150	0.48	2.28	147
2	0.3	0.057	38175.91	129	0.48	2.28	
3	2.1	0.006	4997300	1366	0.40	2.68	1341
4	2	0.006	4993094	1365	0.40	2.68	
5	2.7	0.007	4979783	1363	0.40	2.68	
6	4.75	0.007	4965697	1361	0.40	2.68	
7	6.35	0.008	4926146	1356	0.40	2.68	
8	3	0.009	4897549	1352	0.40	2.68	
9	6.8	0.01	4874344	1349	0.40	2.68	
10	20	0.011	4821717	1341	0.40	2.68	
11	20	0.011	4767986	1334	0.40	2.68	
12	30	0.012	4743740	1330	0.40	2.68	

表 4 集中質量模型之節點參數

Level.	Node	Mass(ton)			Mass moment of inertia(ton . m ²)	
		X	Y	Z	Ixx	Iyy
22.2	1	5150	5150	2690	1021000	302200
17.15	2	6660	6660	4425	1459000	433300
12.3	3	5440	5440	3988	1640000	385400
7.6	4	5910	5910	4113	1761000	405700
2.9	5	6060	6060	5147	1801000	413700
-1.85	6	6090	6090	5956	1848000	438700
-8.2	7	7860	7860	7860	2218000	470000
-11.2	8	5700	5700	5700	1512000	283800

表 5 集中質量模型之元素參數

Element	Axial area (m ²)	Shear area (m ²)		Moment inertia (m ⁴)		G (kN/m ²)	E (kN/m ²)
	A	As(X)	As(Y)	Ixx	Iyy		
11	169.5	117.1	60.1	36490	10320	11805354	27860400
12	237.4	112.9	133.1	63050	20720	11805354	27860400
13	242	112.4	135.4	66600	20920	11805354	27860400
14	238.3	118	130.9	64790	20580	11805354	27860400
15	285.6	134.1	162.8	69680	21540	11805354	27860400
16	291.1	137.3	165.8	73560	21470	11805354	27860400
17	-	-	-	-	-	-	-

表 6 集中質量有限元素模型之模態分析結果

EW 方向

Mode No.	Frequency (Hz)	Participation factors	
		X-Component	Z- Rotation
1	6.8387	1.3155	-20.354
2	19.291	4.59E-01	5.68E+00
3	30.785	1.09E-01	-2.0354
4	39.19	0.19188	2.6595
5	51.468	-8.90E-02	4.18E-02

NS 方向

Mode No.	Frequency (Hz)	Participation factors	
		X-Component	Z- Rotation
1	8.3582	1.3243	-22.285
2	19.572	2.55E-01	9.16E+00
3	26.14	-2.80E-01	7.6515
4	35.98	0.22339	1.4513
5	50.034	-1.46E-01	-2.66E+00

表 7 側向土壤彈簧與阻尼盤

	Level. (m)	Depth(m)	\bar{L} (m)	Kc (kN/m)
K13	12.3	0	2.35	1.07E+06
K14	7.6	-4.7	4.7	8.80E+07
K15	2.9	-9.4	4.725	8.84E+07
K16	-1.85	-14.15	5.55	1.04E+08
K17	-8.2	-20.5	4.675	8.75E+07
K18	-11.2	-23.5	1.5	2.81E+08

	Level. (m)	Depth(m)	\bar{L} (m)	Dc (kN . s/m)	
				F=6.84Hz(EW)	F=8.36Hz(NS)
D13	12.3	0	2.35	4.06E+04	4.60E+04
D14	7.6	-4.7	4.7	3.33E+06	3.77E+06
D15	2.9	-9.4	4.725	3.34E+06	3.79E+06
D16	-1.85	-14.15	5.55	3.93E+06	4.45E+06
D17	-8.2	-20.5	4.675	3.31E+06	3.75E+06
D18	-11.2	-23.5	1.5	1.06E+06	1.20E+06

表 8 基礎底部土壤彈簧與阻尼盤

	EW	NS
K_H (kN/m)	4.62E+08	4.58E+08
$K'_H=\alpha K_H$	7.72E+08	7.64E+08
D_H (kN . s/m)	4.05E+06	4.13E+06
$D'_H=\alpha D_H$	6.77E+06	6.89E+06
K_M (kN . m/rad)	1.59E+11	1.52E+11
$K'_M=\beta K_M$	4.78E+11	4.57E+11
D_M (kN . m . s /rad)	2.27E+08	2.84E+08
$D'_M=\beta D_M$	6.81E+08	8.51E+08

表 9 結構～土壤彈簧有限元素模型之模態分析結果

EW 方向

Mode No.	Frequency (Hz)	Participation factors	
		X-Component	Z- Rotation
1	9.0012	1.2952	-23.756
2	22.678	5.88E-01	3.6587
3	31.946	0.4336	-0.70601
4	37.756	4.14E-01	5.95E+00
5	45.742	2.58E-01	3.47E+00
6	54.149	-9.24E-02	-2.0525
7	59.61	-2.78E-02	1.2669
8	63.981	-4.03E-02	-1.36E+00

NS 方向

Mode No.	Frequency (Hz)	Participation factors	
		X-Component	Z- Rotation
1	10.219	1.2925	-28.925
2	19.568	2.73E-01	6.8002
3	27.494	-0.76366	3.641
4	35.242	5.02E-01	4.19E+00
5	44.046	2.67E-01	7.34E+00
6	47.277	-4.48E-02	2.3147
7	54.48	-1.07E-01	-1.8583
8	67.054	-1.00E-02	-2.34E+00

表 10 疊算第一模態後之土壤彈簧與阻尼盤

EW	Level.	Kc(kN/m)	Dc(kN · s/m)
K13	12.3	1.16E+05	2.28E+05
K14	7.6	9.35E+07	3.01E+06
K15	2.9	9.40E+07	3.03E+06
K16	-1.85	1.10E+08	3.56E+06
K17	-8.2	9.30E+07	3.00E+06
K18	-11.2	2.98E+07	9.62E+05
K _H	-11.2	7.60E+08	6.95E+06
		Kc (kN · m/rad)	Dc (kN · m · s/rad)
K38	-11.2	4.46E+11	9.36E+08

NS	Level.	Kc(kN/m)	Dc(kN · s/m)
K13	12.3	1.16E+05	2.25E+05
K14	7.6	9.35E+07	3.85E+06
K15	2.9	9.40E+07	3.87E+06
K16	-1.85	1.10E+08	4.55E+06
K17	-8.2	9.30E+07	3.83E+06
K18	-11.2	2.98E+07	1.23E+06
K _H	-11.2	4.03E+08	6.23E+06
		Kc (kN · m/rad)	Dc (kN · m · s/rad)
K38	-11.2	4.35E+11	1.02E+09

表 11 疊算第一模態後結構～土壤彈簧有限元素模型之模態分析結果

EW 方向

Mode No.	Frequency (Hz)	Participation factors	
		X-Component	Z- Rotation
1	8.987	1.2948	-23.762
2	22.661	5.88E-01	3.6709
3	31.899	0.43414	-0.67685
4	37.665	4.12E-01	5.97E+00
5	45.649	2.50E-01	3.38E+00
6	54.116	-8.97E-02	-2.046
7	59.517	-2.67E-02	1.2698
8	63.954	-4.02E-02	-1.35E+00

NS 方向

Mode No.	Frequency (Hz)	Participation factors	
		X-Component	Z- Rotation
1	10.211	1.3028	-28.772
2	19.334	2.97E-01	6.9189
3	26.898	-0.79266	2.3172
4	32.776	4.63E-01	5.92E+00
5	41.804	1.04E-01	5.30E+00
6	47.063	-7.01E-03	1.9385
7	53.935	4.59E-02	1.3072
8	67.028	-6.97E-03	-2.52E+00

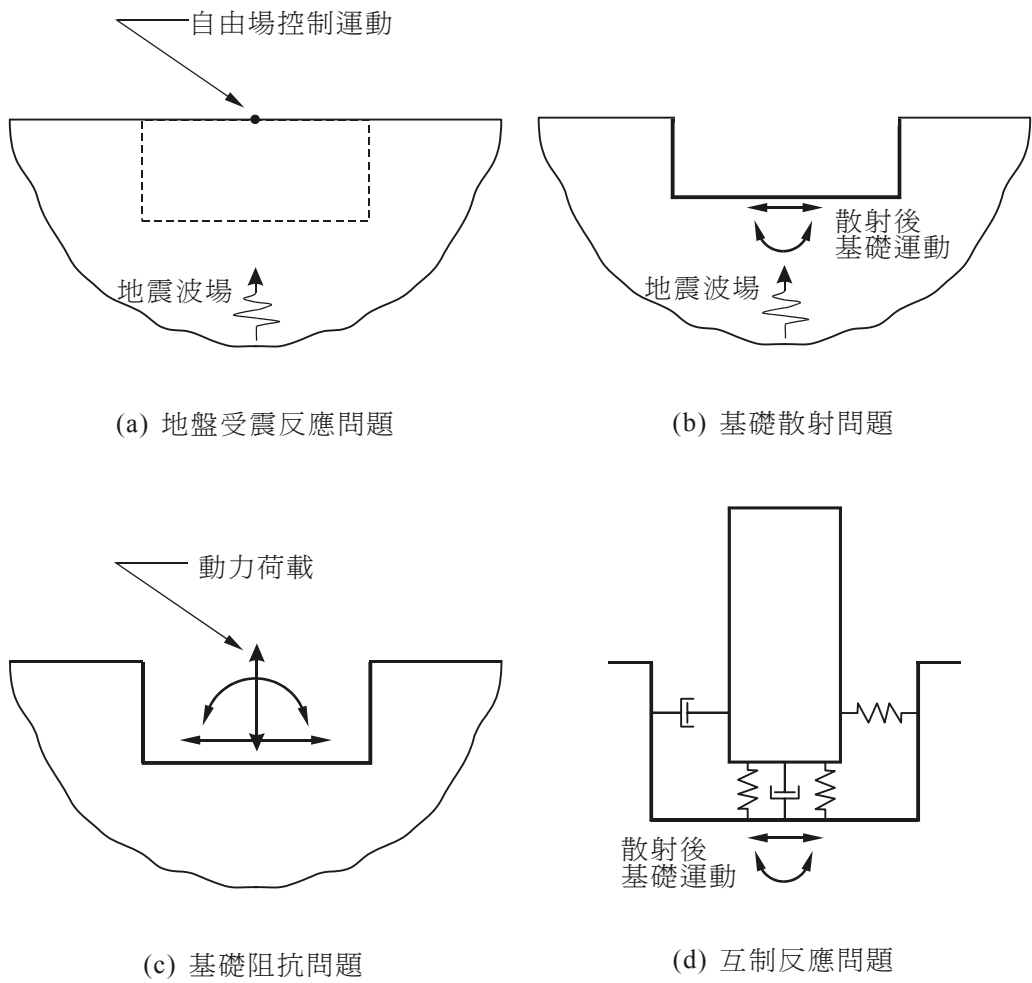


圖 1 土壤～結構互制作用問題

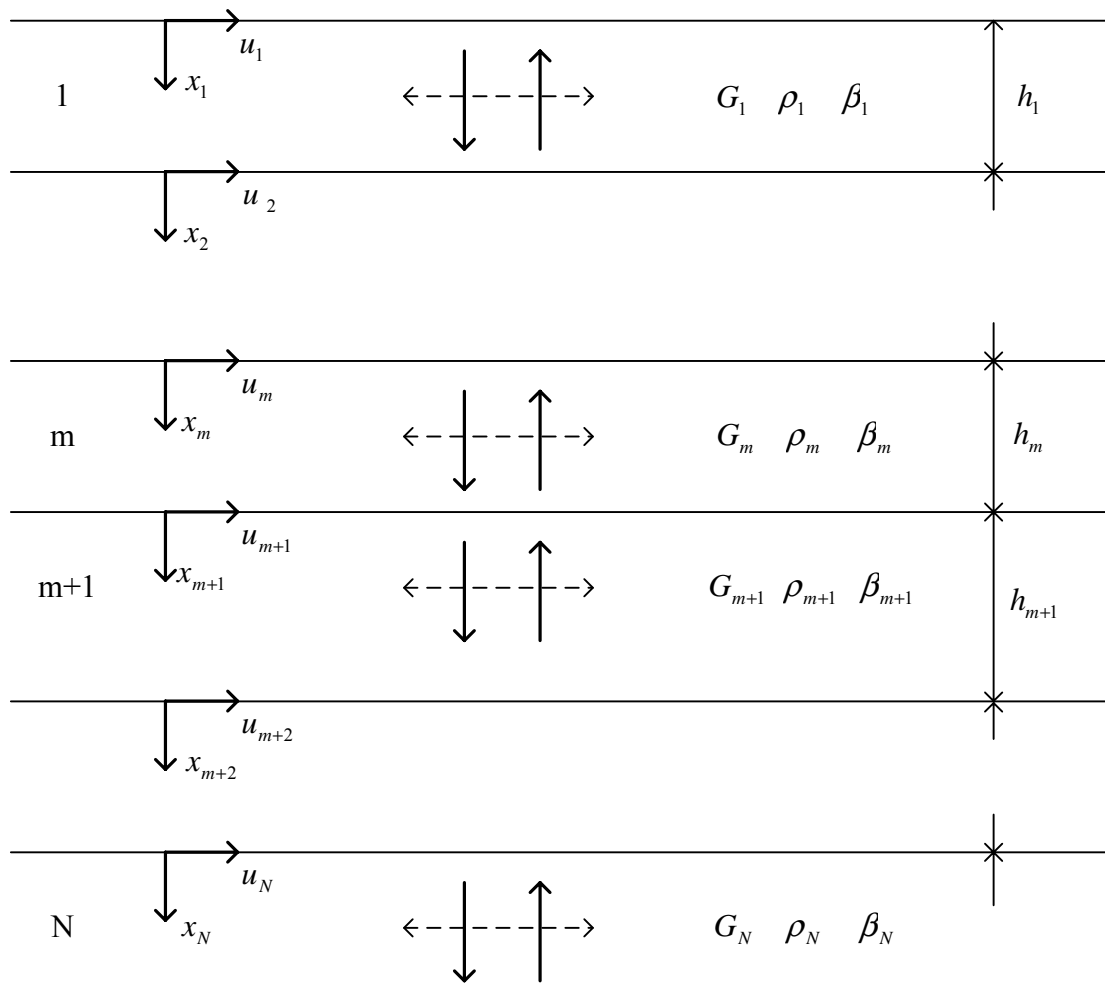
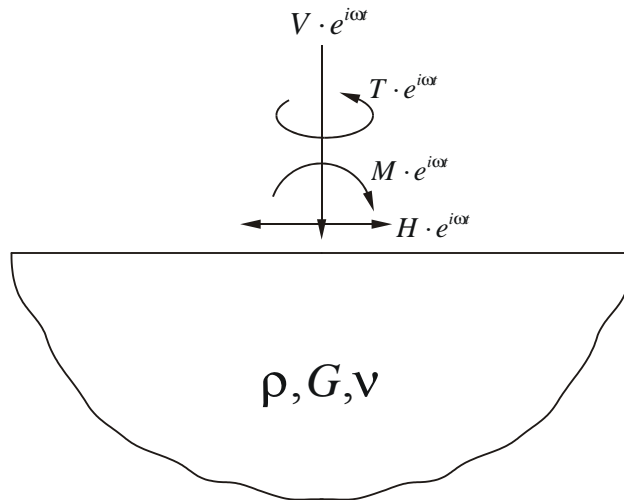


圖 2 SHAKE 分析模式

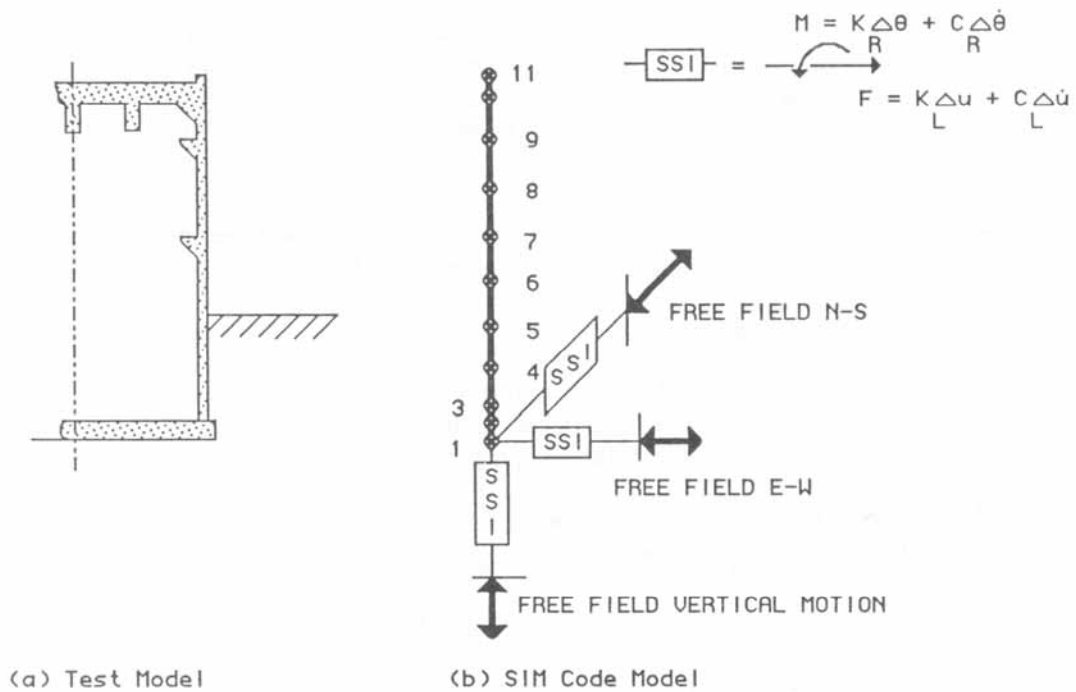
Closed-form solutions for the rigid plate



$$\begin{Bmatrix} \Delta_T \\ \Delta_V \\ \Delta_H \\ \Delta_M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{TT} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{VV} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{HH} & C_{HM} \\ 0 & 0 & C_{MH} & C_{MM} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ V \\ H \\ M \end{Bmatrix}$$

Five independent compliance functions
 $C_{TT}, C_{VV}, C_{HH}, C_{MM}$
 and C_{HM} or C_{MH}

圖 3 均質半無限空間表面之剛性圓形基礎承受簡諧動力載重之變形



(a) Test Model

(b) SIM Code Model

圖

4 土壤彈簧模式

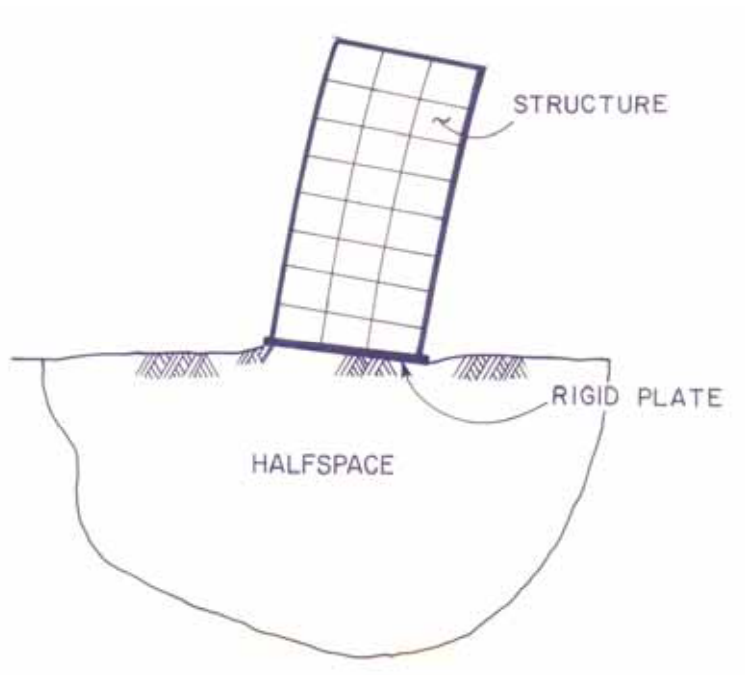


圖 5 連體力學模式

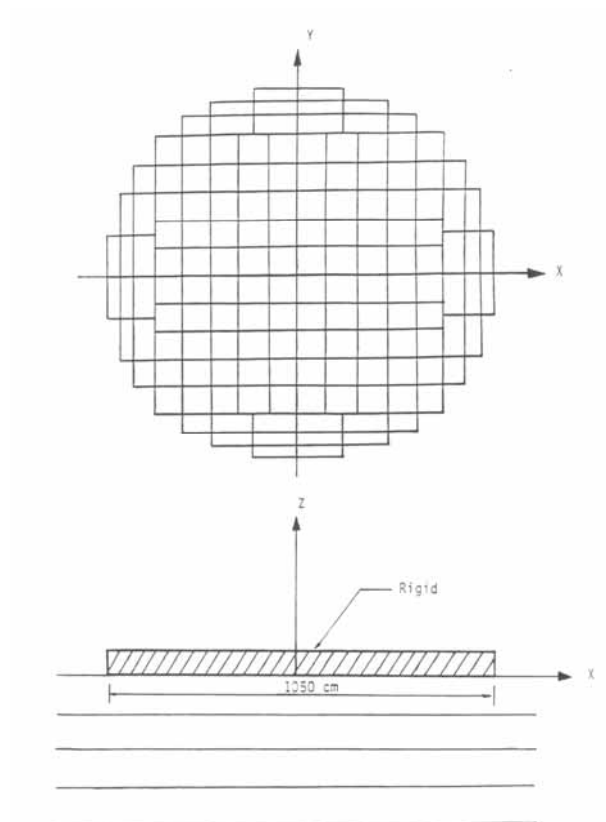


圖 6 CLASSI 模式

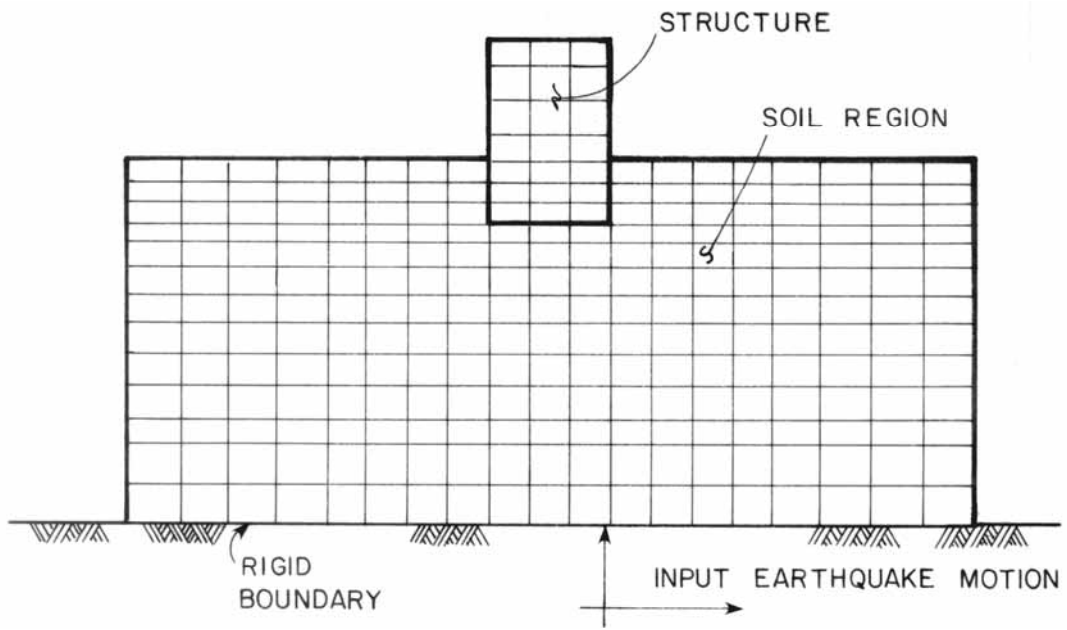


圖 7 有限元素模式

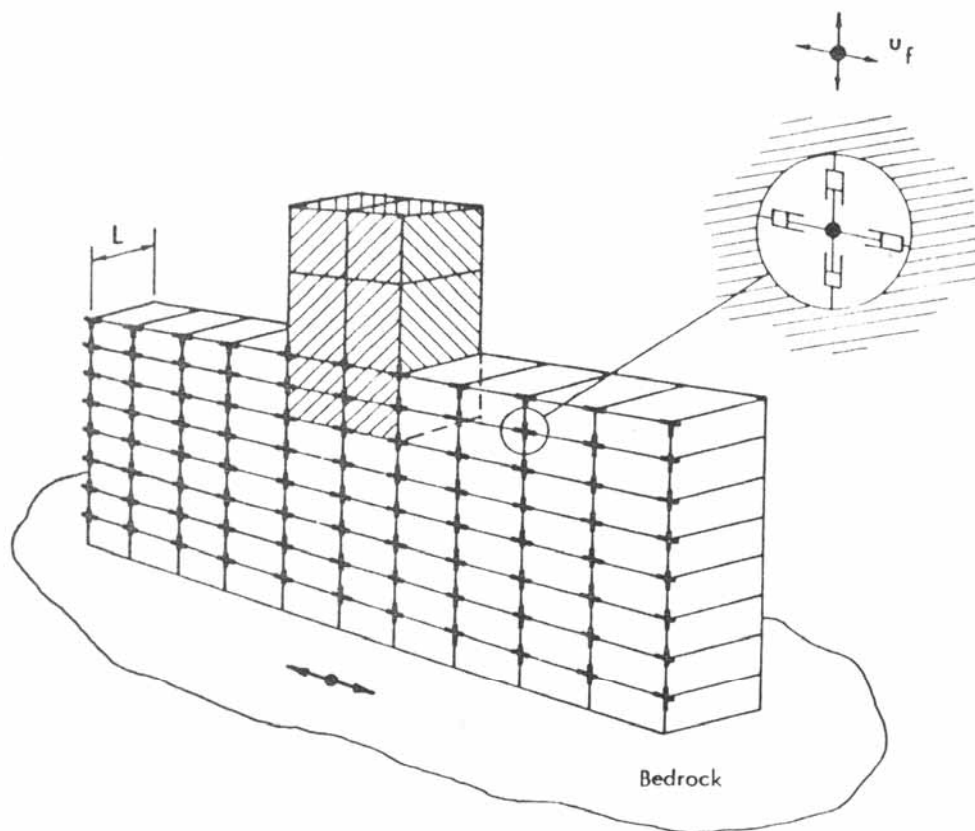
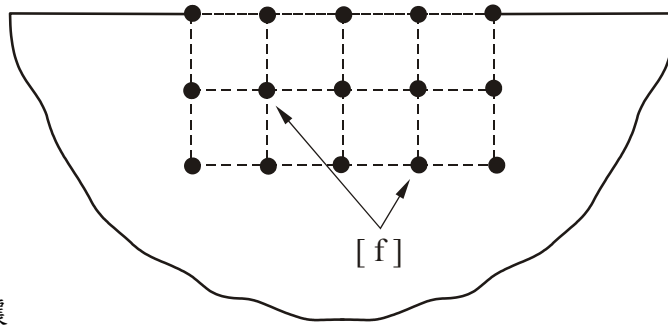
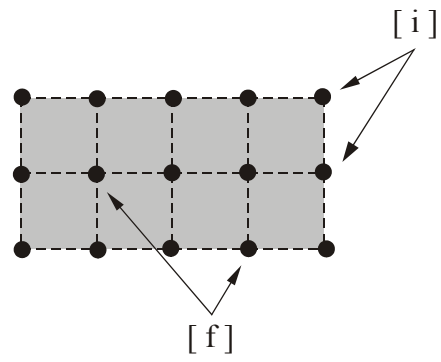


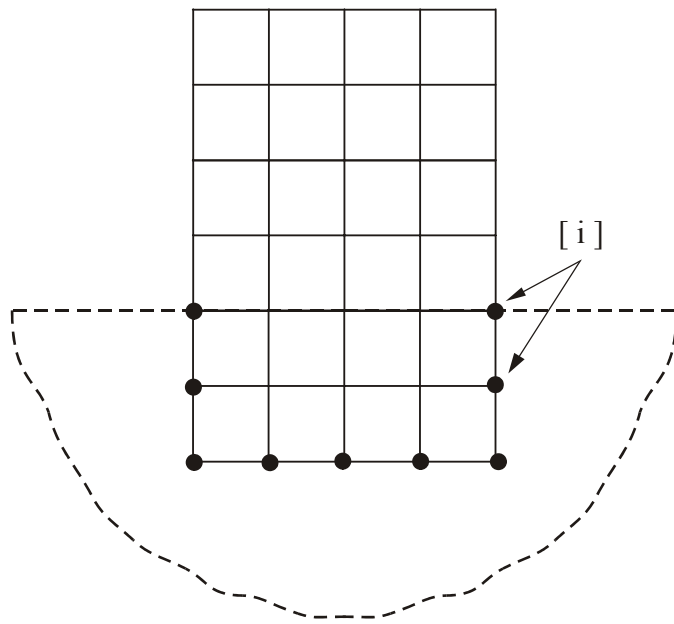
圖 8 FLUSH 模式(Lysmer, et. al., 1971)



(a) 自由場土壤

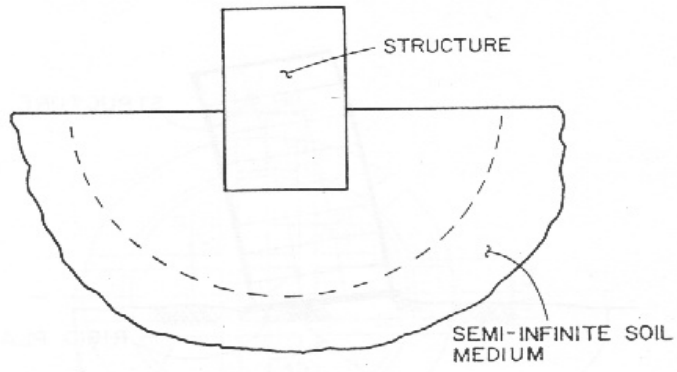


(b) 挖出之土壤

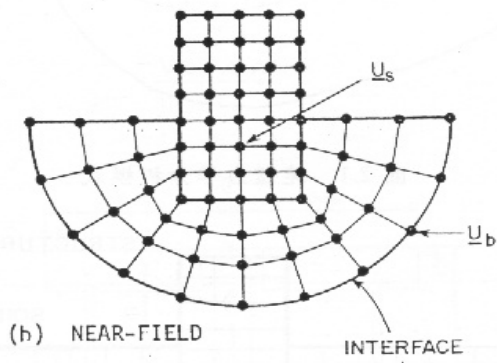


(c) 結構

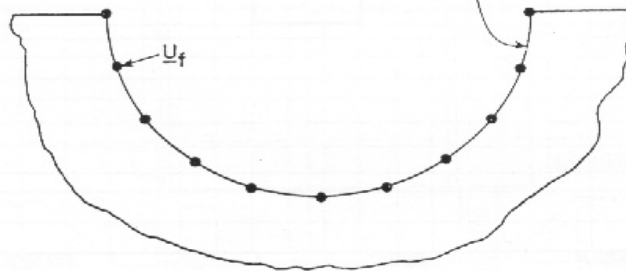
圖 9 SASSI 之「柔性體積」子結構



(a) SOIL-STRUCTURE SYSTEM



(b) NEAR-FIELD



(c) FAR-FIELD

圖 10 HASSI 混合模式分析法

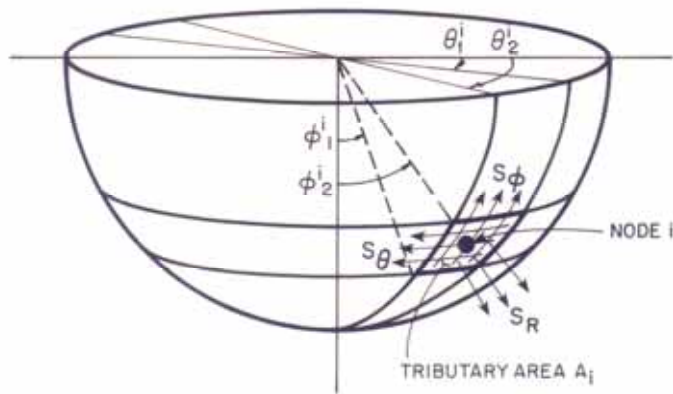
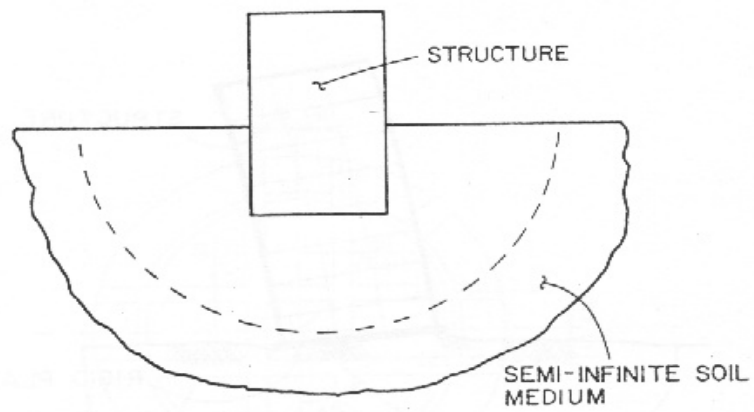
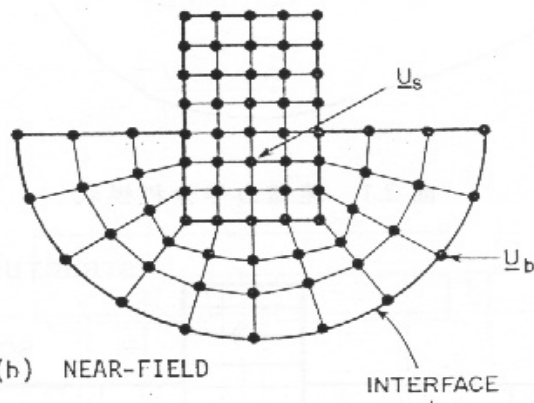


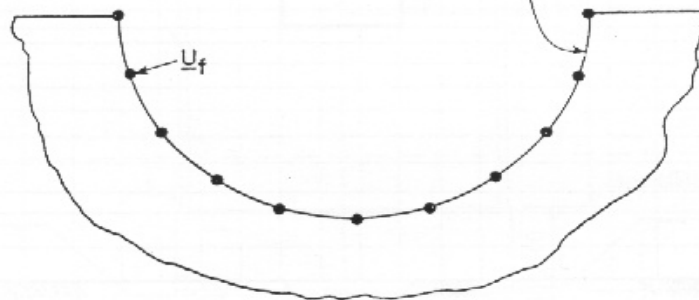
圖 11 HASSI 混合模式分析法



(a) SOIL-STRUCTURE SYSTEM

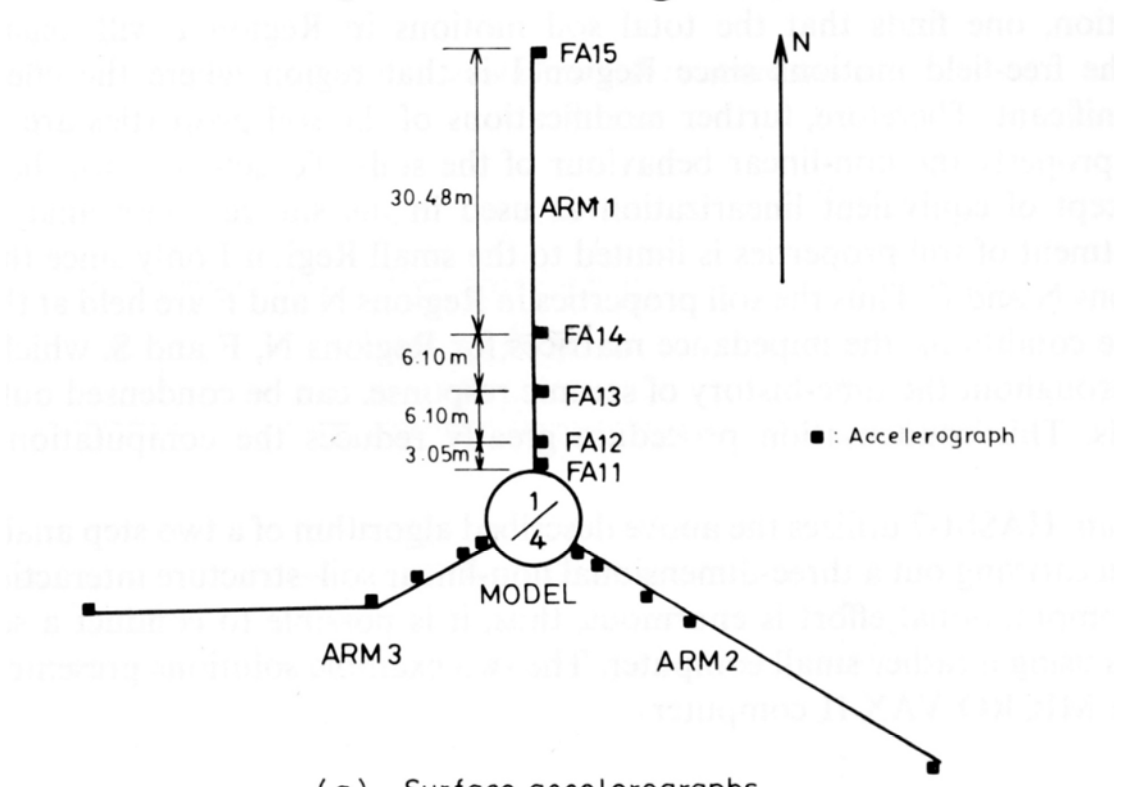


(b) NEAR-FIELD

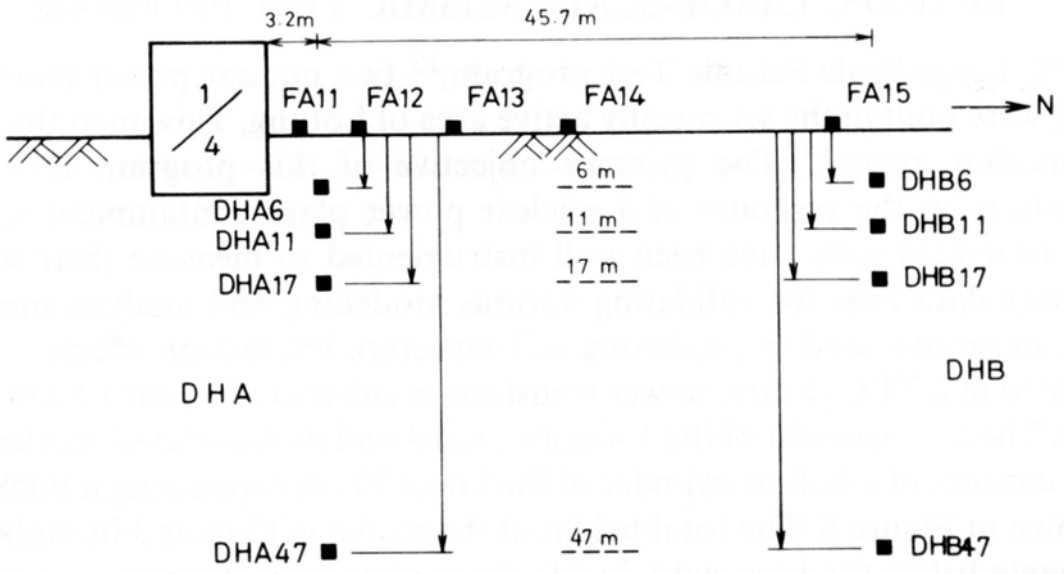


(c) FAR-FIELD

圖 12 LAYSSI 混合模式分析法



(a) Surface accelerographs



(b) Surface and downhole accelerographs along ARM 1

圖 13 羅東 LSST 計畫地震儀配置圖

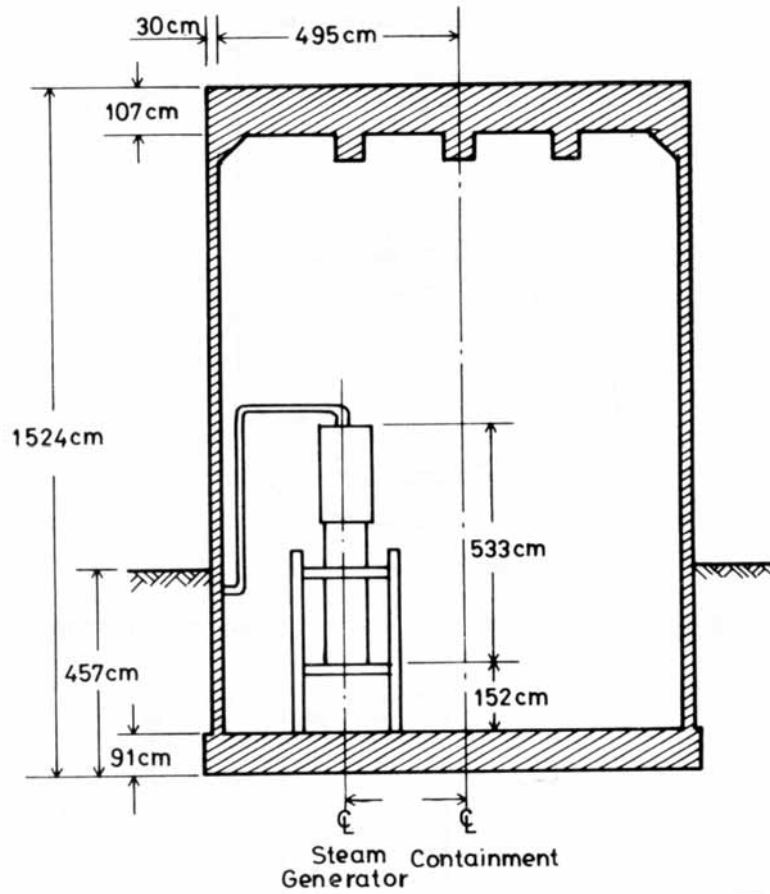


圖 14 羅東圍阻體結構配置圖

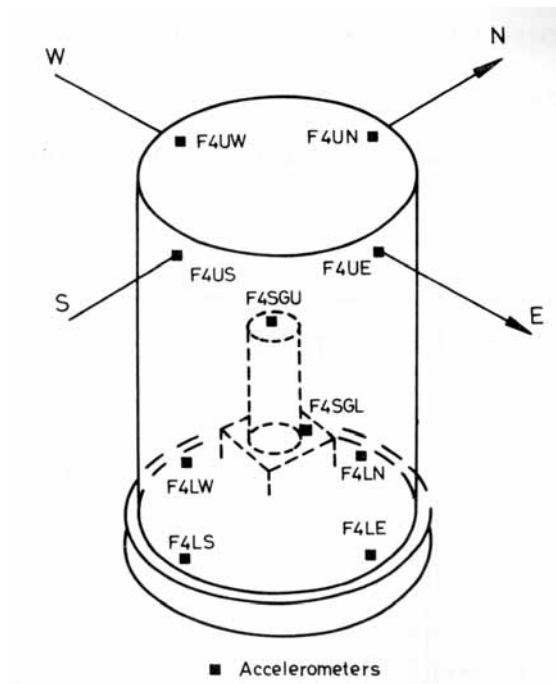


圖 15 羅東圍阻體地震儀配置圖

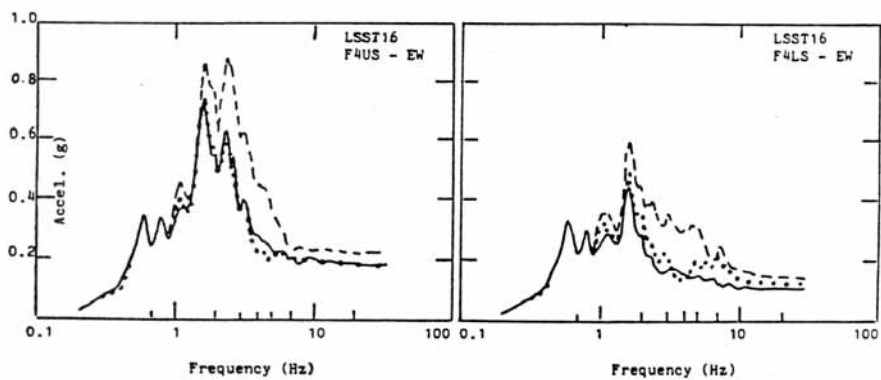
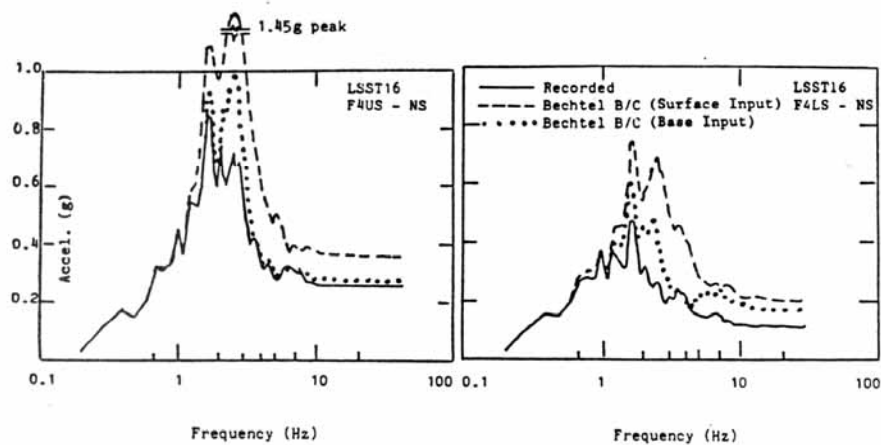


圖 16 羅東試驗土壤彈簧法之分析結果

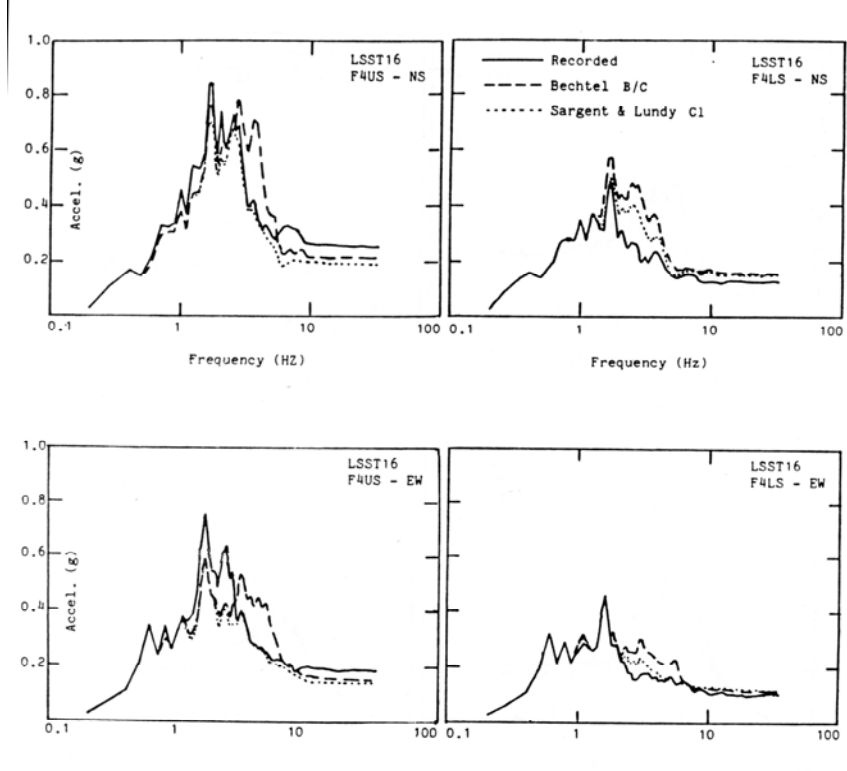


圖 17 羅東試驗 FLUSH 之分析結果

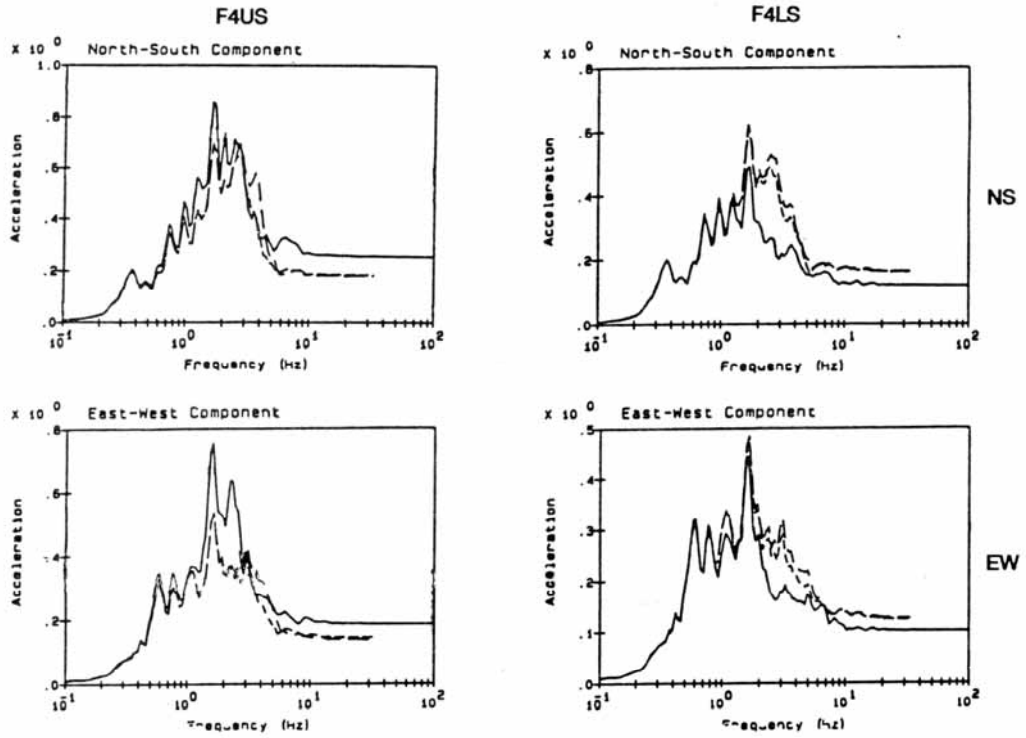


圖 18 羅東試驗 CLASSI 之分析結果

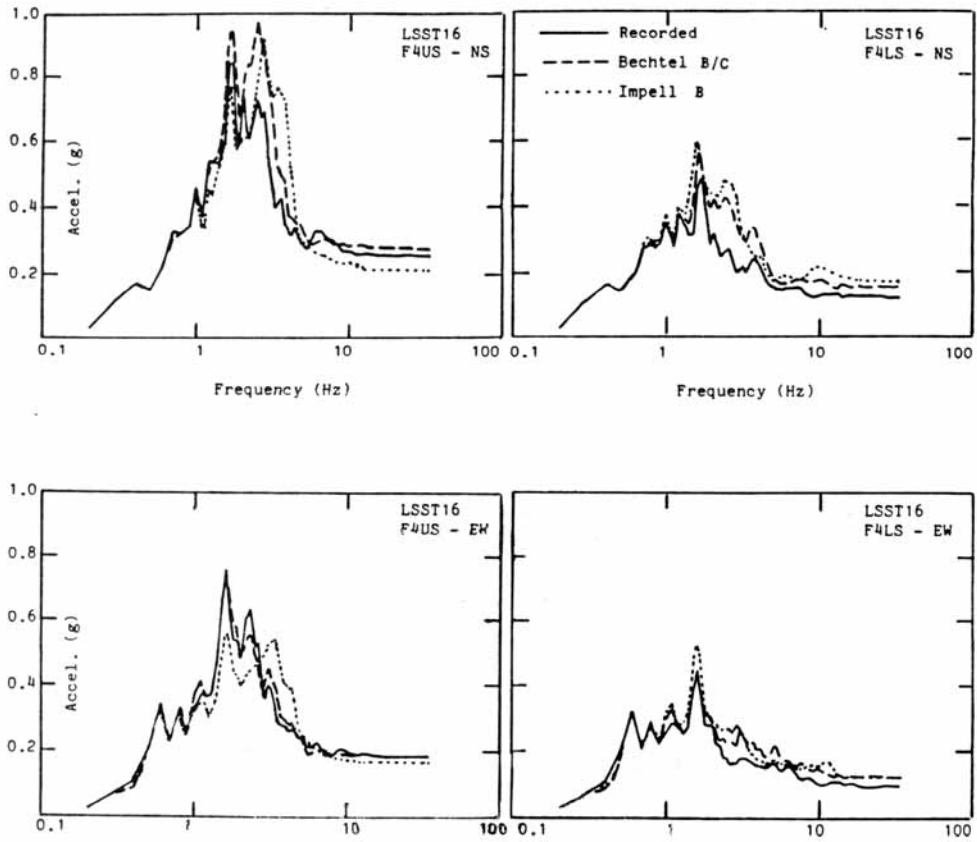


圖 19 羅東試驗 SASSI 之分析結果

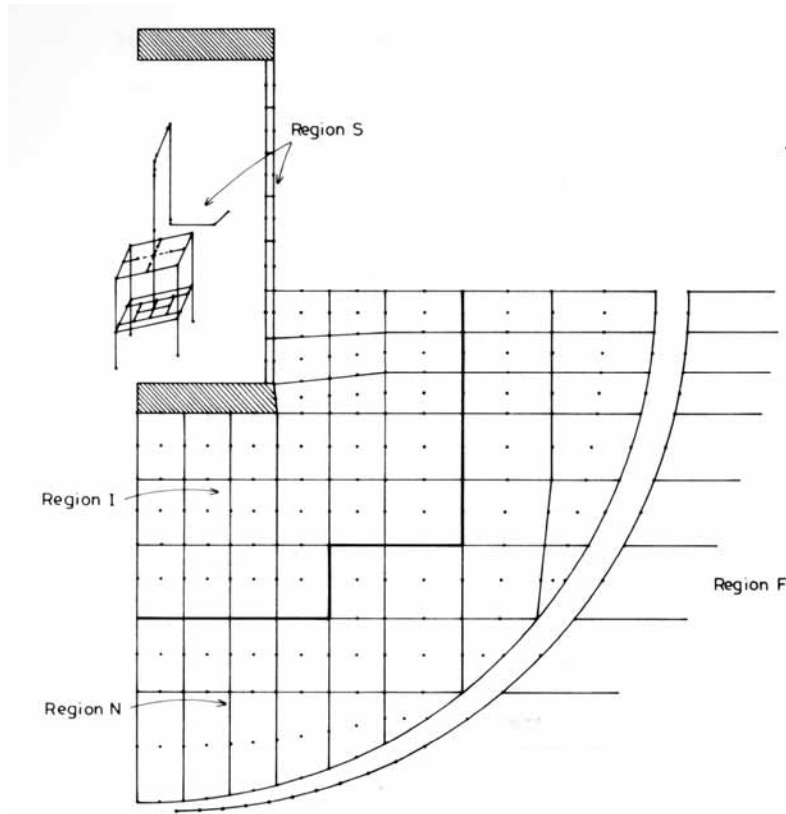


圖 20 羅東試驗 HASSI-7 之分析模型

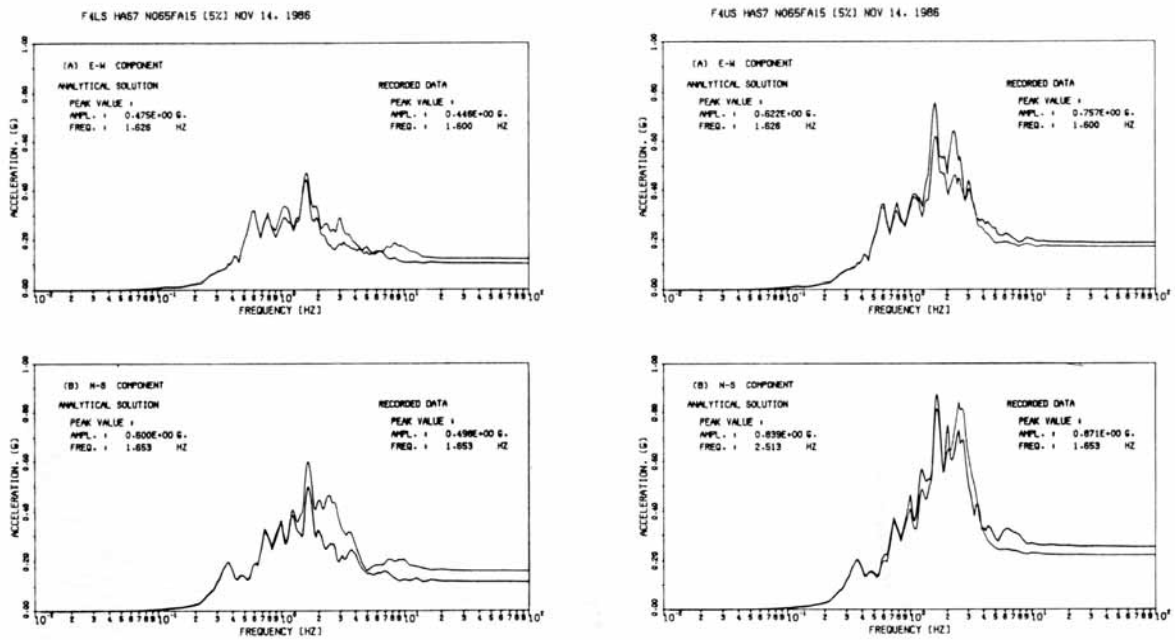


圖 21 羅東試驗 HASSI-7 之分析結果

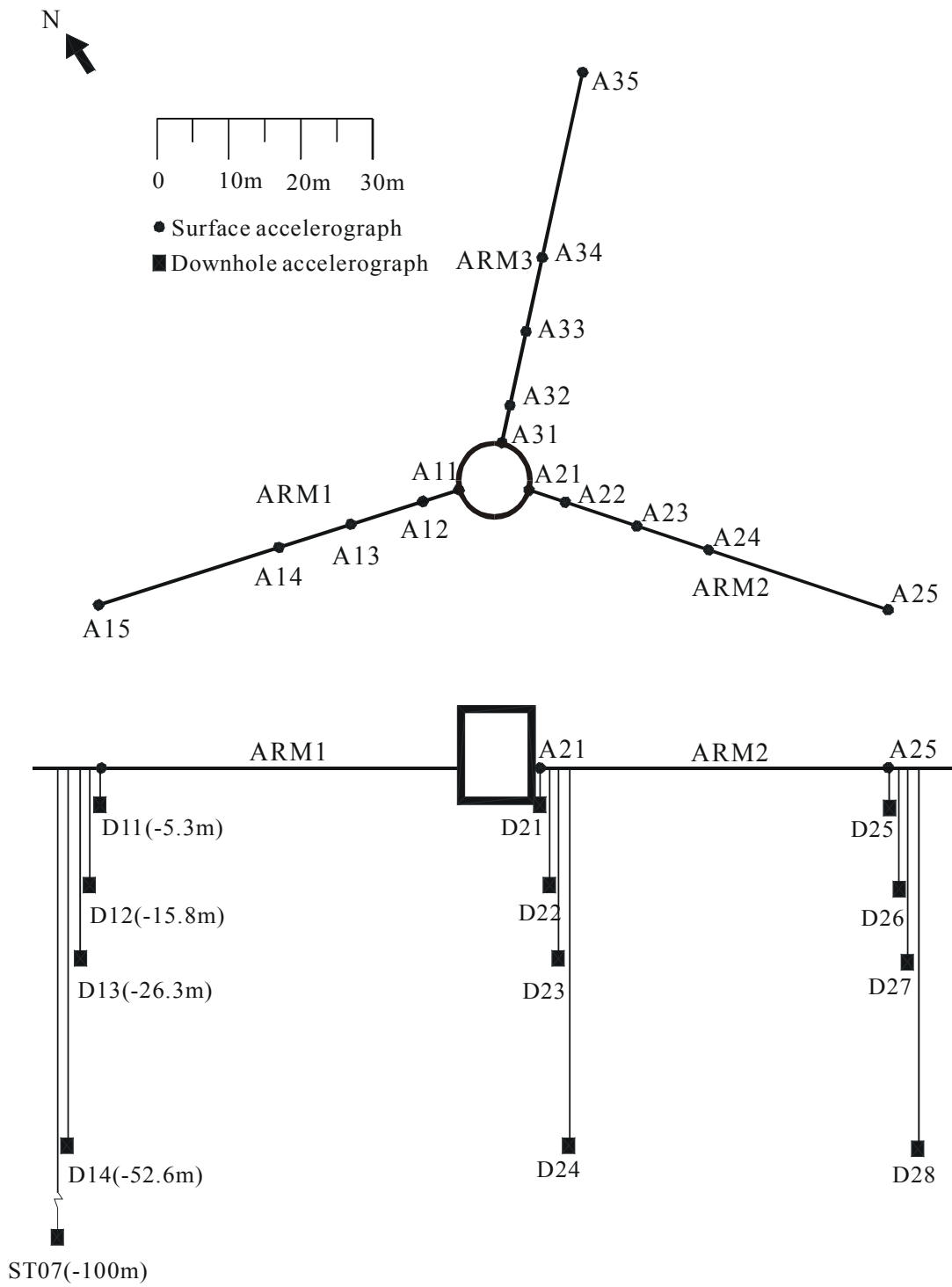


圖 22 花蓮 LSST 計畫地震儀配置圖

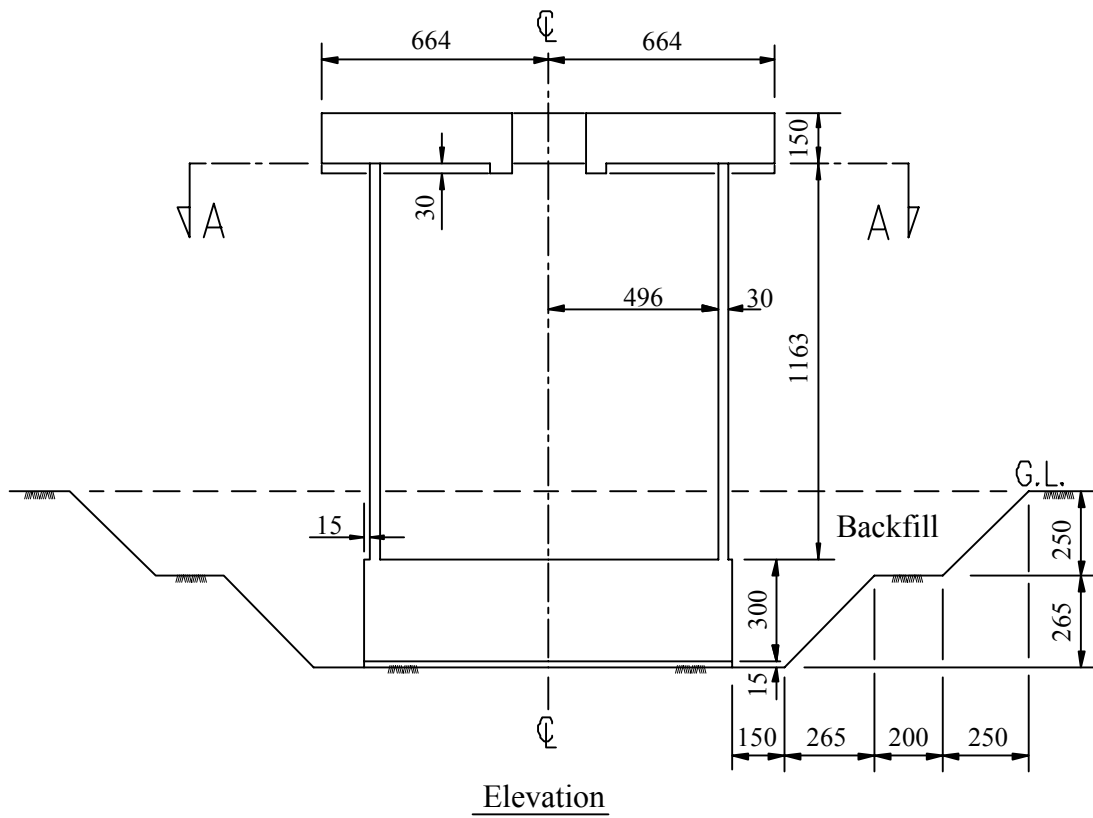
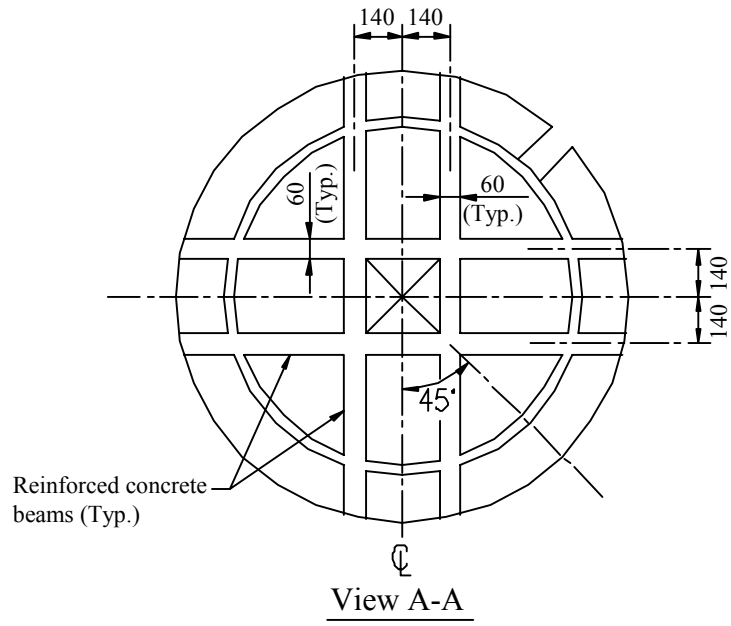


圖 23 花蓮圍阻體結構配置圖

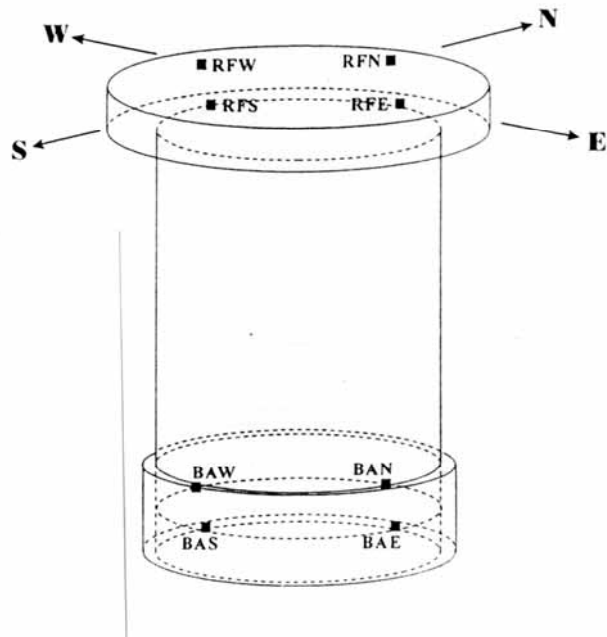


圖 24 花蓮圍阻體地震儀配置圖

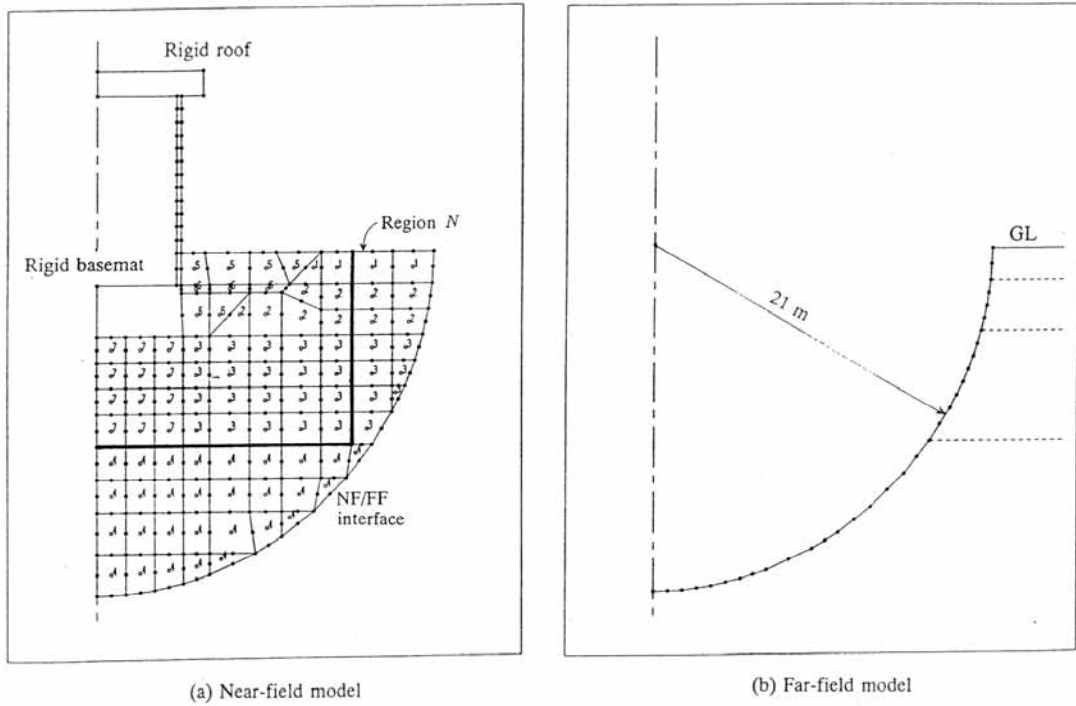


圖 25 花蓮試驗 HASSI-8 之分析模型

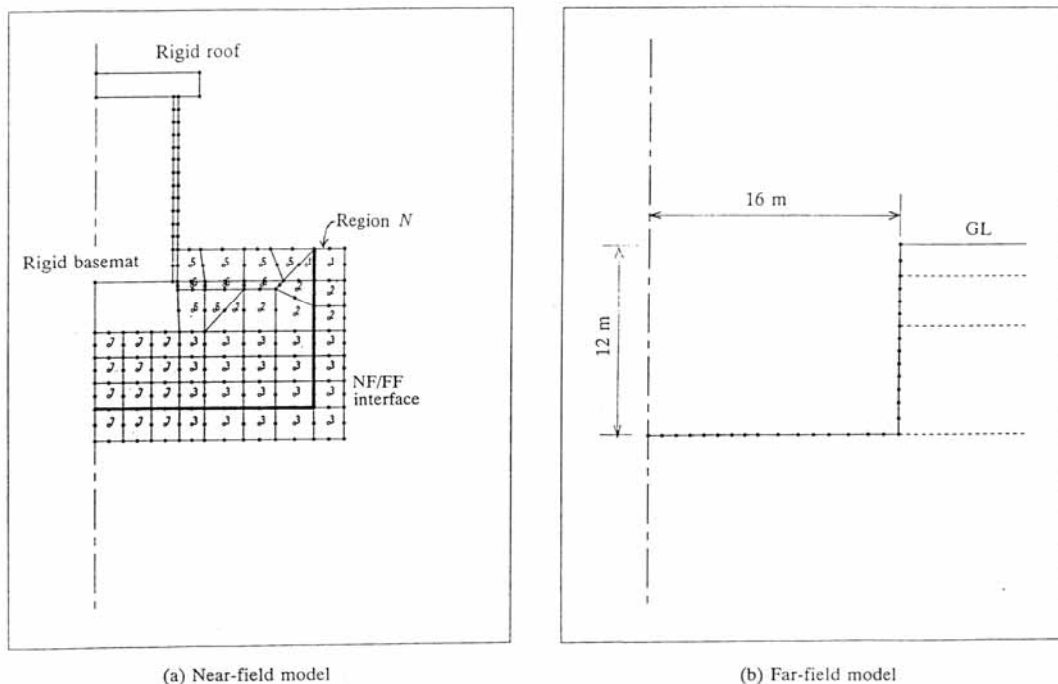


圖 26 花蓮試驗 LAYSSI 之分析模型

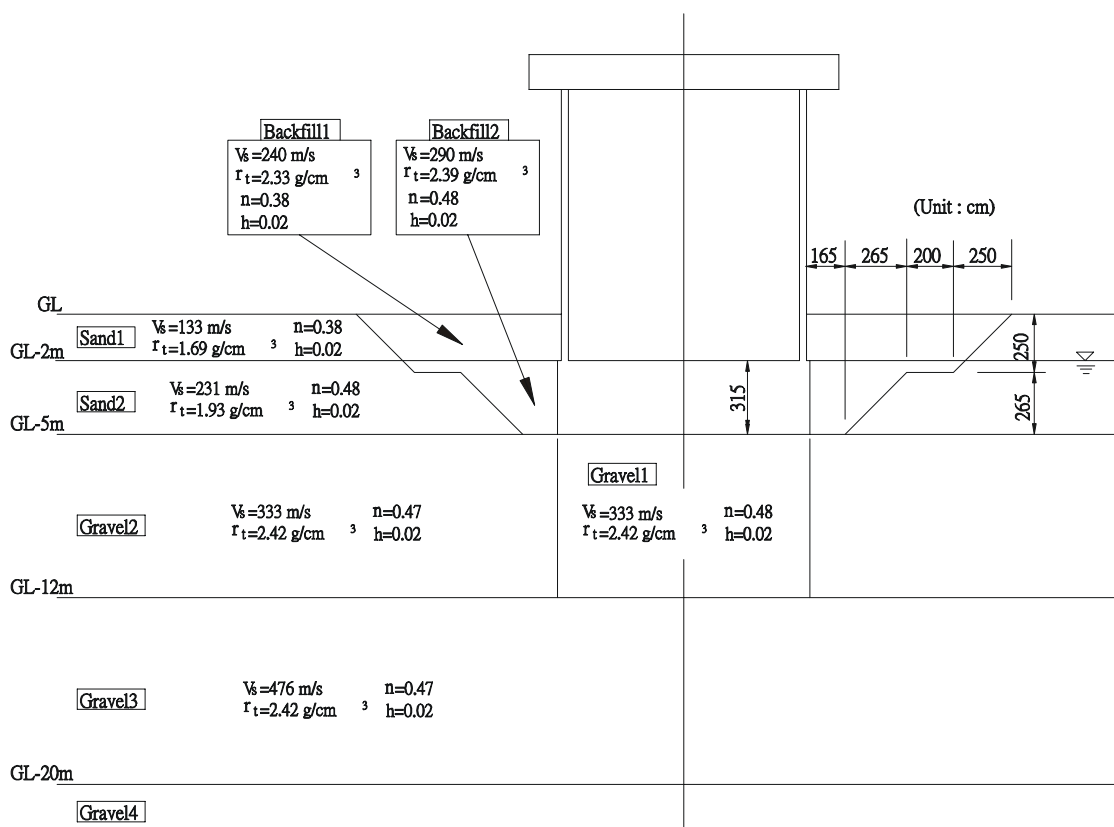


圖 27 花蓮試驗 HASSI 與 LAYSSI 分析之地盤模型

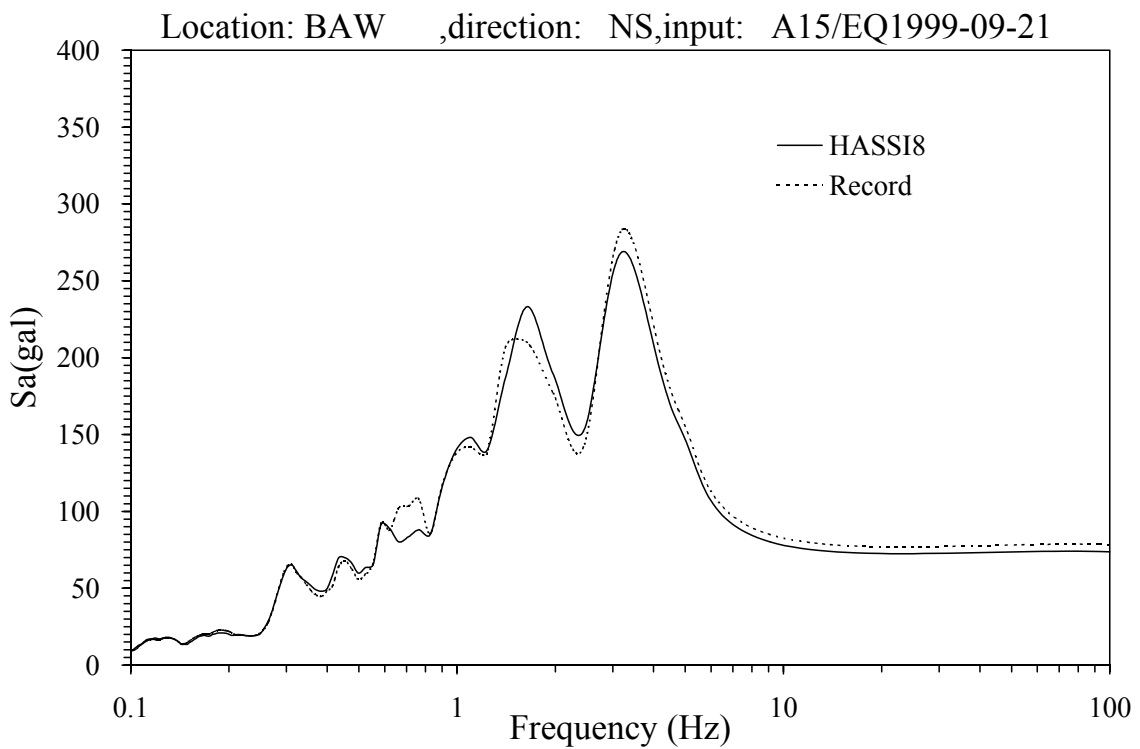
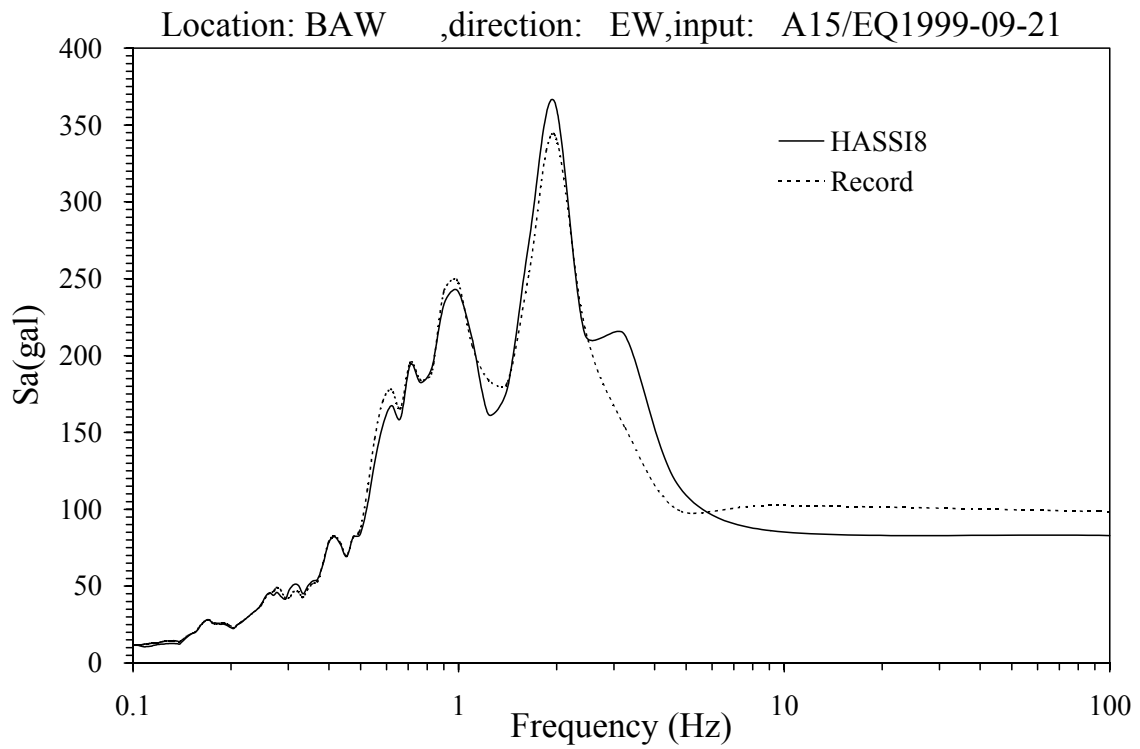


圖 28 HASSI-8 分析之底版 BAW 反應譜—1999/9/21 集集地震

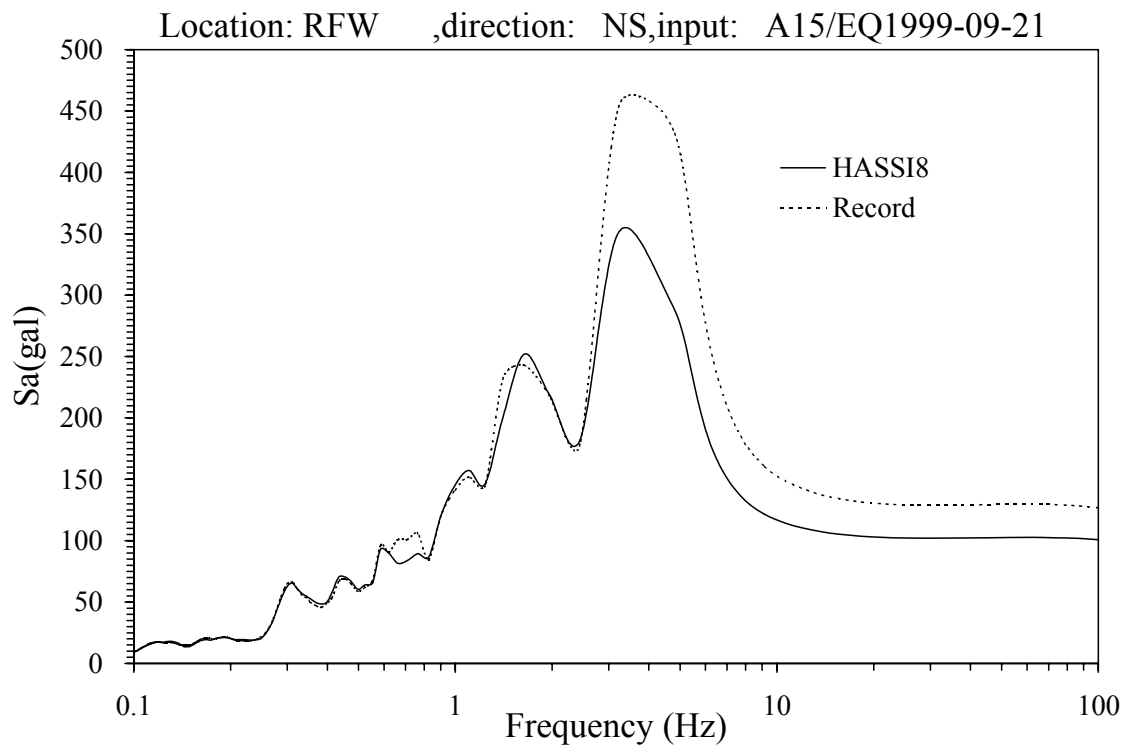
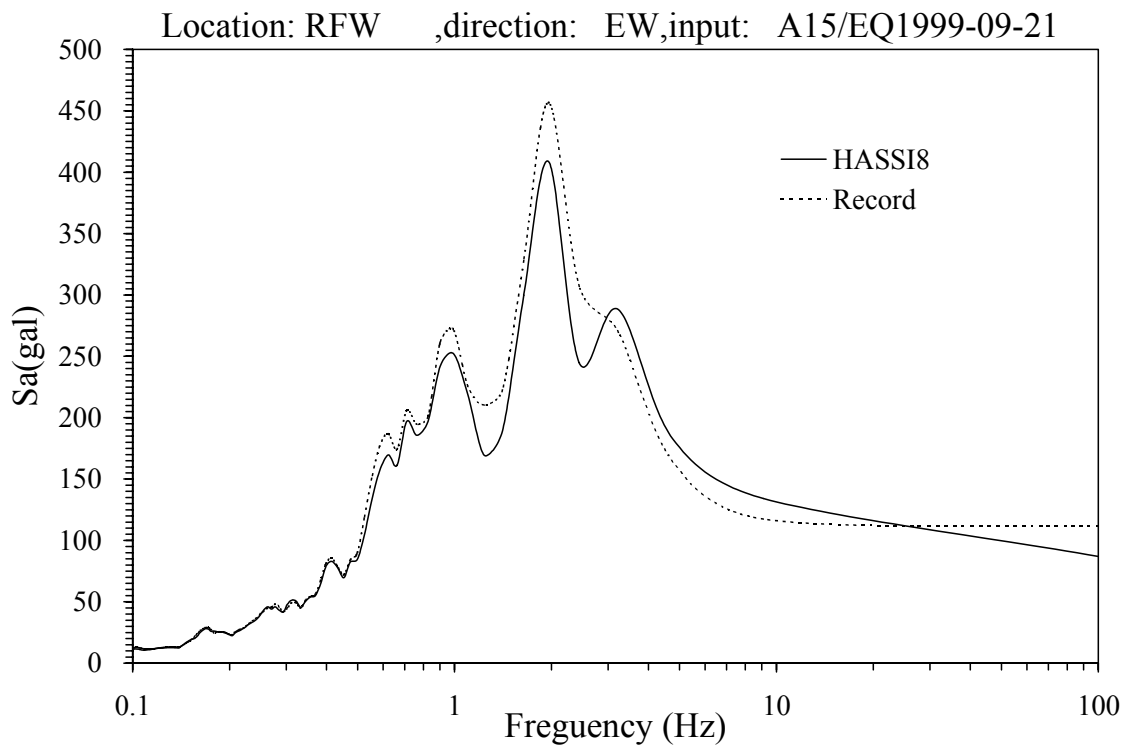


圖 29 HASSI-8 分析之頂版 RFW 反應譜—1999/9/21 集集地震

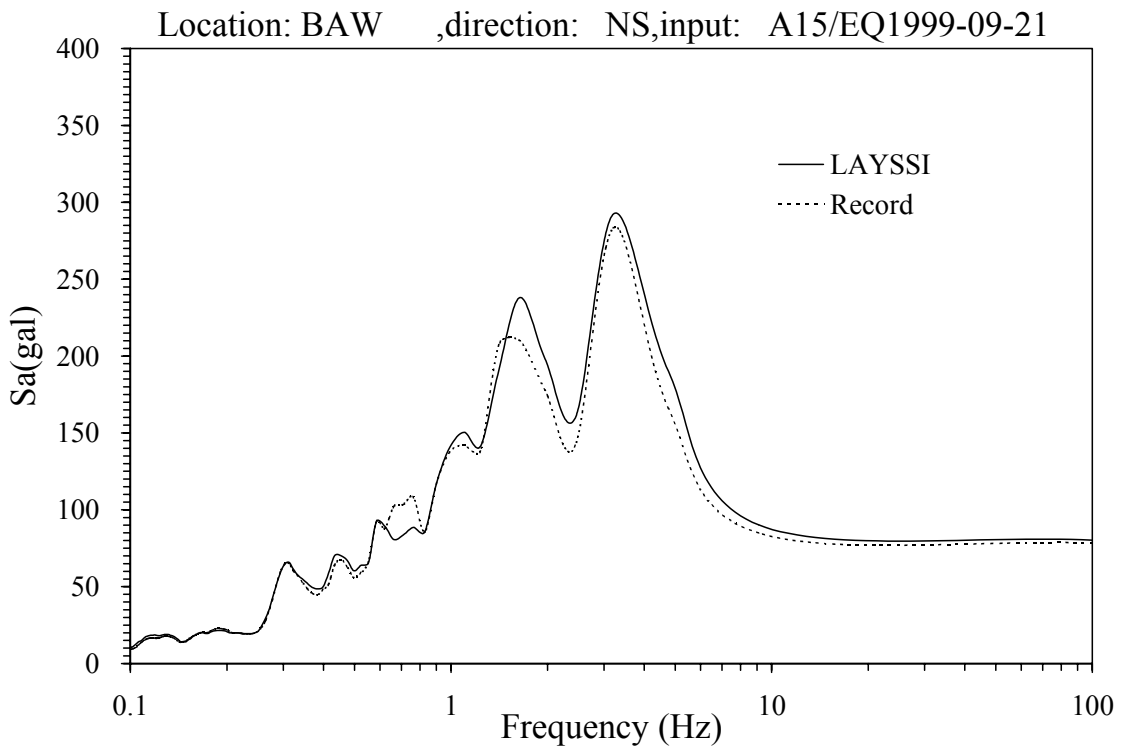
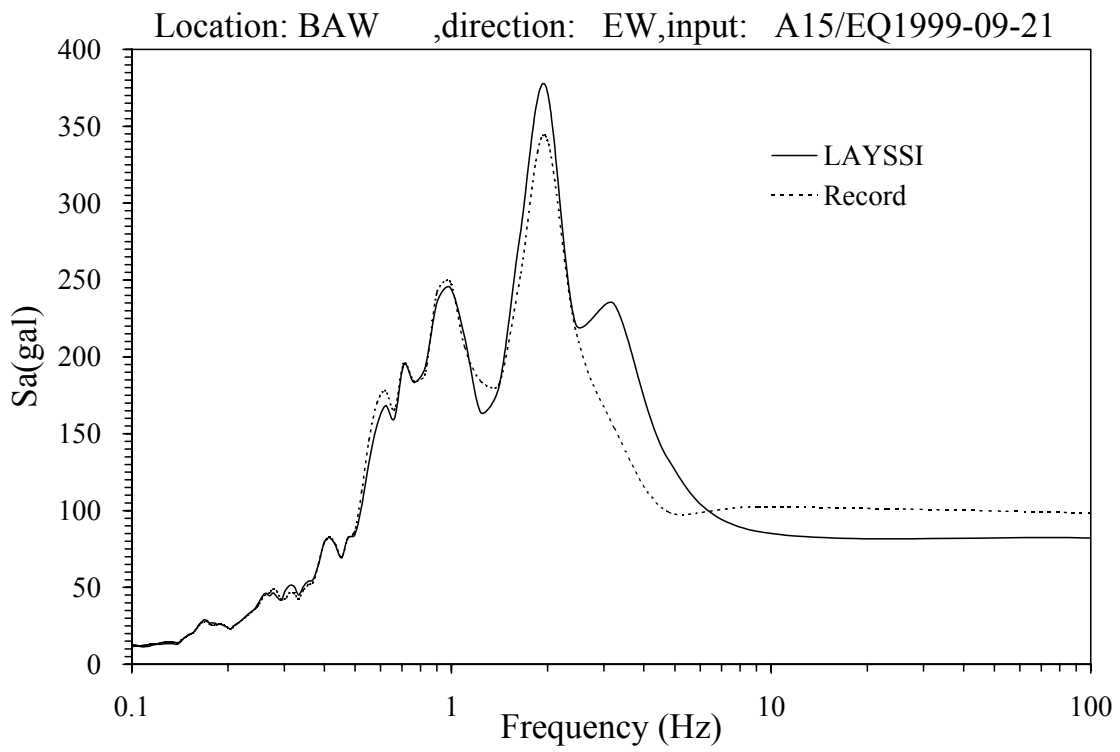


圖 30 LAYSSI 分析之底版 BAW 反應譜—1999/9/21 集集地震

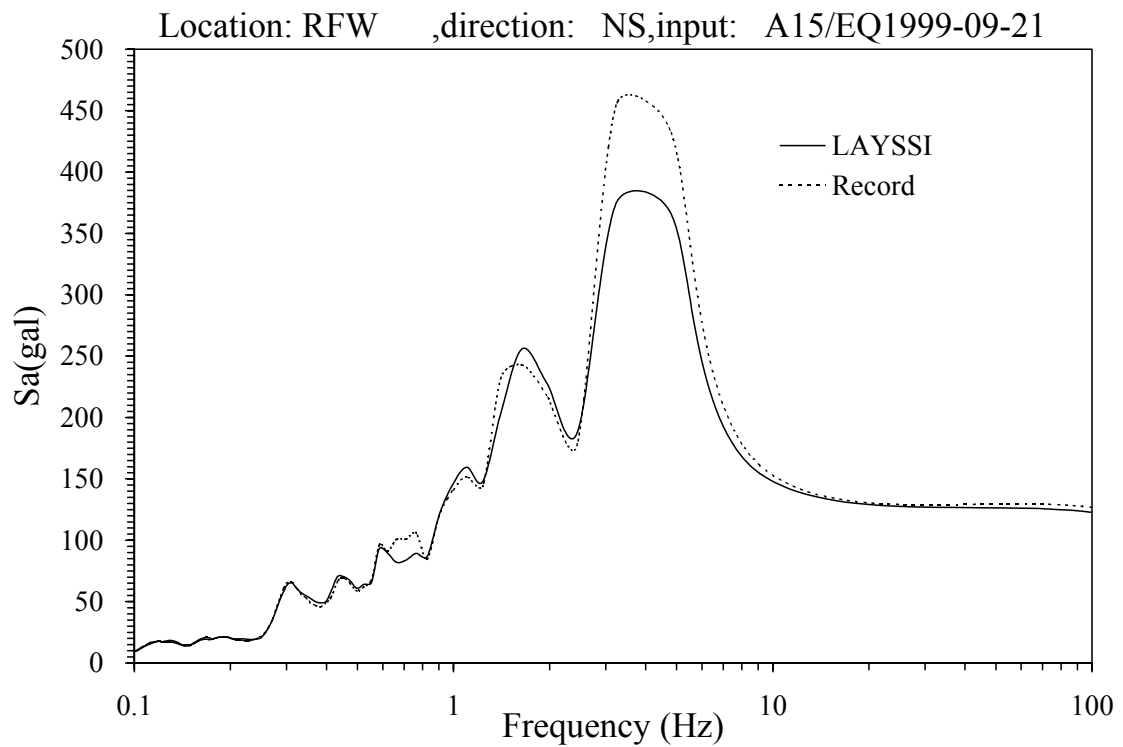
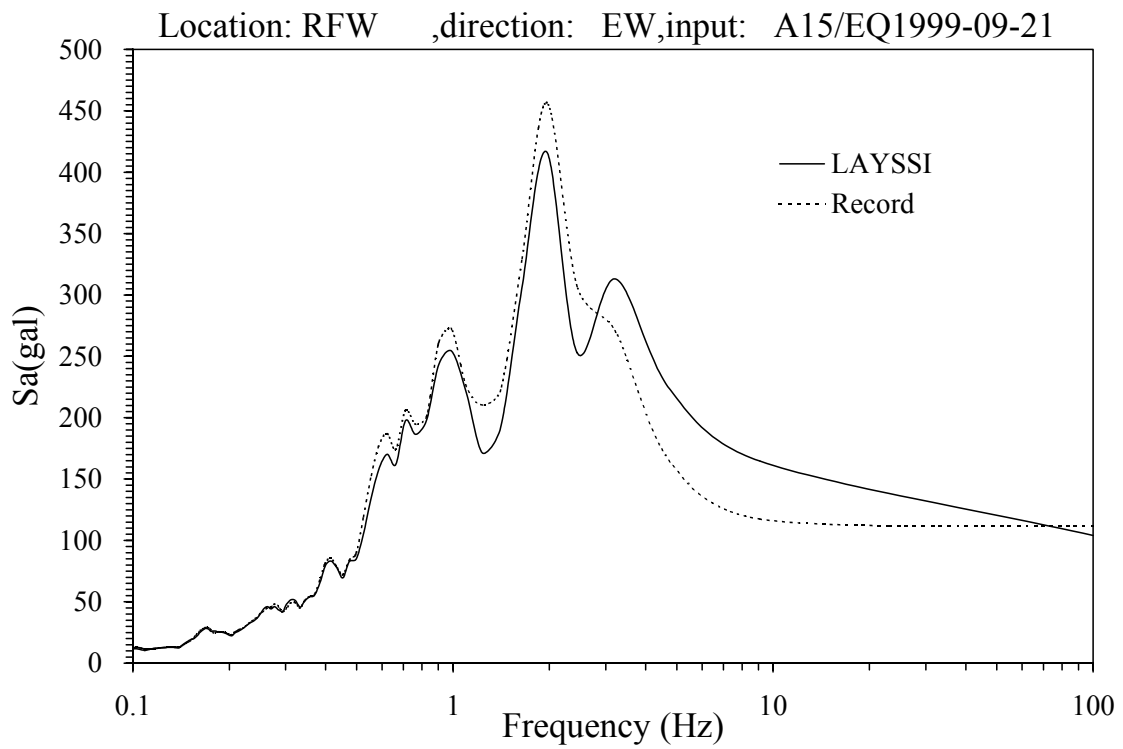


圖 31 LAYSSI 分析之頂版 RFW 反應譜—1999/9/21 集集地震

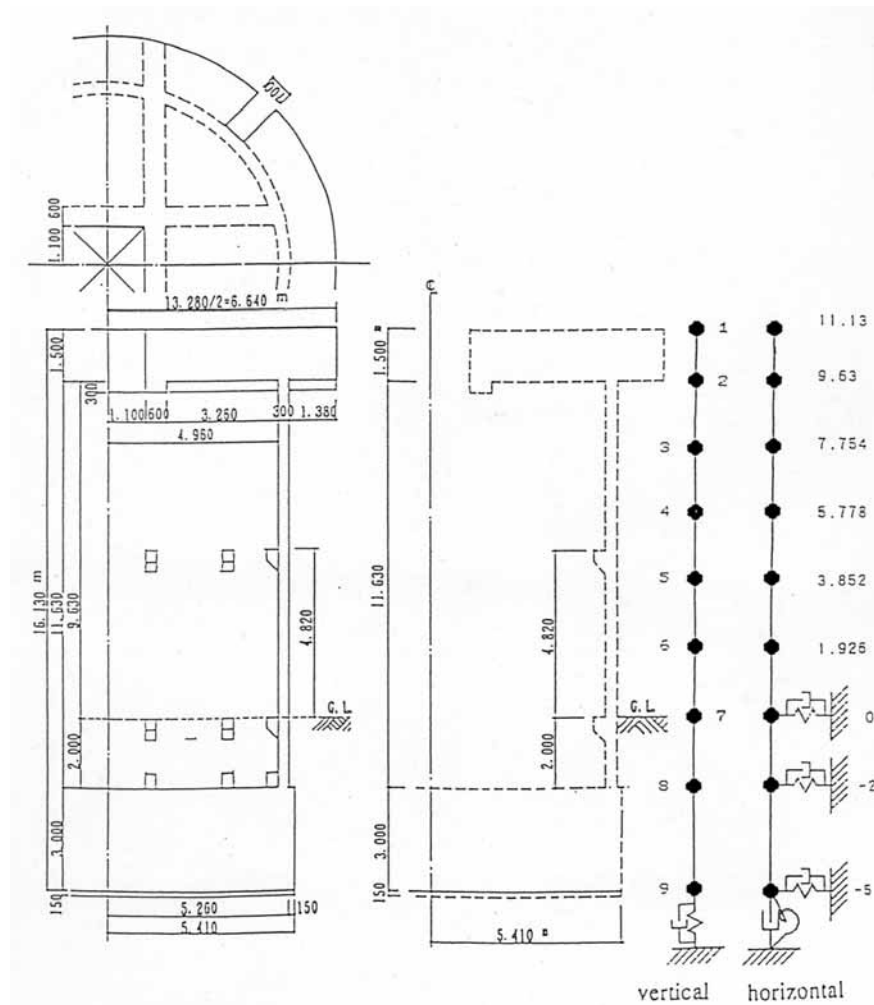


圖 32 花蓮試驗土壤彈簧法之分析模型—TEPCO

	Horizontal (Vs)			Vertical (Vs) UNIFIED
	UNIFIED	MODIFIED D1 D2		
GL	$\nu = 0.38$ $\rho = 2.33 \text{gf/cm}^3$ $h = 2\%$			
	400m/s	410m/s	389m/s	—
GL-2m	$\nu = 0.48$ $\rho = 2.39 \text{gf/cm}^3$ $h = 2\%$			
	400m/s	410m/s	389m/s	—
GL-5m	$\nu = 0.48$ $\rho = 2.42 \text{gf/cm}^3$ $h = 2\%$			
	383m/s	383m/s	450m/s (5m) 383m/s (2m)	383m/s
GL-12m	$\nu = 0.47$ $\rho = 2.42 \text{gf/cm}^3$ $h = 2\%$			
	476m/s	476m/s	476m/s	476m/s

圖 33 花蓮試驗土壤彈簧法之地盤模型—TEPCO

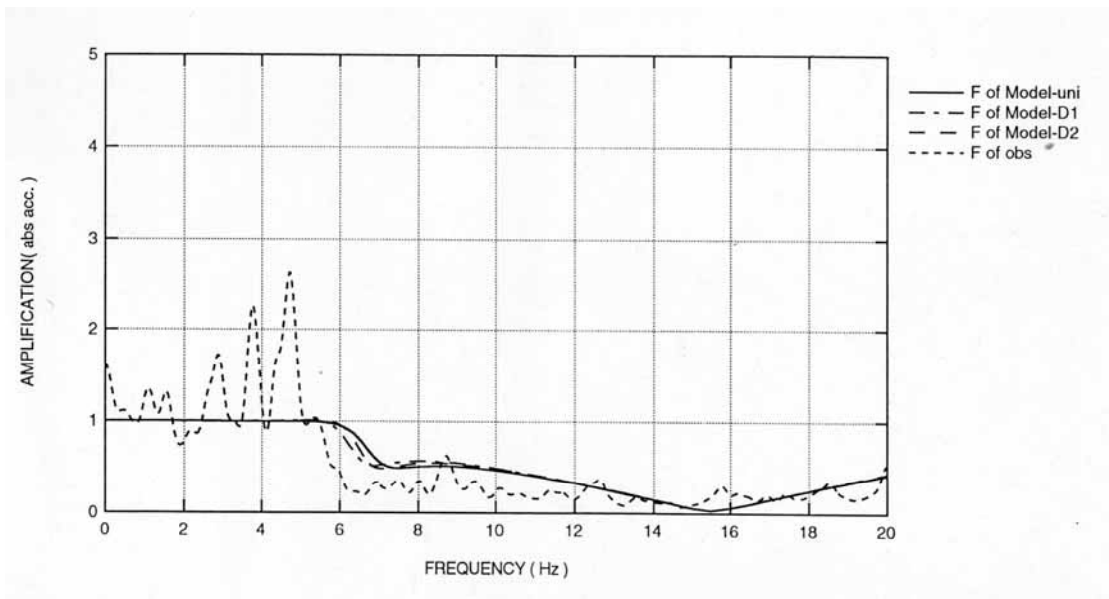
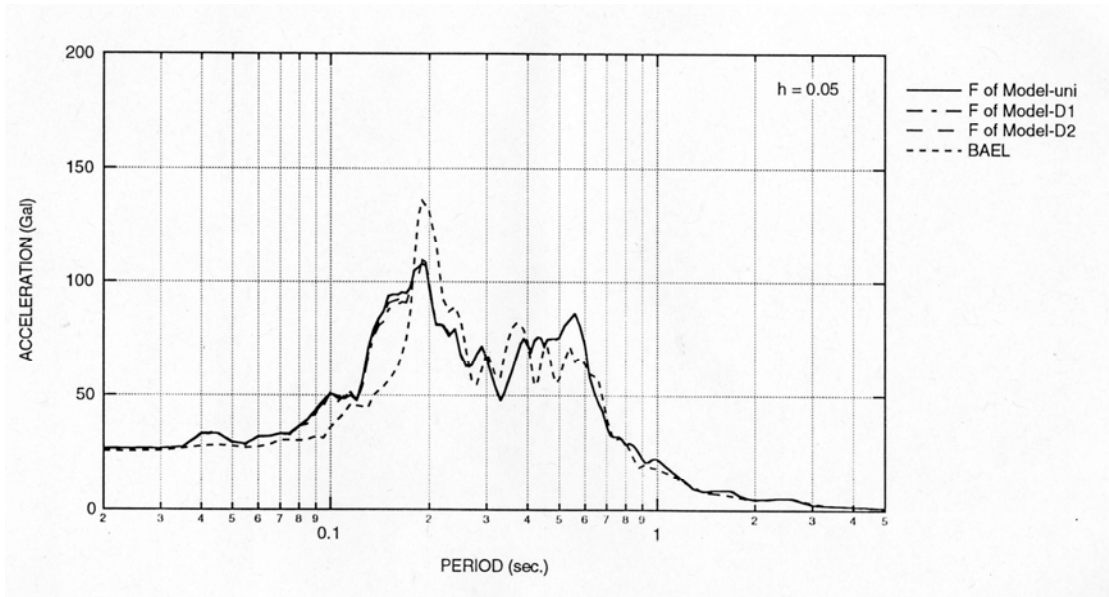


圖 34 底版頂位置之 5% 阻尼比反應譜與轉換函數—TEPCO 土壤彈簧法

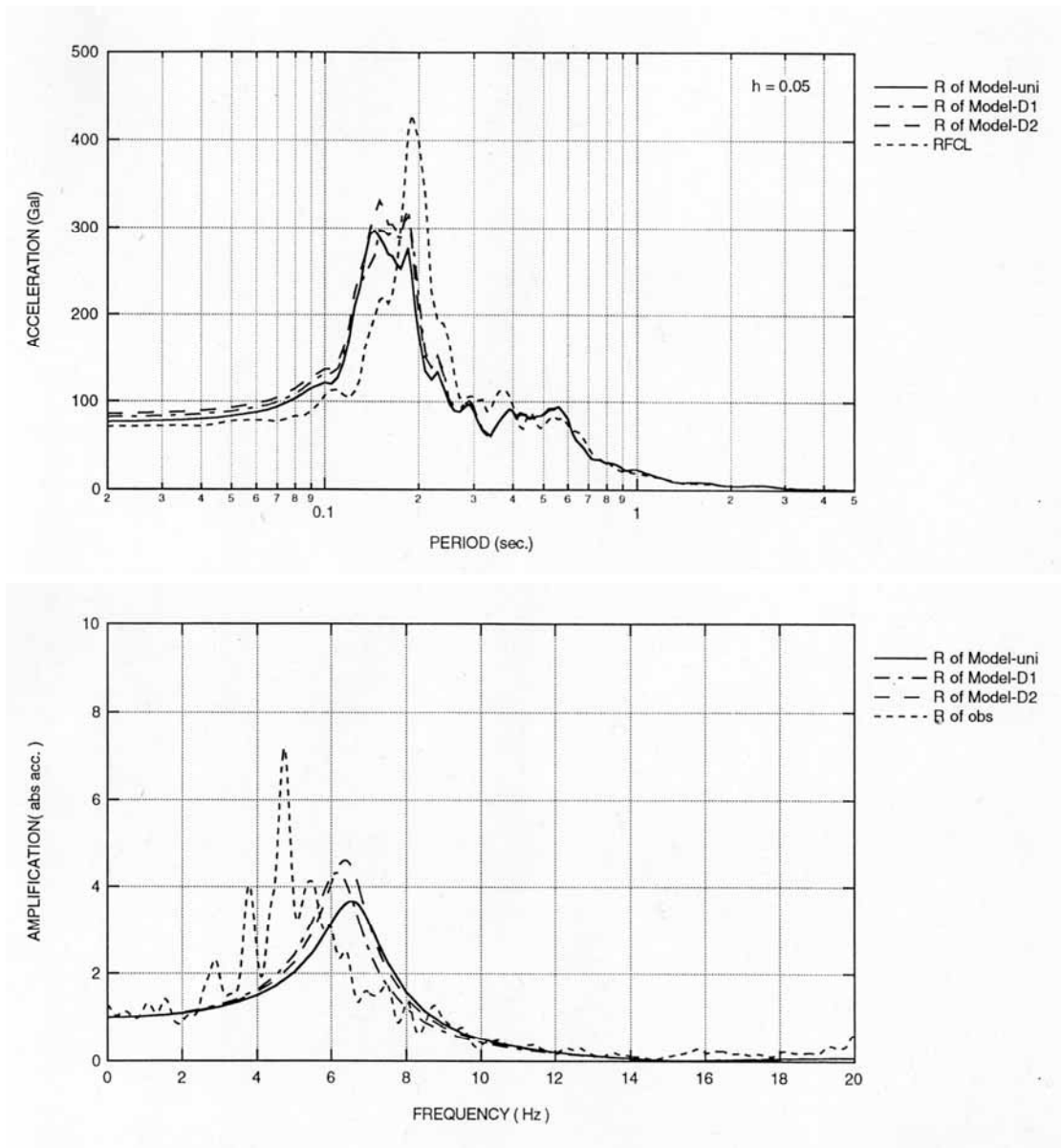


圖 35 頂版頂位置之 5% 阻尼比反應譜與轉換函數—TEPCO 土壤彈簧法

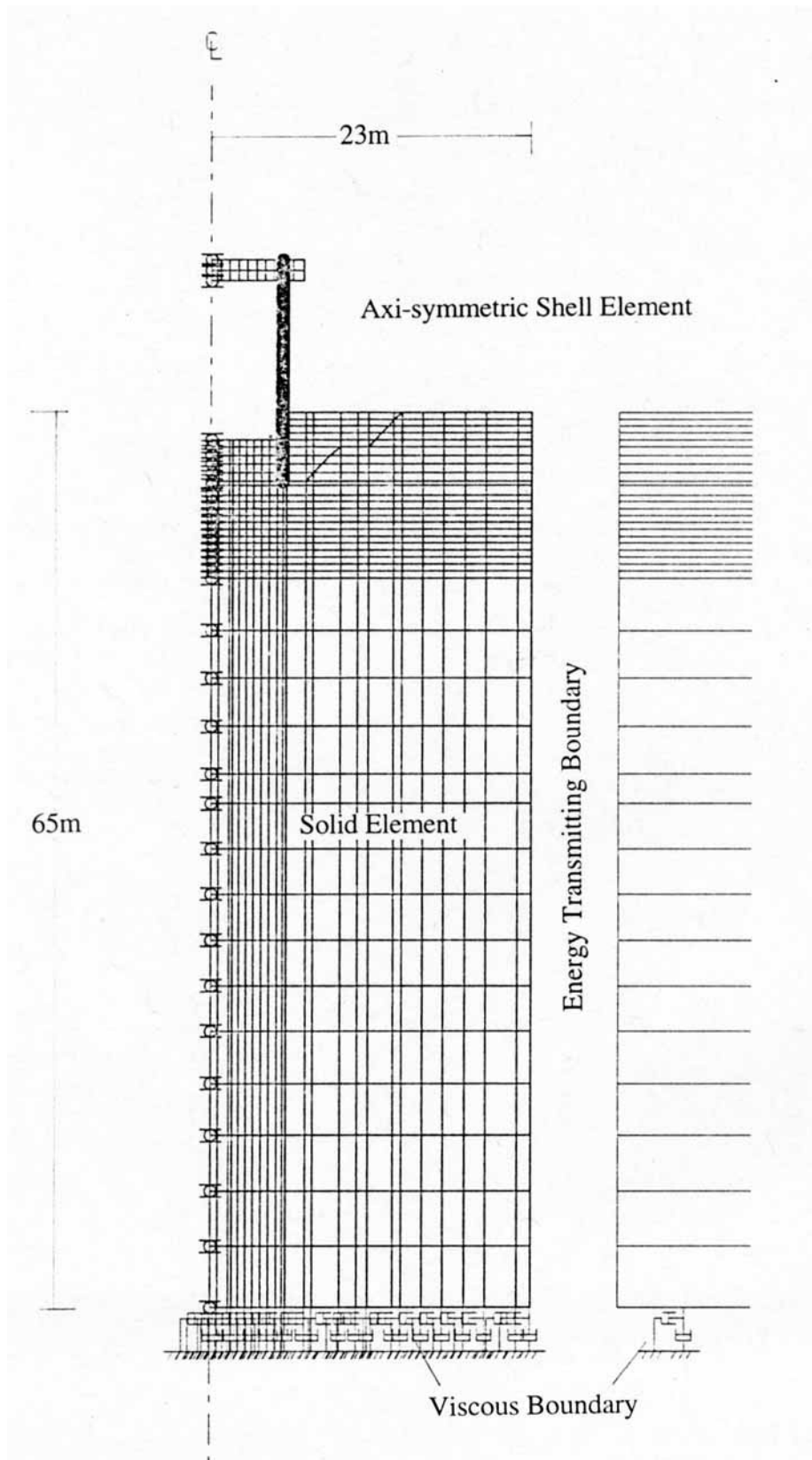


圖 36 花蓮試驗 FLUSH 之分析模型－TEPCO

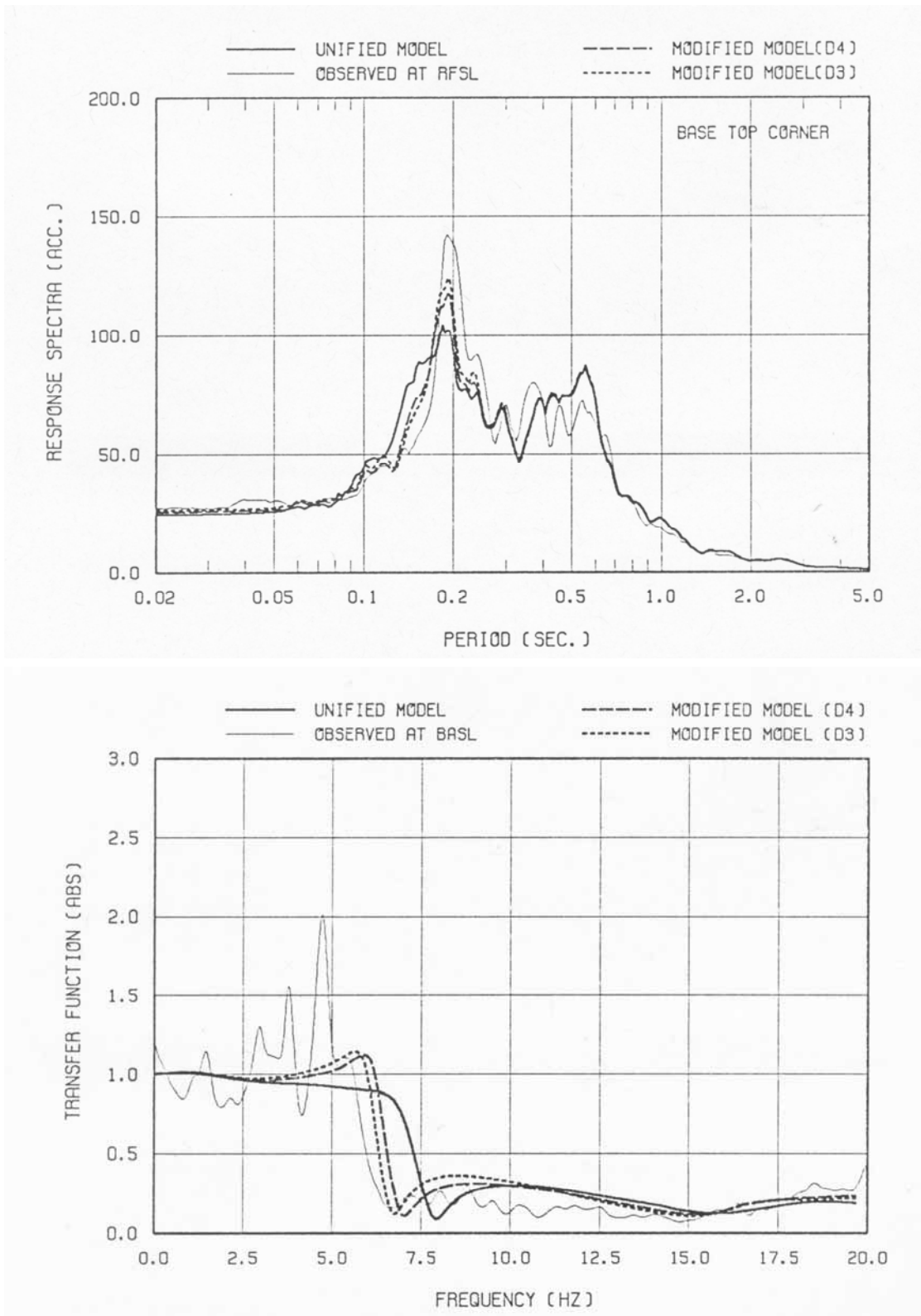


圖 37 底版頂位置之 5% 阻尼比反應譜與轉換函數—TEPCO 之 FLUSH 分析

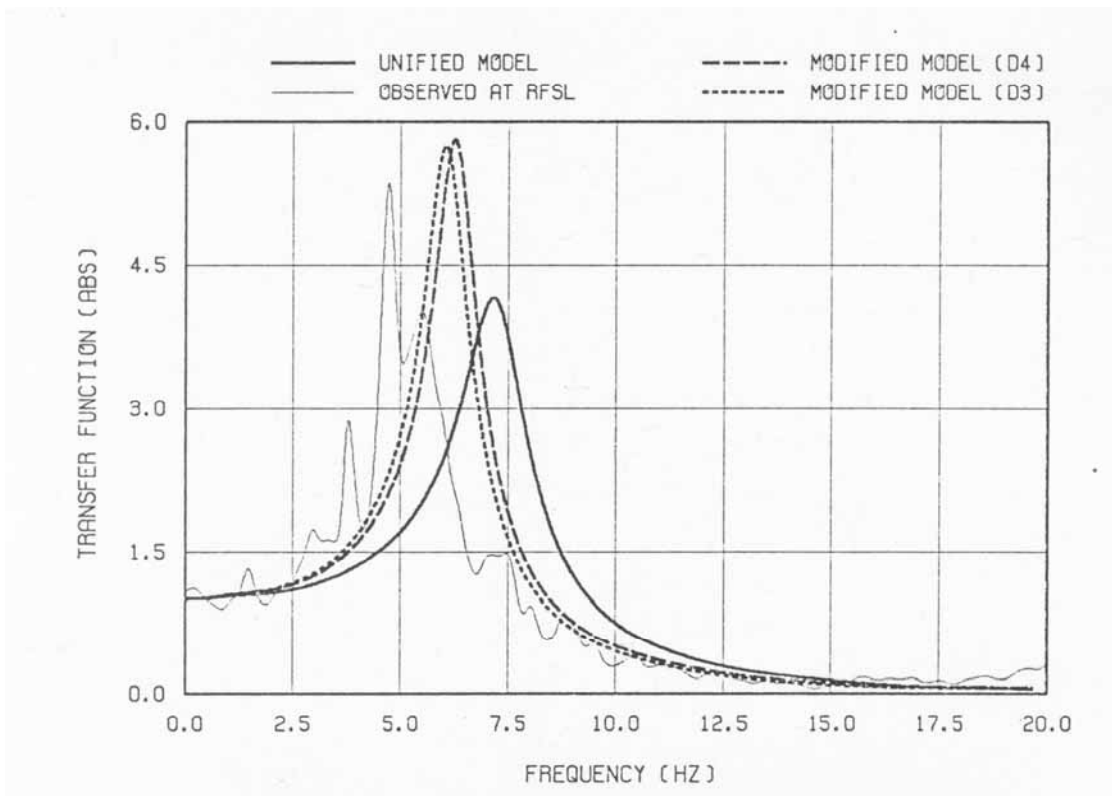
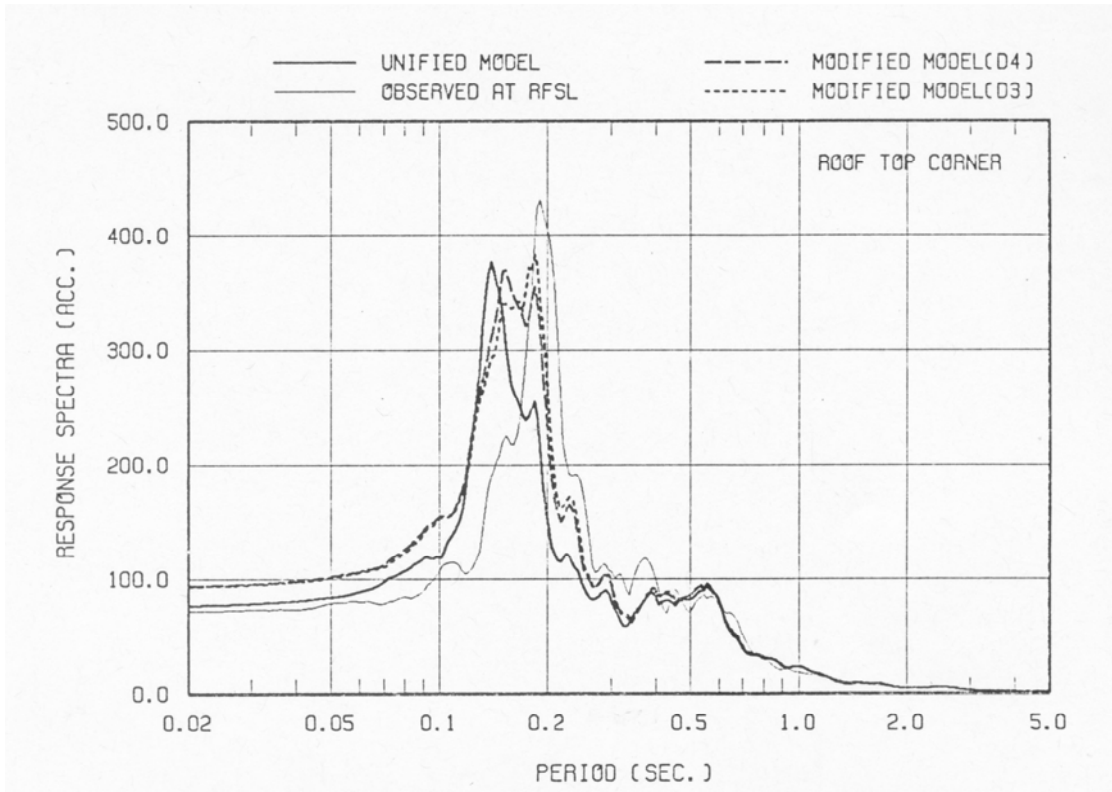


圖 38 頂版頂位置之 5% 阻尼比反應譜與轉換函數—TEPCO 之 FLUSH 分析

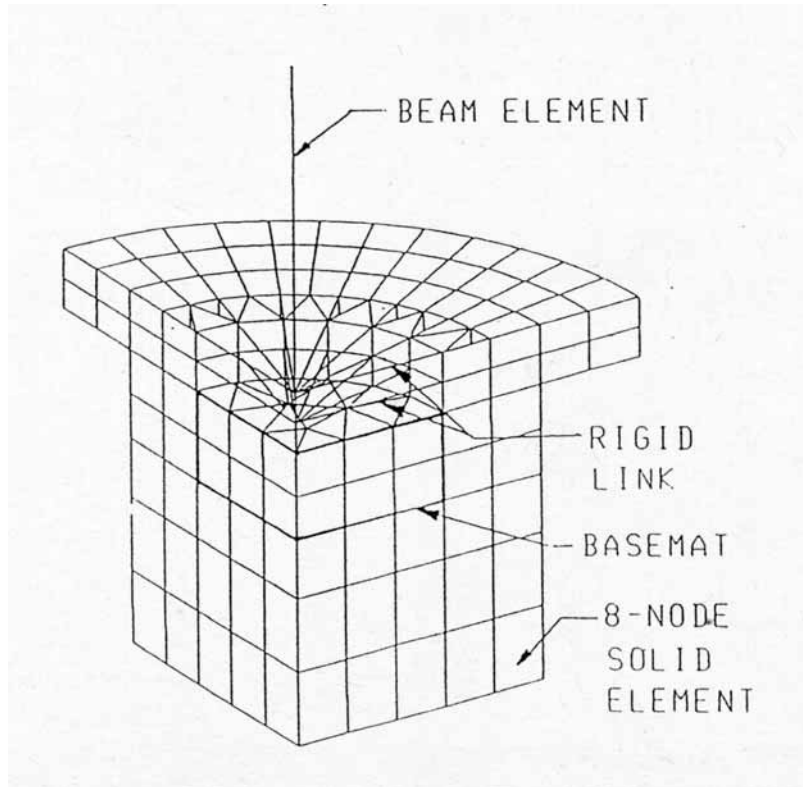


圖 39 花蓮試驗 SASSI 分析模型—KINS

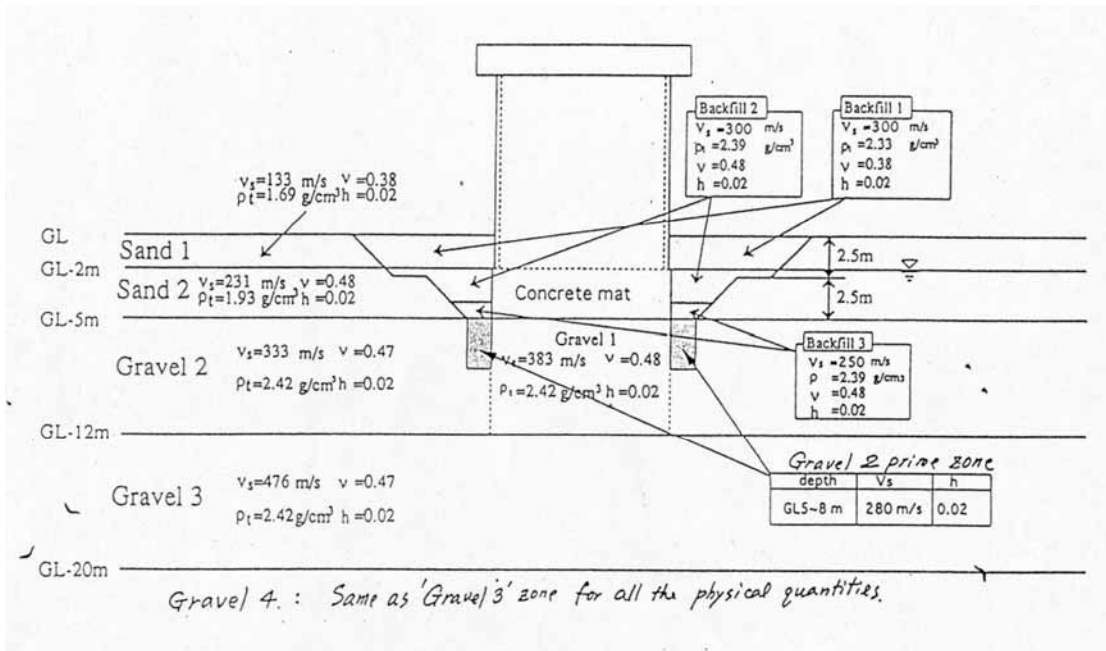


圖 40 花蓮試驗 SASSI 分析之地盤模型—KINS

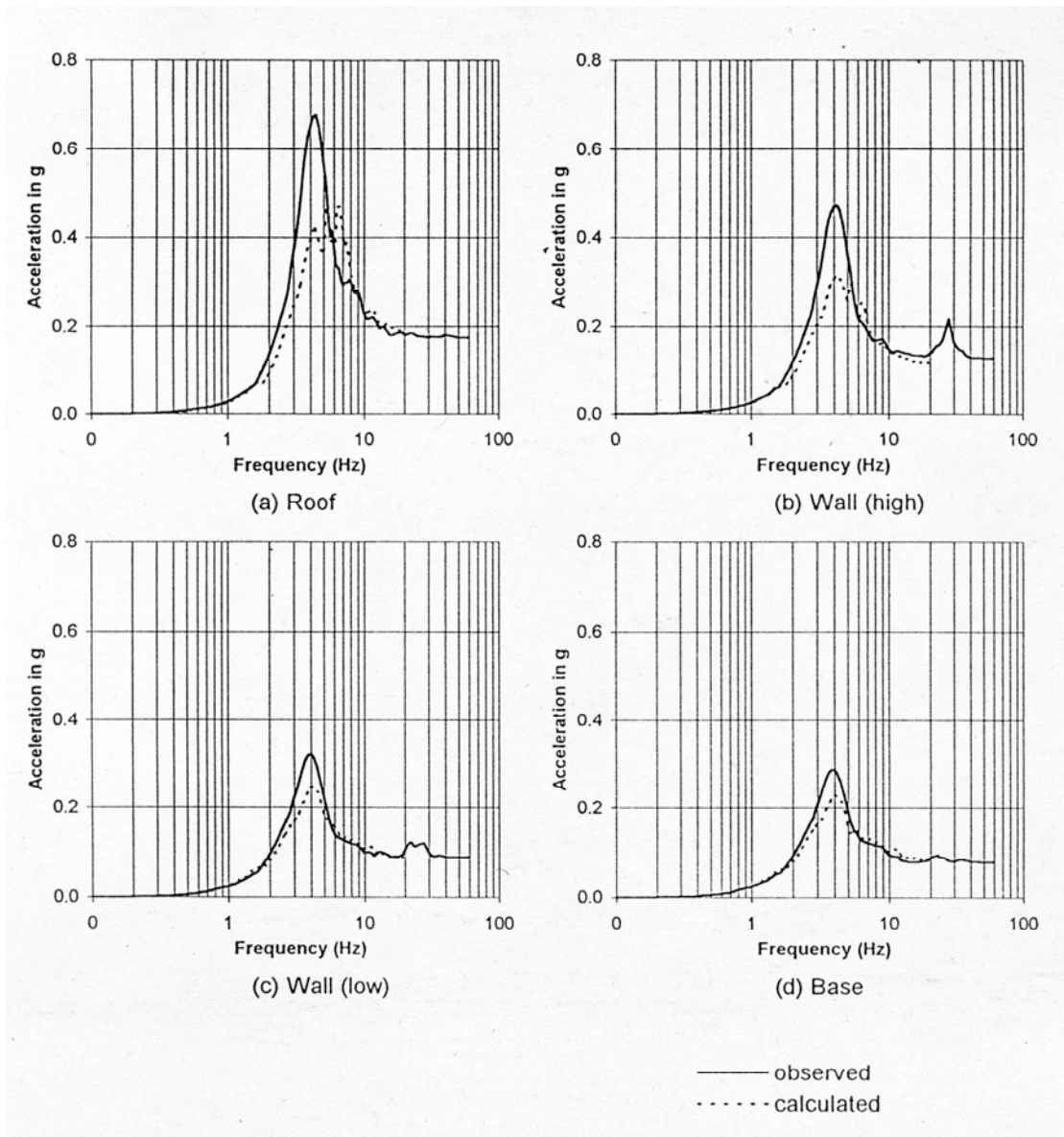


圖 41 5%阻尼比反應譜—KINS 之 SASSI 分析

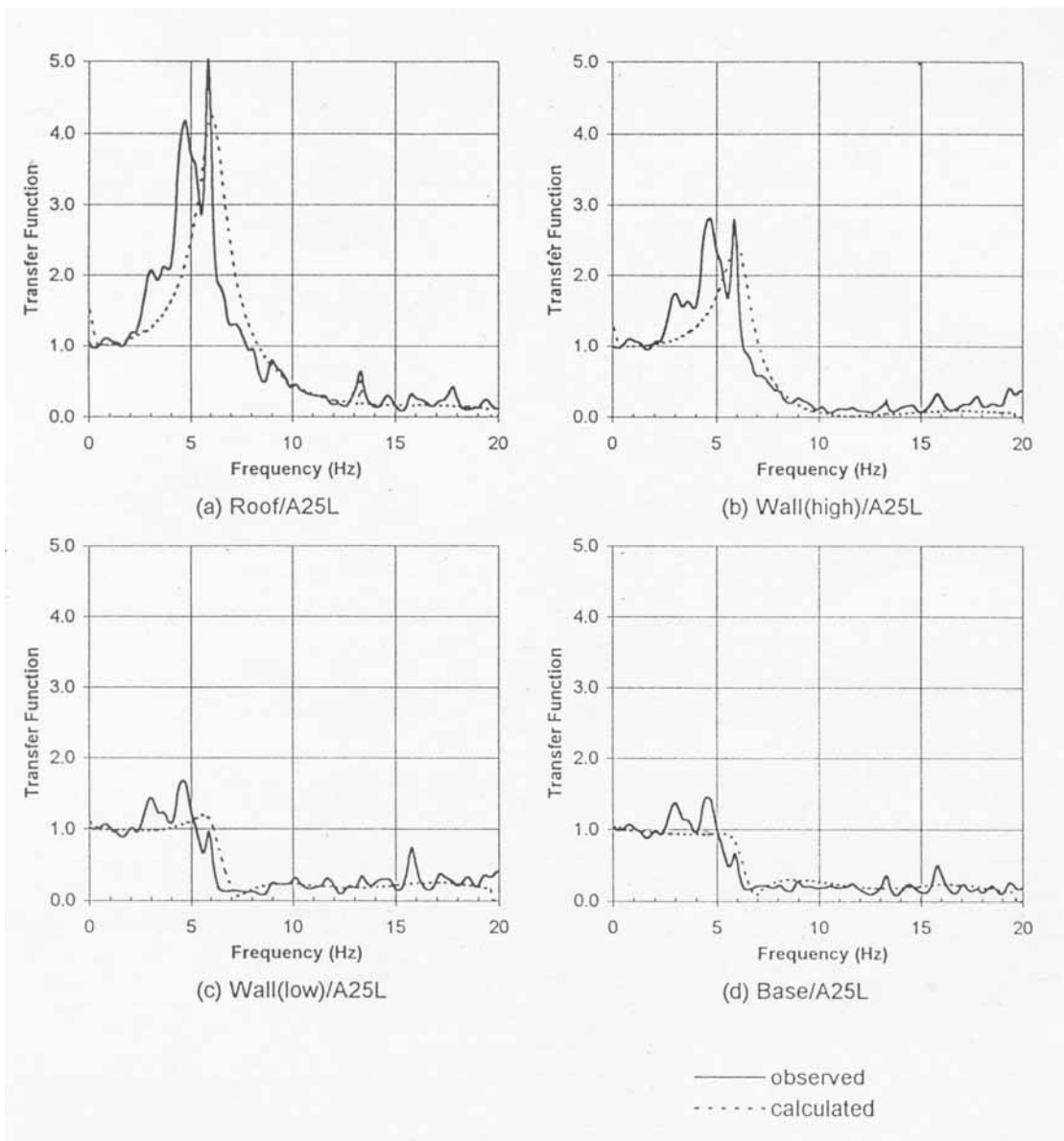


圖 42 轉換函數—KINS 之 SASSI 分析

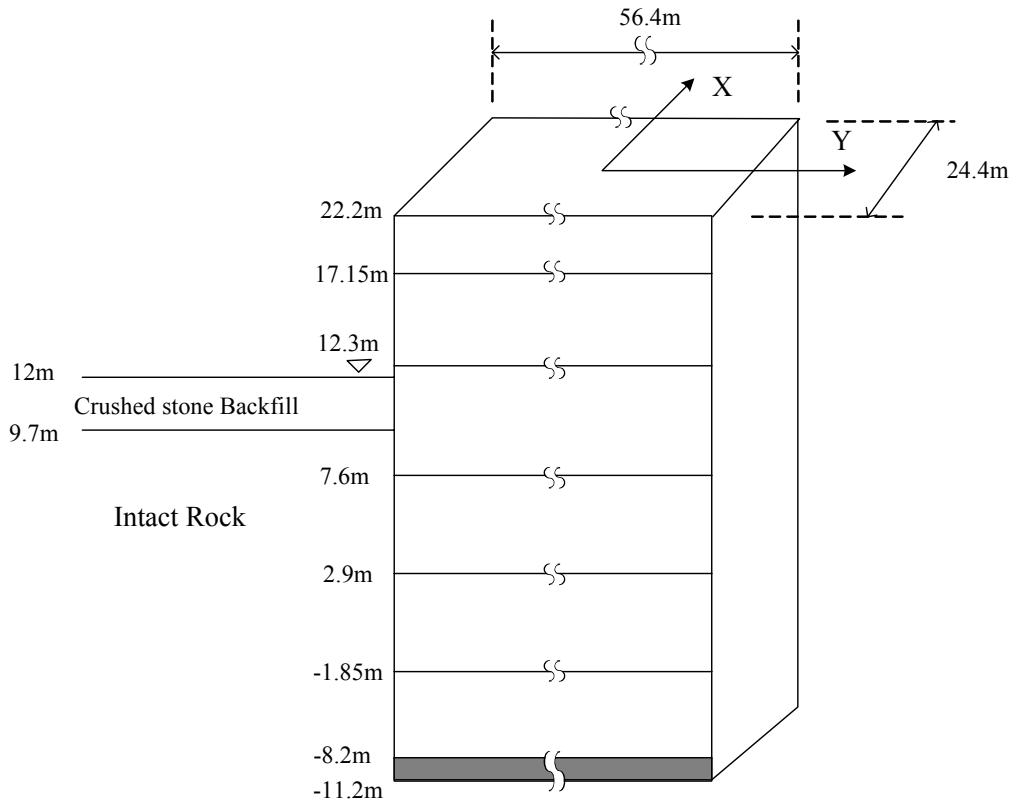


圖 43 核四廠控制廠房場址示意圖

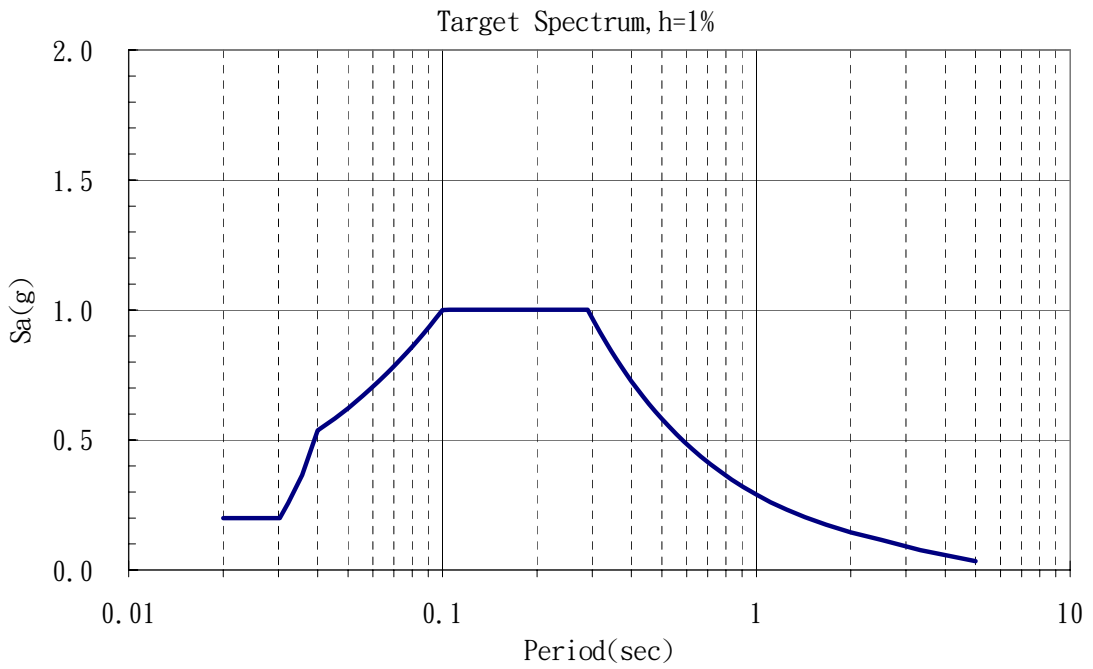


圖 44 核四廠控制廠房場址之設計反應譜

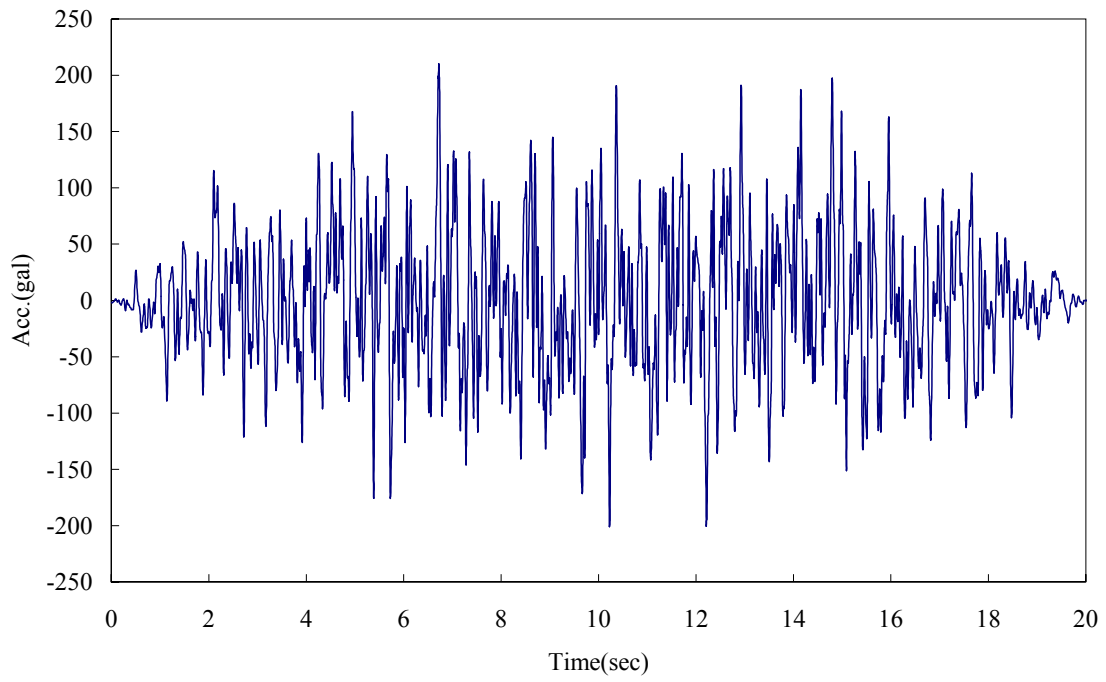


圖 45 設計地震之歷時紀錄

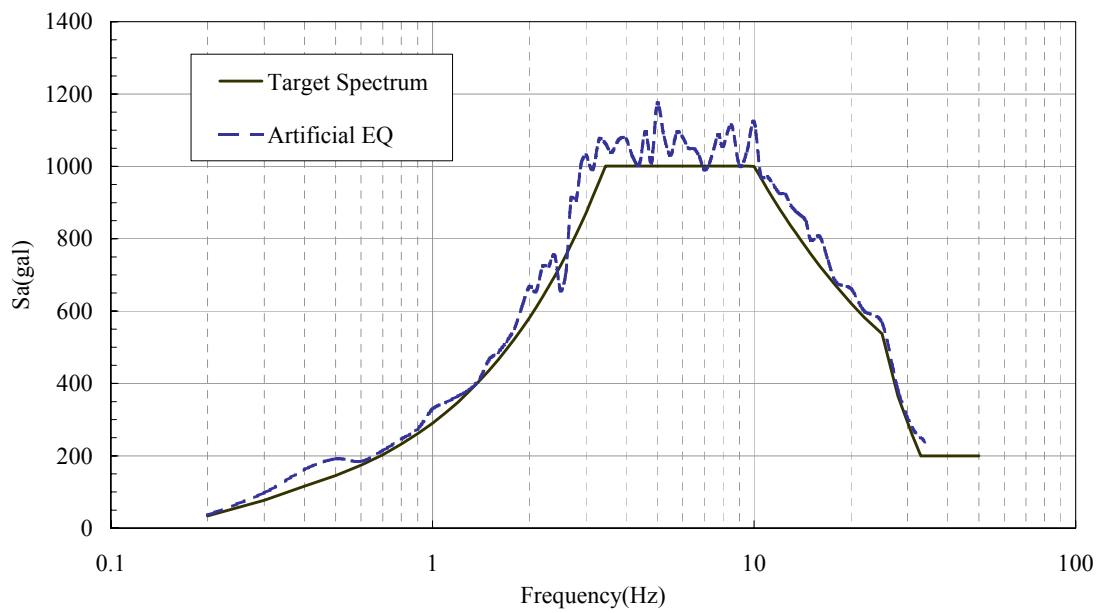


圖 46 設計地震之加速度反應譜與設計反應譜之比較

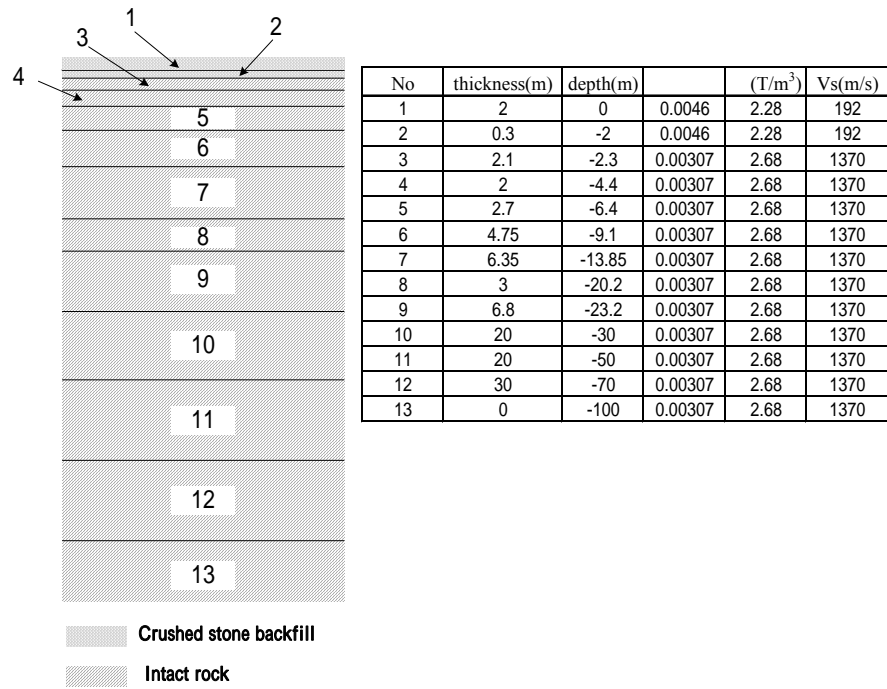


圖 47 控制廠房場址之自由場地盤模型

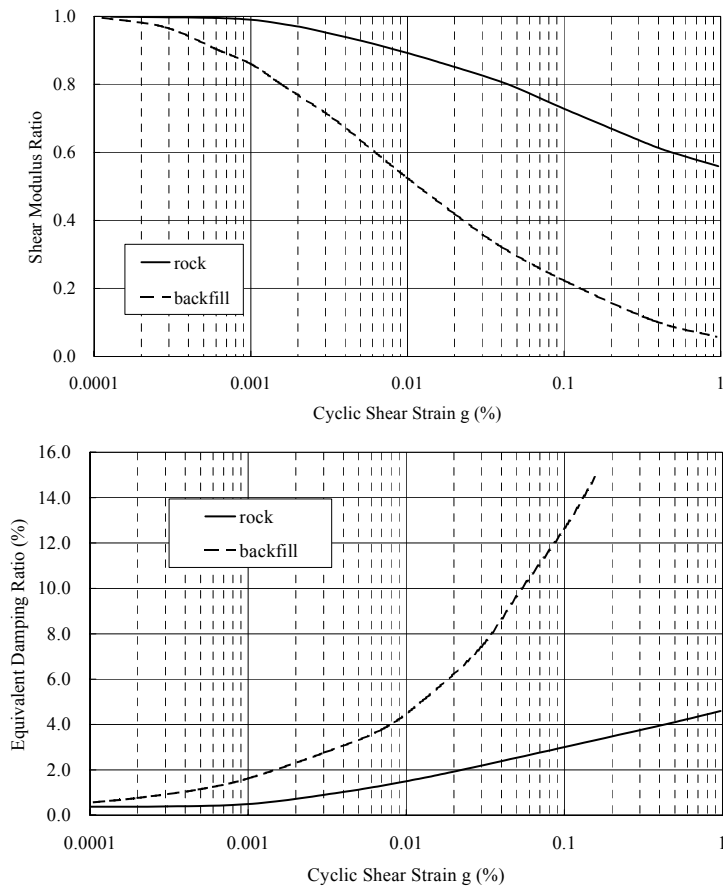


圖 48 場址土層動態性質曲線

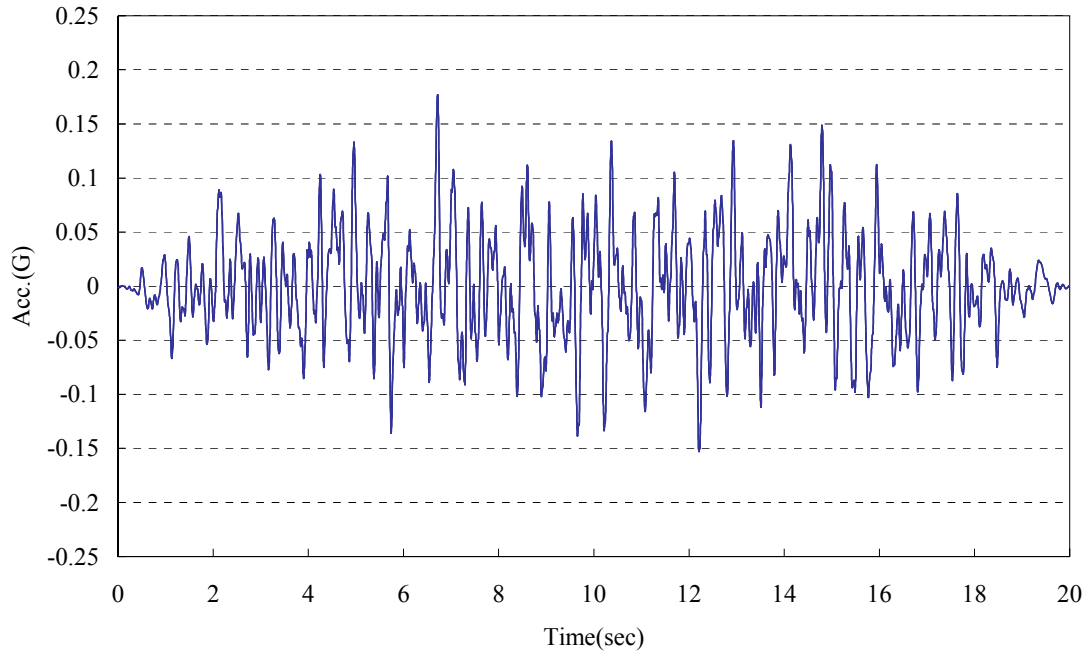


圖 49 經反捲積分析後基礎深度處之地盤運動

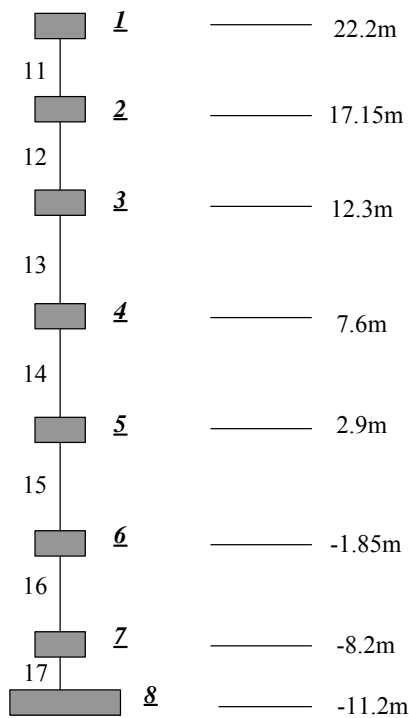


圖 50 控制廠房結構之集中質量模型示意圖
(粗斜體加底線者為節點標號；餘者為元素標號)

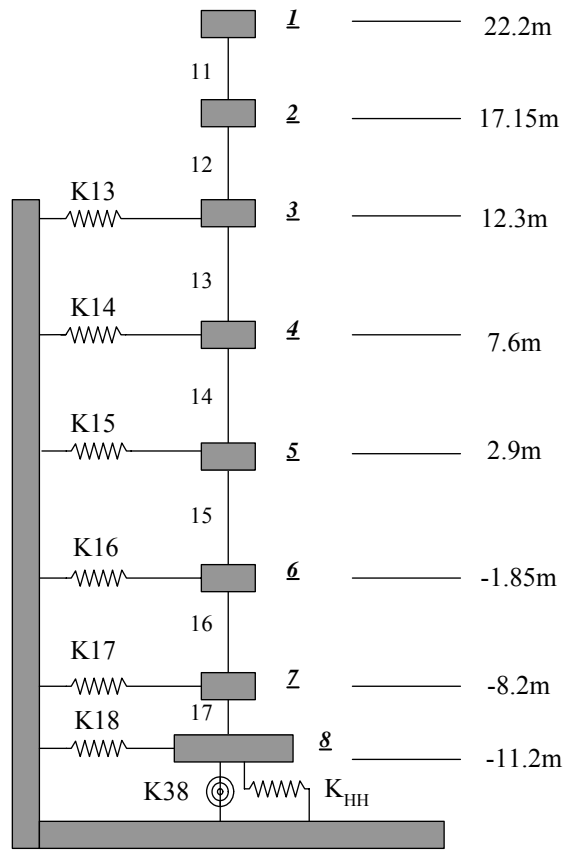


圖 51 控制廠房之結構~土壤彈簧模型示意圖

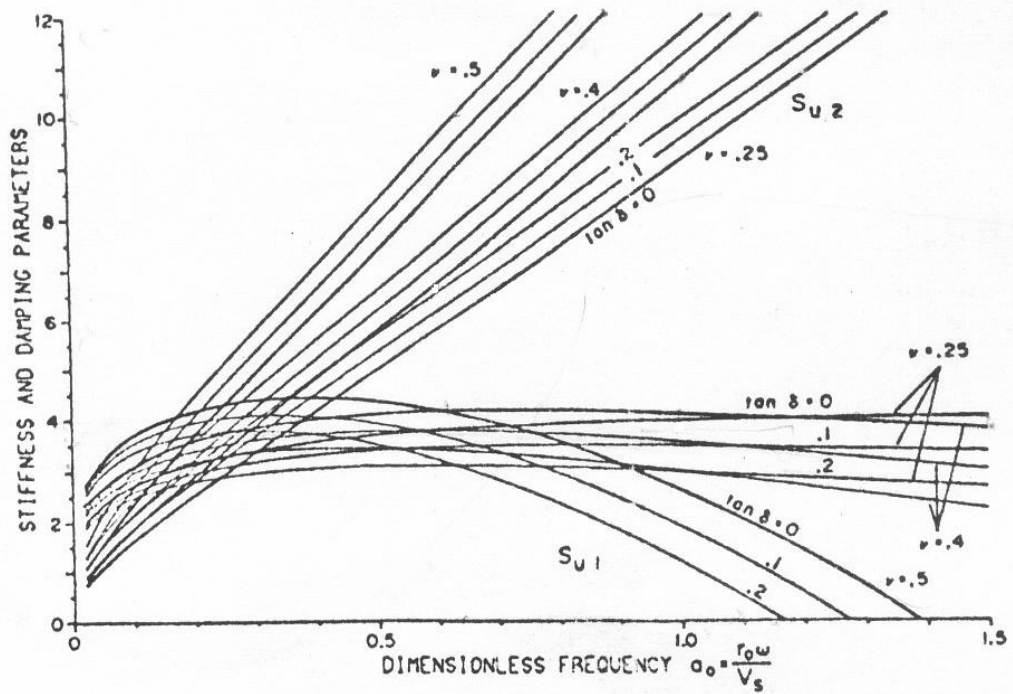


圖 52 水平向勁度與阻尼參數 S_u

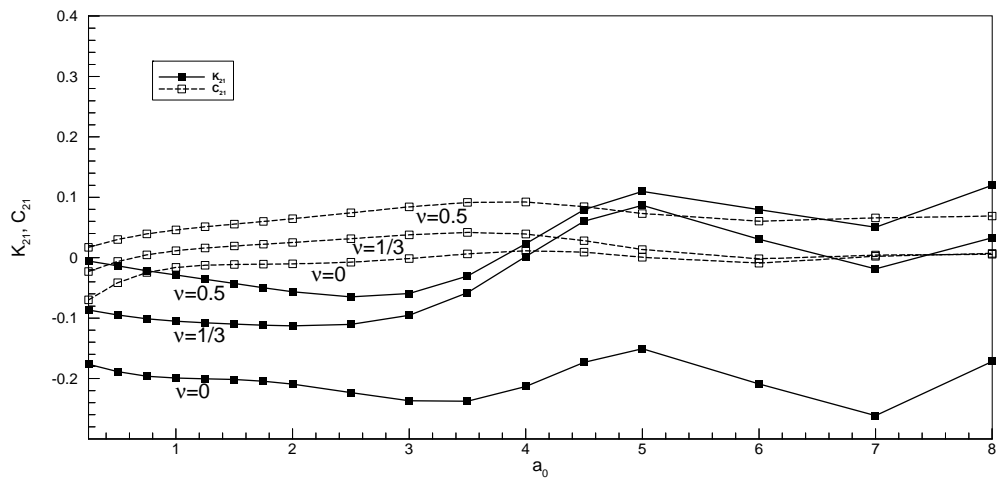
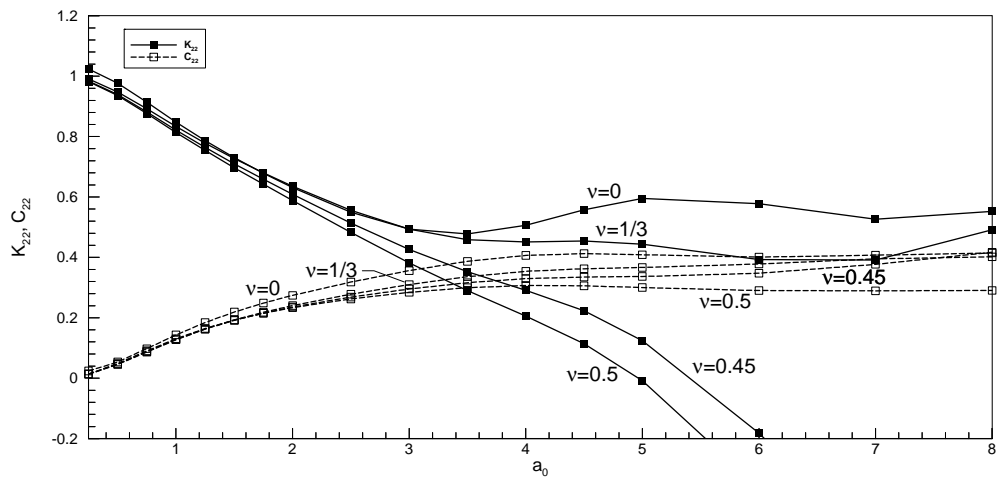
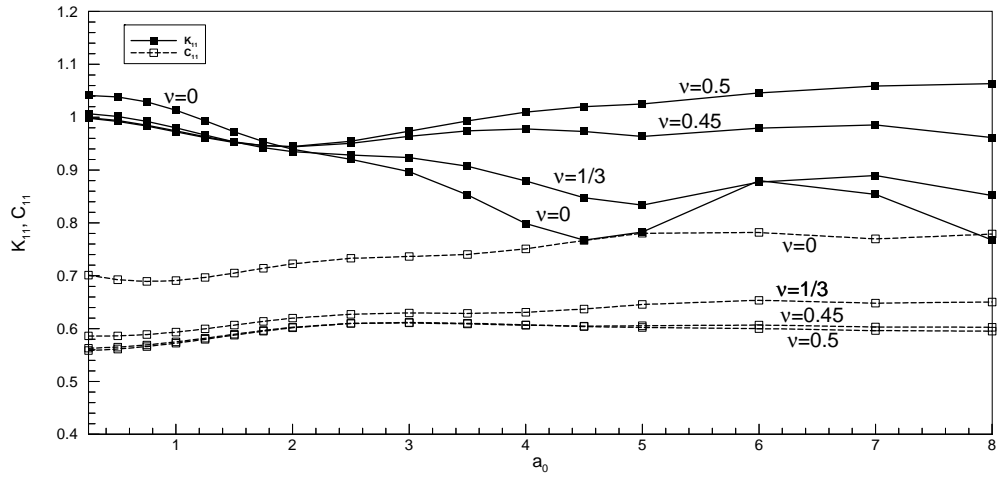


圖 53 表面圓形剛性基礎之阻抗係數 (Veletsos and Wei, 1971)