

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 花蓮圍阻體模型與場址之地震反應分析

### Site Effects and Seismic Responses of Hualien Containment Model

計畫編號：NSC 90-2211-E-002-096

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：陳正興 國立臺灣大學土木工程學研究所

#### 一、中文摘要

本研究計畫利用花蓮大比例尺模型地震試驗計畫(Large Scale Seismic Test)之實測地震資料進行地盤受震反應與土壤～結構互制作用之研究，研究內容及項目包括：(1)以花蓮兩垂直陣列之地震記錄檢討工程上常用之SHAKE 反卷積分析之適用性；(2)以地震記錄之振幅譜識別地層波速分佈，探討地層性質之異向性；(3)以地震記錄之相位譜識別地層波速分佈，探討不同系統識別之有效性；(4)探討地震波在不同地震強度作用下之土層放大係數，提供量化參數作為地盤分類及工程設計之用；(5)使用 HASSI 程式分析花蓮圍阻體之基礎與土壤之動力阻抗特性，探討基礎土壤回填之效應；(6)以實測記錄探討地震作用下之基礎有效輸入運動，比較與自由場運動之差異性；(7)建立適合工程使用之土壤～結構互制作用地震反應分析模式；(8)比較考慮與未考慮土壤～結構互制作用之差異，提供作為改進耐震設計規範之參考。

**關鍵詞：**地盤振動反應，土壤～結構互制作用，花蓮 LSST 計畫

#### Abstract

Since 1993, an international cooperated research project, called the Large Scale Seismic Test (LSST), had been carrying out at Hualien, Taiwan, to investigate the effects of soil-structure interaction during dynamic loadings. This study is aimed to use the data collected at the Hualien LSST project to investigate the seismic response of ground and the effects of soil-structure interaction. The studies include: (1) do the SHAKE-type deconvolution analysis by using the records obtained from two free-field downhole arrays;

(2) identify wave velocities of soil layers by using the amplitude spectral ratios between accelerograms recorded at various depths; (3) identify wave velocities of soil layers by using the phase spectrum of spectral ratios between accelerograms recorded at various depths; (4) investigate the soil-amplification effects for earthquake motions; (5) evaluate the characteristics of foundation impedance functions and the effects of foundation embedment; (6) investigate the foundation input motion during earthquakes; (7) establish a simple soil-struture interaction model suitable for engineering analysis; (8) compare the seismic responses w/o considering the effects of soil-structure interaction.

**Keywords:** soil-structure interaction, ground seismic response, Hualien LSST.

#### 二、緣由與目的

台灣東部地區位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊互相碰撞的縫合帶上，地震頻繁，是研究地震學與地震工程之最佳試驗場所，因此，先後曾有許多大型之地震觀測與試驗計畫在此地區進行，包括：(1).台灣強地動陣列計畫〔一〕(SMART-1)；(2).羅東大比例尺模型地震試驗計畫 (Large Scale Seismic Test at Lotung，簡稱羅東 LSST 計畫)；(3).台灣強地動陣列計畫〔二〕(SMART - II)；(4).花蓮大比例尺模型地震試驗計畫(Large Scale Seismic Test at Hualien，簡稱花蓮 LSST 計畫)。

上述中之花蓮 LSST 計畫係由美國、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，於花蓮市美崙台地上之榮工處大理石工廠內，興建一座比例尺為四分之一的圍阻體實體模型，在模型內及周圍地盤均佈置有密集之監測儀器，包括地震儀、水

壓計、土壓計及沉陷儀等，連接於即時全自動記錄系統，記錄地震時結構體與土壤之動態反應，以評估堅硬土壤地盤對土壤～結構互制作用之效應[1]。

花蓮 LSST 計畫自 1994 年開始記錄迄今，已蒐集有八十餘箇地震資料，地震規模大於 6 者亦有 16 箇之多，其中更包括 1999 年 9 月 21 日之集集地震資料，此等資料包含有結構物反應、地盤振動反應、土壓計及水壓計等資料。本計畫將利用這些地震記錄資料，從事地盤受震反應與土壤～結構互制作用之研究，藉由實測資料驗證以往設計分析方法之適用性，以提升耐震設計技術之水準，減低地震災害。

### 三、結果與討論

本研究計畫包括地震場址效應與土壤～結構互制分析兩方面，分述如次：

#### I. 地盤受震反應分析之研究

主要利用花蓮 LSST 計畫兩垂直陣列不同深度之地震資料從事地盤受震反應分析，A15 垂直陣列之地震儀包含 0m, 5.3m, 15.8m, 26.3m, 52.6m 與 100m 深度，而 A25 垂直陣列之地震儀包含 0m, 5.3m, 15.8m, 26.3m 與 52.6m 深度，選用之地震記錄包括 1994 年 1 月 20 日花蓮地震( $M=5.6$ )與 1999 年 9 月 21 日集集地震 ( $M=7.6$ )，分析結果如次：

##### 1. SHAKE 反卷積分析

利用地表地震儀記錄所得之地震加速度記錄當作輸入運動，以 SHAKE 程式進行反卷積分析，預測地表下不同深度之地震歷時反應，分別與兩垂直陣列中各測站之真實地震記錄相比較。

根據統一地盤模型(Unified Ground Model)分析所得之結果，其中除 A15 垂直陣列中 100m 深度之分析結果外，其他所有之分析結果均顯示在 NS 方向之預測分析結果與實測地震記錄非常接近，而在 EW 方向之預測分析結果雖與實測地震記錄接近，但仍有差異，總體而言，顯示 SHAKE 反卷積分析能合理預測 50m 深度以內之地盤地震反應，相當適合工程分析使用。

##### 2. 以振幅譜識別地層波速分佈

利用 A15 與 A25 垂直陣列中各深度地震加速度記錄與地表地震加速度之頻譜比，以其振幅譜之尖峰值識別所對應深度土層之顯著頻率，然後依序利用單層土模型、雙層土模型、以及三層土模型之理論解，識別出各層土壤之剪力波速。

分析結果顯示，根據 NS 方向地震記錄識別所得各層土壤之剪力波速略高於由震測法所量得之波速，而根據 EW 方向地震記錄識別所得之各層土壤剪力波速則明顯低於震測法所量得之波速，進而分別根據 NS 與 EW 兩不同方向識別所得之各層土壤剪力波速以 SHAKE 程式進行反卷積分析，分析所得地表下不同深度之地震歷時反應均與實測地震記錄相近，顯示花蓮場址之地盤具有異向性質，地層在 NS 方向之剪力波速高於 EW 方向之剪力波速。

##### 3. 以相位譜識別地層波速分佈

上項分析利用振幅譜之尖峰值識別所對應深度土層之顯著頻率時，由於振幅譜平滑化後之變化較平緩，不易識別其尖峰值所對應之顯著頻率，因此據其所識別得各土層之剪力波速具有較大之變異性。有鑑於此，本項分析乃改以改用相位譜作為系統識別之工具，利用 A15 與 A25 垂直陣列中各深度地震加速度記錄與地表地震加速度之頻譜比，針對其相位譜以多項函數進行回歸分析，所得函數與 90 度相位角之線近乎垂直，可以很準確地識別出頻譜之顯著頻率，然後再依序利用單層土模型、雙層土模型、以及三層土模型之理論解，識別出各層土壤之剪力波速。

分析所得結果顯示比前項分析結果更穩定而準確，結果仍然顯示地層在 NS 方向之剪力波速高於 EW 方向之剪力波速，更確定花蓮場址之地盤具有異向性質。此外，亦驗證根據相位譜作為系統識別可得較可靠之結果，優於以振幅譜尖峰值作為系統識別之傳統方法。

##### 4. 探討地震波放大作用

根據前述三項之地盤受震反應分析，顯示地盤對地震波之放大作用主要發生於近地表之淺層土壤，此乃由於地表淺層土壤之剪力波速較小以及地表應力為零之邊界條件所致，而

放大作用之大小主要決定於地表 30m 深度以內土壤之剪力波速，幾乎與較深層土壤之剪力波速沒有關係，因此在耐震設計時，以地表 30m 深度以內土壤之剪力波速作為地盤分類之準則應可適切反映場址效應。

另由參數分析結果可知，影響地盤受振反應分析結果之最重要影響參數為地層之剪力波速，而國內以往在作地質調查時通常不太重視這方面的調查，建議在作耐震設計時應重視地盤剪力波速之調查。

## II. 圍阻體微動量測分析之研究

本項研究主要針對花蓮 LSST 計畫之圍阻體及周圍地盤進行微動量測，以頻譜分析之方法識別圍阻體各振動模態之顯著頻率，以及地盤振動之顯著頻率，研究成果相當豐碩，摘述如下：

### 1. 圍阻體微動之顯著頻率

利用國家地震工程研究中心之微地動量測儀器，前往花蓮量測圍阻體及周圍地盤之微動記錄。由圍阻體各位置之微動記錄，交叉比對其富氏譜，識別出各振態之顯著頻率，知其在強軸與弱軸方向之顯著頻率具有差異；另由所量得 A15 與 A25 測站附近地盤之微動記錄富氏譜，顯示兩處 EW 方向之振幅譜均明顯較所對應 NS 方向者為高，且由 HVSR 法可識別得地盤在兩方向之顯著振動頻率不一致，顯示花蓮場址之地盤具有異向性質。

### 2. 圍阻體強地動之顯著頻率

選取 1999 年 9 月 21 日集集地震之圍阻體及周圍地盤之振動記錄作頻譜分析，交叉比對其富氏譜，並與上述微動記錄之富氏譜作比較分析，結果同樣顯示圍阻體及周圍地盤在強軸與弱軸方向之顯著頻率具有差異，再度驗證花蓮場址之地盤具有異向性質。

### 3. 地盤之非線性性質

將強地動之分析結果與微動分析結果作比較，結果發現由地震資料識別所得圍阻體各振態之顯著頻率均較由微動資料識別所得者為低；另根據周圍地盤之強地動資料識別所得地盤之顯著頻率（以 HVSR 法之頻譜比作系統

識別），亦比由微動資料識別所得者為低，表示場址之地盤模數在受強烈地震振動時有減小之現象，亦即地盤性質隨振動強度之增加具有非線性之變化。

## III. 土壤～結構互制分析之研究

### 1. 混合模式分析方法

目前用於土壤～結構互制作用分析之方法很多，主要可概分為三類，分別為連體力學法、有限元素法與混合模式法。其中混合模式法結合了有限元素法能模擬複雜結構物之優點，而又具有連體力學法能模擬波傳運動在遠域之輻射阻尼現象，為三類方法中功能最強之分析方法，本研究即採用混合模式法來分析花蓮圍阻體受地震作用下之動力反應，所用分析程式為 HASSI-8 程式，此外，亦利用工程上常用之簡化模式進行分析以作比較，評估該法之適用性。

HASSI-8 程式係根據混合模式法所撰寫之分析程式[2]，此法將整個土壤與結構物系統以半球面界面分成近域和遠域兩部份進行分析。近域部份以有限元素法來模擬，而遠域部份則以連體力學法分析半無限域與近域間界面的阻抗係數，此係數已由 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半球面上三組隨頻率變化之阻抗係數[2]，據此阻抗係數即可直接組成遠域阻抗矩陣；最後則將近、遠域之阻抗矩陣結合以進行整體之土壤～結構互制作用分析，求得其動力反應。

在應用混合模式法進行地震反應分析時，針對給予之自由場地震記錄（控制運動），必須考慮如何轉換成適用於混合模式分析模型之等值輸入運動（或稱等值地震力），加於分析模型上以模擬地震輸入運動。混合模式法之地震反應分析採用結構疊加法（structural superposition）之原理來推導其等值輸入運動，即以一自身平衡（self-equilibriumed）之輔助子結構加於原有之土壤～結構系統上以求解，其示意圖及符號如圖 1 所示，所得整個系統之運動方程式可表為下式，可同時考慮地震輸入運動之非同步現象，其詳細推導過程可參閱參考文獻[3]。

$$\begin{bmatrix}
 S_{ss}^S & S_{sc}^S & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 S_{cs}^S & S_{cc}^{SI} & S_{ci}^I & S_{ce}^I & 0 & 0 \\
 0 & S_{ic}^I & S_{ii}^I & S_{ie}^I & 0 & 0 \\
 0 & S_{ec}^I & S_{ei}^I & S_{ee}^{IN} & S_{en}^N & S_{ef}^N \\
 0 & 0 & 0 & S_{ne}^N & S_{nn}^N & S_{nf}^N \\
 0 & 0 & 0 & S_{fe}^N & S_{fn}^N & (S_{ff}^N + G_{ff})
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 u'_s \\
 u'_c \\
 u'_i \\
 u'_e \\
 (u'_n - u'_f) \\
 (u'_f - u'_f)
 \end{Bmatrix}
 = \begin{Bmatrix}
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & -S_{en}^N & -S_{ef}^N \\
 S_{ne}^N & 0 & 0 \\
 S_{fe}^N & 0 & 0
 \end{Bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 u'_e \\
 u'_n \\
 u'_f
 \end{Bmatrix}$$

式(1)

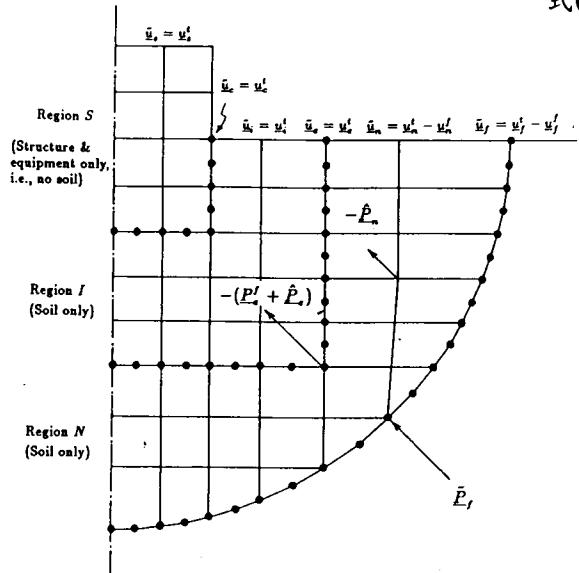


圖 1 地震反應之分析模型示意圖

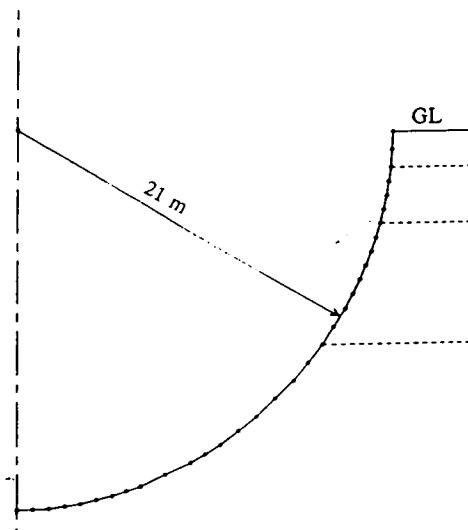


圖 2 地震反應分析之遠域模型

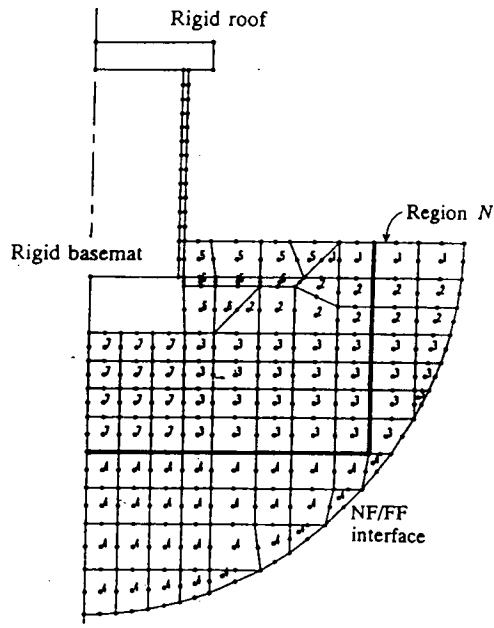


圖 3 地震反應分析之近域模型

## 2. 集集地震反應分析

應用 HASSI 程式進行地震反應分析所建立之 FVT-2 分析模式，分別如圖 2 與圖 3 所示，圖中之粗點線與近／遠域界面間之區域即為本分析選定之 N 區域，以定義地震輸入運動，粗黑線以外節點之自由場位移必須先經由場址受震反應分析求得，作為式(1)之輸入運動。圖中各土壤元素之剪力模數與阻尼比隨剪應變之關係均選自地質調查報告書[4]。

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（使用 SHAKE 程式進行分析），求得 HASSI-8 分析模型中 N 區域節點位置之自由場運動，再依式(1)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。

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 4 與 5 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 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

對於 1999 年 9 月 21 日地震之分析，所採用之地震輸入運動為 A15 測站 EW 及 NS 方向之加速度記錄，將其代入式(4)中求得三自由度之位移反應，再依式(2)與(3)即可計算得各位置之位移或加速度分量，並以 5% 阻尼比之反應譜作為比較。

由簡化 SSI 模型分析所得屋頂樓版與基礎版 EW 方向之總加速度反應譜如圖 6 所示，將其分別與圍阻體上 RFW 與 BAW 位置記錄之總加速度反應譜比較，分析所得之最大反應值與地震記錄相當接近，惟具有較多之高頻 ( $\geq 3\text{Hz}$ ) 反應。而 NS 方向之分析結果則示於圖 7，並與圍阻體上 RFW 與 BAW 位置記錄之總加速度反應譜比較，分析所得之顯著頻率及最大反應值均與地震記錄非常接近，顯示簡化 SSI 模型能有效模擬花蓮圍阻體受地震作用之振動反應。

#### 4. 討論

- (1). 本研究所提之三自由度土壤～結構簡化模式相當簡單，可根據已知之基礎阻抗值由式(4)估算土壤～結構系統的自然頻率，並與固接剛性基盤模式的自然頻率作比較，以了解土壤～結構互制作用對結構系統動力特性之影響。
- (2). 由三自由度簡化 SSI 模型分析結果與傳統單自由度固接剛性基盤模式分析之比較，可清楚地識別出土壤～結構互制效應對結構物振動反應之影響。由花蓮 LSST 強制振動試驗之結果，顯示基礎埋置效應可以顯著地降低系統受動態外力作用所引致之系統總位移及結構彈性變形。

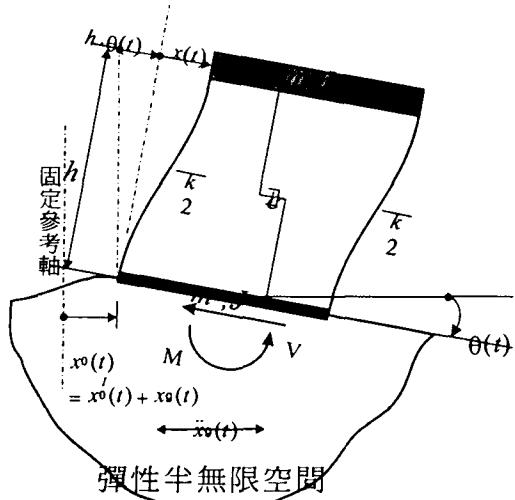


圖 6 簡化土壤～結構互制分析模型示意圖

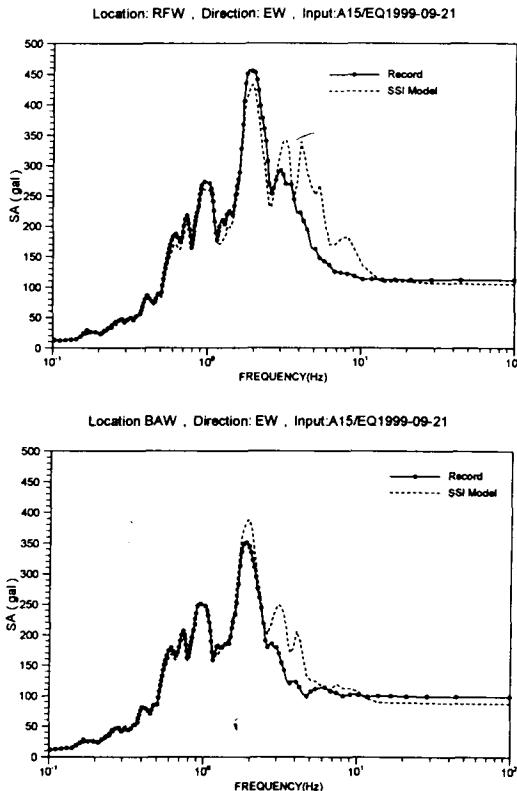


圖 7 921 集集地震圍阻體 EW 方向反應譜

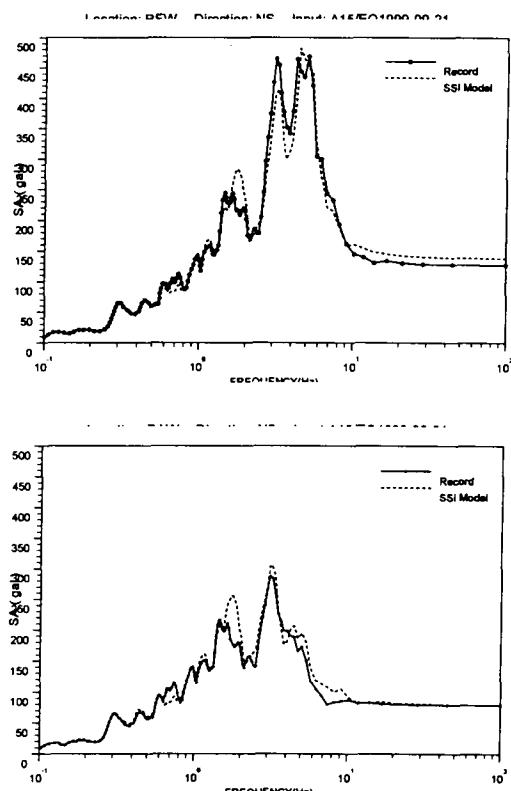


圖 8 921 集集地震圍阻體 NS 方向反應譜

- (3). 由 1999 年 9 月 21 日地震之分析結果，顯示三自由度簡化 SSI 分析模式能有效模擬

對於 1999 年 9 月 21 日地震之分析，所採用之地震輸入運動為 A15 測站 EW 及 NS 方向之加速度記錄，將其代入式(4)中求得三自由度之位移反應，再依式(2)與(3)即可計算得各位置之位移或加速度分量，並以 5% 阻尼比之反應譜作為比較。

由簡化 SSI 模型分析所得屋頂樓版與基礎版 EW 方向之總加速度反應譜如圖 6 所示，將其分別與圍阻體上 RFW 與 BAW 位置記錄之總加速度反應譜比較，分析所得之最大反應值與地震記錄相當接近，惟具有較多之高頻( $\geq 3\text{Hz}$ )反應。而 NS 方向之分析結果則示於圖 7，並與圍阻體上 RFW 與 BAW 位置記錄之總加速度反應譜比較，分析所得之顯著頻率及最大反應值均與地震記錄非常接近，顯示簡化 SSI 模型能有效模擬花蓮圍阻體受地震作用之振動反應。

#### 4. 討論

- (1). 本研究所提之三自由度土壤～結構簡化模式相當簡單，可根據已知之基礎阻抗值由式(4)估算土壤～結構系統的自然頻率，並與固接剛性基盤模式的自然頻率作比較，以了解土壤～結構互制作用對結構系統動力特性之影響。
- (2). 由三自由度簡化 SSI 模型分析結果與傳統單自由度固接剛性基盤模式分析之比較，可清楚地識別出土壤～結構互制作應對結構物振動反應之影響。由花蓮 LSST 強制振動試驗之結果，顯示基礎埋置效應可以顯著地降低系統受動態外力作用所引致之系統總位移及結構彈性變形。

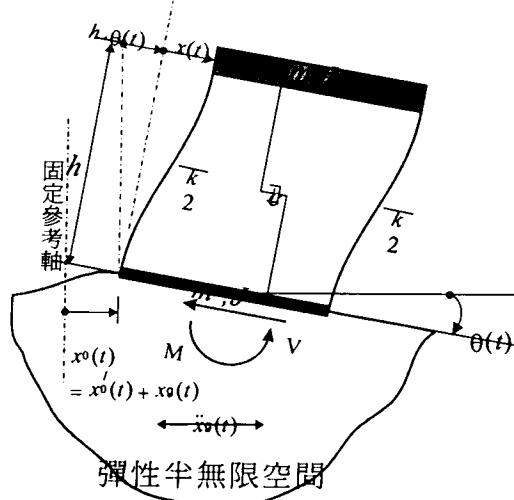


圖 6 簡化土壤～結構互制作用分析模型示意圖

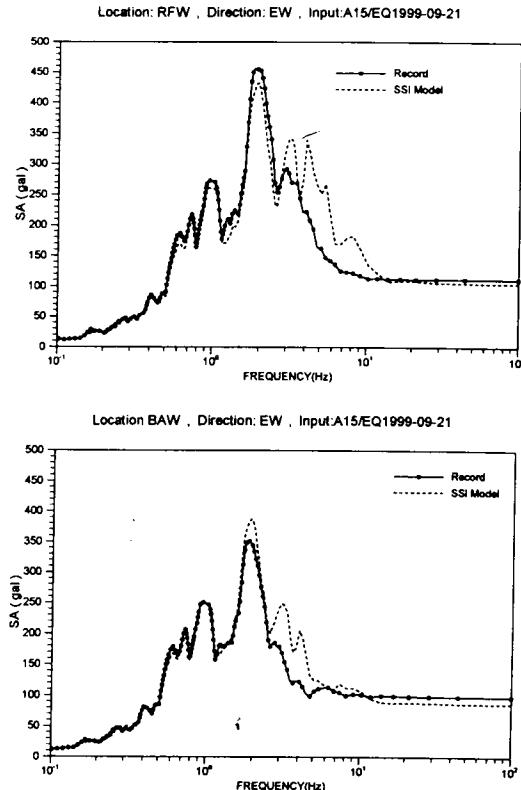


圖 7 921 集集地震圍阻體 EW 方向反應譜

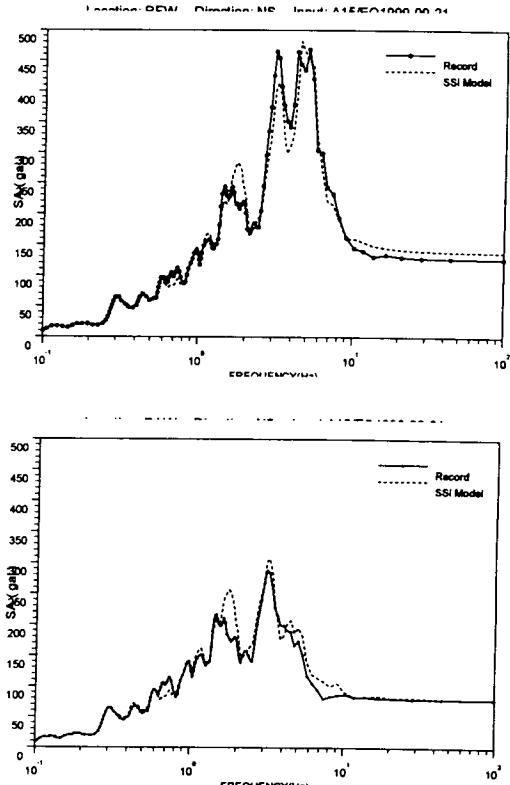


圖 8 921 集集地震圍阻體 NS 方向反應譜

- (3). 由 1999 年 9 月 21 日地震之分析結果，顯示三自由度簡化 SSI 分析模式能有效模擬