

花蓮大比例尺圍阻體模型強制振動試驗之模擬分析

許尚逸¹、陳正興¹、林威廷²

1.國家地震工程研究中心 2.行政院原子能委員會核能研究所

摘要

花蓮大比例尺地震試驗 (Hualien Large-Scale Seismic Test, 簡稱LSST) 為美國、日本、韓國、法國及台灣等五國之電力公司及核能研究單位在花蓮所進行之圍阻體模型地震試驗計畫。本研究針對圍阻體結構與強制振動試驗條件, 利用ABAQUS程式建立三維有限元素模型並進行動態模擬分析, 由模擬結果與試驗資料比對顯示本研究建立之模型可獲得不錯的模擬結果。

關鍵字: 花蓮大比例尺地震試驗、強制振動試驗、土壤結構互制

ABSTRACT

To investigate the effects of soil-structure interaction during earthquakes, an international collaborated large scale seismic test (LSST) has been carried out at Hualien, Taiwan. In this project, two phases of forced vibration tests had been conducted on the containment model. The purpose of this study is to further examine the dynamic characteristics of the Hualien containment by using the ABAQUS program and dynamic analysis. Through these analyses, results clearly show that the predominant frequencies of the containment-soil system are quite consistent with test results.

Keywords: Hualien Large-Scale Seismic Test、forced vibration test、soil-structure interaction

一、前言

台灣位於環太平洋地震帶上, 地震頻繁, 尤其是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, 更屬地震密集地區, 每年發生的大小地震不計其數, 從學術研究之觀點來看, 台灣東部地區正是研究地震學與地震工程之最佳試驗場所。因此, 台灣電力公司與美國、日本、韓國、法國等五國之電力公司及核能研究單位共同合作, 於1990年開始在花蓮進行圍阻體模型地震試驗計畫(Large Scale Seismic Test, 簡稱LSST)。計畫內容包括興建一座比例尺為四分之一的圍阻體實體模型(圖1), 並在模型內及周圍地盤均佈設有密集之地震儀陣列(圖2), 可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。

花蓮LSST計畫已收集了兩次之結構體強制振動試驗資料與百餘次之地震記錄, 已有相當多的研究成果發表。本研究將應用ABAQUS程式建立花蓮LSST圍阻體

結構與場址地層模型來模擬強制振動試驗之結果, 包括第一階段強制振動試驗(FVT-1)與第二階段強制振動試驗(FVT-2)。比對試驗與有限元素動態分析結果, 亦將其分析結果與固接剛性基盤模態分析進行比較, 以瞭解考慮土壤結構互制作用(Soil-Structure Interaction, SSI)之影響。

二、圍阻體模型強制振動試驗簡介

強制振動試驗係由振動產生器產生各種頻率之簡諧力加諸於試驗模型上, 待結構物振動達穩定狀態後記錄各測點之振動反應, 據其計算結構物在不同頻率單位簡諧力作用下之振幅及相位角, 以識別結構物各種振動模態之自然頻率。

花蓮LSST計畫在圍阻體建造過程中尚未進行地震監測之前, 曾進行兩階段之圍阻體模型強制振動試驗: 第一階段之強制振動試驗FVT-1係在圍阻體模型結構物建築完成而周圍土壤尚未回填之前進行; 第二階段之強制振動試驗FVT-2則是在圍阻體周

圍土壤完成回填之後進行，以下分別對此二次試驗簡單介紹。

2.1 FVT-1 表面式強制振動試驗

第一階段之強制振動試驗係在圍阻體模型結構物建築完成而周圍土壤尚未回填之前進行，試驗情況之剖面圖如圖 3 所示。將振動產生器錨定於屋頂版上進行屋頂水平振動試驗，水平振動試驗之量測儀器佈置同樣參見圖 3。

為進行預測分析，由日本中央電力研究所負責土壤調查並歸納試驗結果所提出之統一地盤模型如圖 4 所示。由圖可知，近地表 20m 厚之土層可概分為四層，0~5m 為較疏鬆之砂層，以下則為密實之卵礫石層。

2.2 FVT-2 沉埋式強制振動試驗

第二階段之強制振動試驗係在圍阻體周圍土壤完成回填之後進行，試驗情況之剖面圖如圖 5 所示，試驗步驟與 FVT-1 相同，同樣將振動產生器錨定於屋頂版上進行屋頂水平振動試驗。

為進行 FVT-2 預測分析，同樣由日本中央電力研究所提出之統一地盤模型如圖 6 所示。

三、ABAQUS 數值模擬分析

3.1 分析模型

由於本研究數值分析模擬部分主要可分為剛性基盤模式與完整分析模式兩項，剛性基盤模式主要假設基盤不變形，所以其數值分析模型只需針對建立結構部份模型即可，分析所用之網格模型如圖 7 所示，以三維實體元素 C3D8 模擬全尺寸圍阻體結構。

至於進行完整分析模型時，必須考慮基礎底部土層性質來進行土壤結構互制作用分析，所以應建立土層部分之模型。但考慮到整體土壤結構系統具有對稱性，故分析網格採用四分之一模型來代替全模型進行分析，以節省分析時間與電腦記憶體需求。在此採用三維模型來模擬現地情況，所建構之模型為：近域圍阻體結構與土體採用三維八節點實體元素 C3D8，整體近域分析模型包含土層部分，其大小尺寸為 30m×30m×50m；遠域部分則採用三維八節點無限元素 CIN3D8，其長度與全部近域元素範圍相當，各向外延伸一倍長度，因此全部分析所用之模型尺寸則為 60m×60m×100m，如圖 8

所示。

3.2 邊界條件

在模擬剛性基盤分析部份，假設結構體與土層間介面不產生滑移或分離之情況，當結構物為座落在地表面之上時，邊界條件為固定圍阻體底面各節點之自由度；若結構物基礎部份埋入土層之中，分析時邊界條件則需設圍阻體自地表以下各節點之自由度為鎖定(fixed end)。

在完整分析模型中，由於不同的外力施加方向，四分之一模型會有不同的對稱條件。對於強制振動試驗，穩態外力與 1 方向平行，故模型邊界沿著 1 方向(Z=0 平面)為對稱，須鎖定該邊界上之 3 方向之自由度；對沿著 3 方向之邊界(X=0 平面)則為反對稱，則須鎖定該邊界上之 2 方向之自由度。

3.3 材料性質與阻尼之模擬

材料性質係根據現地試驗所獲得之動力參數來求取，近域土壤與結構元素所用之材料參數詳如表 1 與圖 9。

欲正確的分析波傳能量衰減的關係，必須加入阻尼。ABAQUS 程式中阻尼的施加方式係採用雷利阻尼 (Rayleigh damping)，也就是假設系統之阻尼可表為與質量矩陣與勁度矩陣的線性疊加，即 $\{C\} = \alpha\{M\} + \beta\{K\}$ ，其為黏彈阻尼 (Viscous damping) 之一種，一般常用於結構之分析，其系統動力方程式可表為：

$$\{M\}\{\ddot{u}\} + \{C\}\{\dot{u}\} + \{K\}\{u\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

但對於土壤來說，遲滯阻尼(Hysteretic damping)為比較符合土壤動力性質之模式，其系統動力方程式可表為：

$$\{M\}\{\ddot{u}\} + \{K\}(1 + 2i\xi)\{u\} = \{P(t)\} \quad (2)$$

比較 Viscous 與 Hysteretic damping 兩系統之阻尼力項次，可得：

$$\{C\}\{\dot{u}\} = i(2\xi)\{u\}\{K\} \quad (3)$$

若假設土壤結構系統受一頻率為 $\bar{\omega}$ (rad/s) 之簡諧外力，系統之位移反應可表為 $\{u\} = \{U\}e^{i\bar{\omega}t}$ ，則式(3)可改寫為

$$\{C\} = \frac{2\xi}{\bar{\omega}}\{K\} = \frac{\xi}{\pi f}\{K\} \quad (4)$$

如此則可將 Rayleigh Damping 與 Hysteretic Damping 之關係連結起來，故在此分析中，均假設 $\alpha = 0$ ， $\beta = (2\xi/\bar{\omega}) = (\xi/\pi f)$ ， f 為頻率(Hz)。

四、強制振動試驗案例分析

根據上述所建立之 ABAQUS 數值模型、模擬方式與分析參數，依照花蓮 LSST 現地強制振動試驗佈置，分別以圍阻體模型結構進行強制振動剛性基盤分析，與利用包含場址地層之完整模型模擬強制振動試驗。除了可比對現地試驗結果進行模型驗證外，亦可針對傳統結構分析之剛性基盤模式與考量土壤結構互制之完整分析兩者結果探討整體系統之動力反應之不同，以下分別就表面式強制振動試驗 FVT-1 與沉埋式強制振動試驗 FVT-2 兩種試驗分析進行說明。

4.1 FVT-1 案例

以 ABAQUS 數值軟體進行剛性基盤分析模擬 FVT-1 試驗，其結果如圖 10 所示，由圖中可明顯識別出圍阻體結構在剛性基盤模式下其顯著頻率為 9.5Hz。

FVT-1 完整模型(圖 11)分析所得之 FVT-1 分析結果以及實際試驗資料比較如圖 12 所示，圖 12(a)為正規化振幅資料，圖 12(b)為相位角資料。由分析結果可知，ABAQUS 數值分析結果其系統顯著頻率大約在 4.8Hz 之間，而略大於實際試驗值 4.6Hz，而數值分析所得之正規化振幅則略小於實際試驗值。

4.2 FVT-2 案例

以 ABAQUS 數值軟體進行剛性基盤分析模擬 FVT-2 試驗，其結果如圖 13 所示，由圖中可明顯識別出圍阻體結構在剛性基盤模式下其顯著頻率為 12.5Hz。

FVT-2 完整模型(圖 14)分析所得之分析結果以及實際試驗資料比較，同樣繪於圖 15 作為比較，圖 15(a)為正規化振幅資料，圖 15(b)為相位角資料。由圖可看出，ABAQUS 數值分析所得之顯著頻率 6.4Hz 與簡化分析所得者一致，且與實際試驗結果 6.3Hz 十分吻合。在數值分析所得之正規化振幅方面，數值分析結果稍大於實際試驗值。

4.3 初步結論

將剛性基盤模態分析與強制振動試驗分析所得結果相互比較，則可以清楚發現，在未考慮土壤結構互制效應之剛性基盤分析模式所得之結果與實際系統動力行為反應差異甚大，整體系統頻率依照分析模式的不同有顯著之變化。在 FVT-1 試驗中，顯

著頻率由剛性基盤模式之 9.5 Hz 下降至 4.8Hz；在 FVT-2 試驗中，顯著頻率更由剛性基盤模式之 12.5 Hz 下降至 6.4Hz。

五、結論與未來展望

由上述兩次強制試驗模擬結果而言，本研究所建立之數值模擬模型已可以有效的進行頻率域穩態分析，其結果也相當令人滿意，足以驗證本研究所建立數值網格之正確性，可依此網格模型進行後續時間域地震反應動態歷時分析。

比較兩次強制振動試驗與模擬結果顯示，基礎埋置效應影響整體結構動態行為甚大，且場址土壤參數為影響 SSI 反應之重要因素。

六、參考文獻

- [1] 楊樹華，“土壤~結構互制作用對結構物動力反應之影響”，博士論文，國立台灣大學土木工程研究所，1999。
- [2] “花蓮圍阻體模型地震反應之相關性研究完成報告”，台灣電力股份有限公司，2001。
- [3] TEPCO., 1993, “Hualien LSST Project, Status Report of the forced Vibration Test Results, (Before Backfill)”, Report, Tokyo Electric Power Co., Tokyo, Japan.
- [4] TEPCO., 1993, “Hualien LSST Project, Status Report of the forced Vibration Test Results, (After Backfill),” Report, Tokyo Electric Power Co., Tokyo, Japan.

材料	ρ (kg/m ³)	Vs (m/s)	ν	E (N/m ²)	ξ (%)
S1	1690	133	0.38	8.25E+07	2
S2	1930	231	0.48	3.05E+08	2
G1	2420	333	0.47	7.89E+08	1.28
G2	2420	333	0.47	7.89E+08	5.81
G3	2420	476	0.47	1.61E+09	5.7
G4	2420	476	0.47	1.61E+09	2.6
G5	2420	550	0.47	2.15E+09	2.6
BF1	2330	400	0.38	1.03E+09	2
BF2	2390	400	0.48	1.13E+09	2
CONC	2400	—	0.15	2.30E+10	2

表 1 有限元素分析所用之材料參數

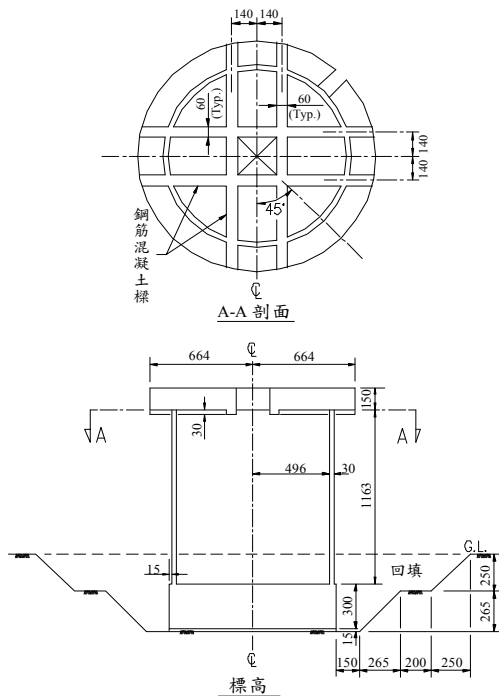


圖 1 花蓮 LSST 計畫圍組體模型

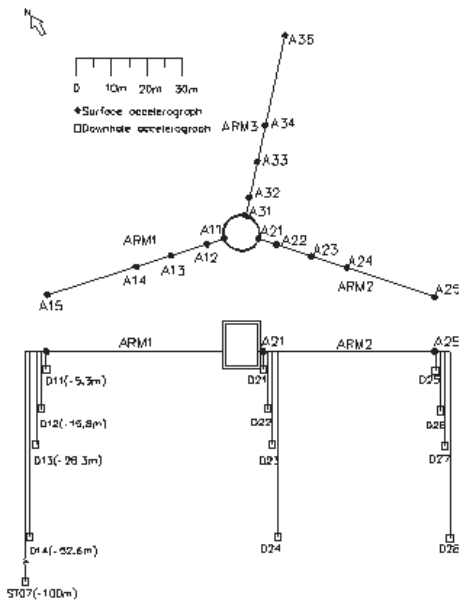


圖 2 花蓮 LSST 計畫佈置圖

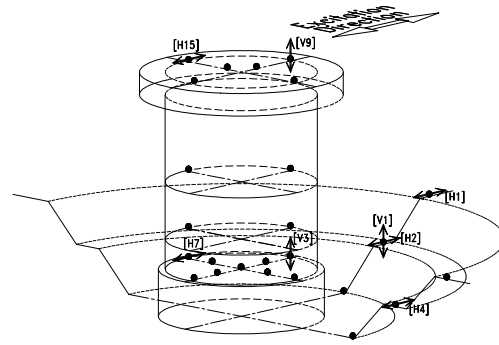


圖 3 FVT-1 水平振動試驗配置圖

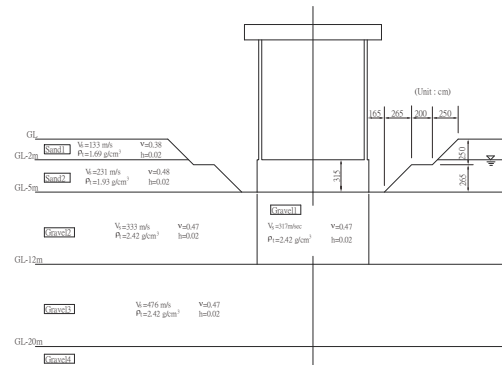


圖 4 FVT-1 分析之統一地盤分析模型

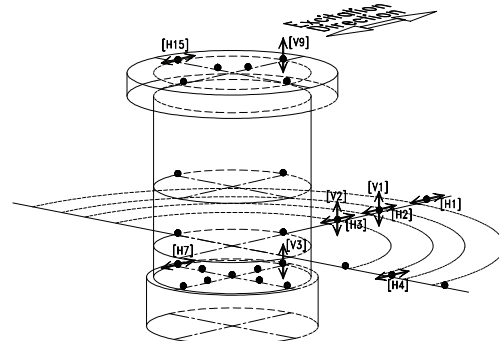


圖 5 FVT-2 水平振動試驗配置圖

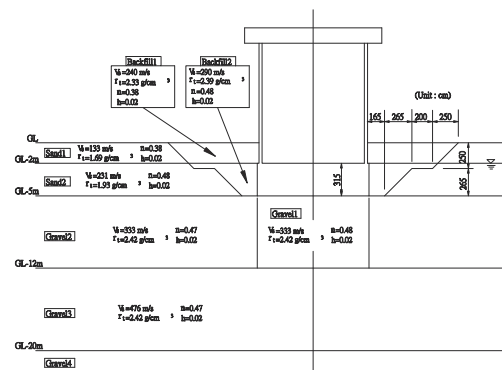


圖 6 FVT-2 分析之統一地盤分析模型

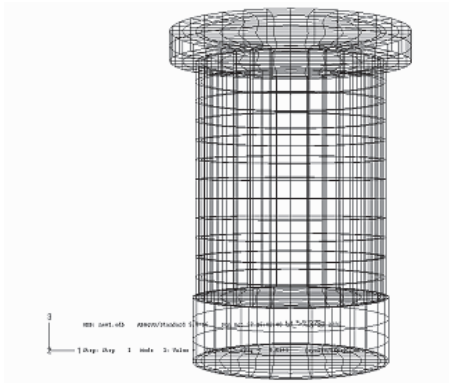


圖 7 圍阻體模型剛性基盤模式分析網格

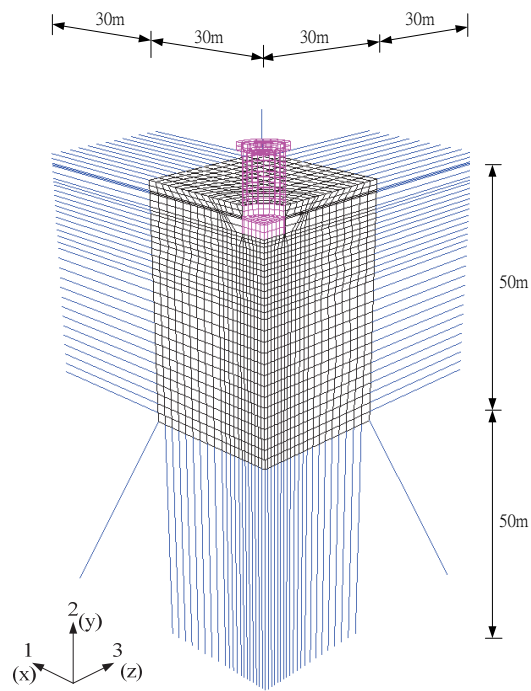


圖 8 花蓮 LSST 完整模式分析網格

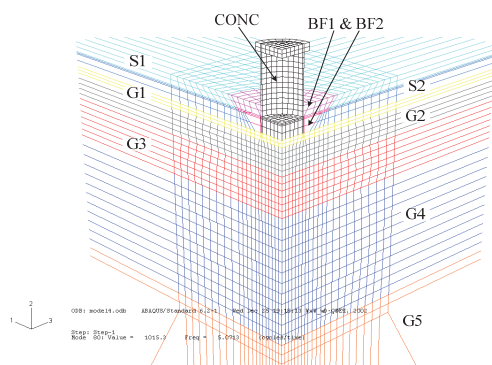


圖 9 FEM 分析材料參數示意圖

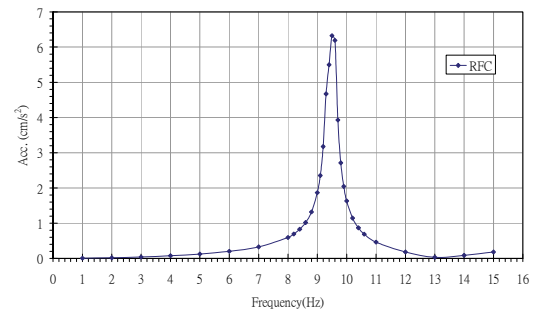
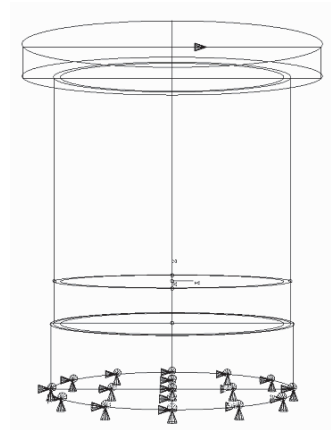


圖 10 FVT-1 條件下剛性基盤分析結果

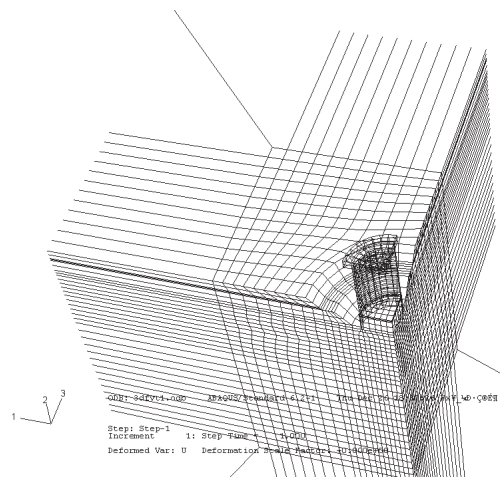
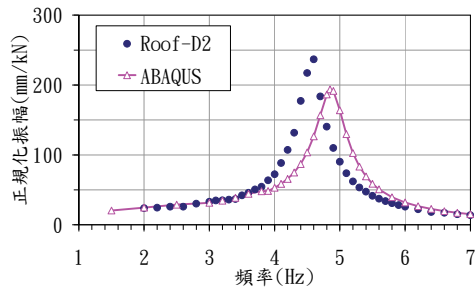
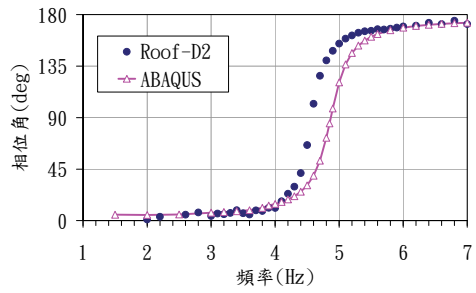


圖 11 FVT-1 完整分析模型



(a) 正規化振幅



(b) 相位角

圖 12 FVT-1 完整分析結果與比較

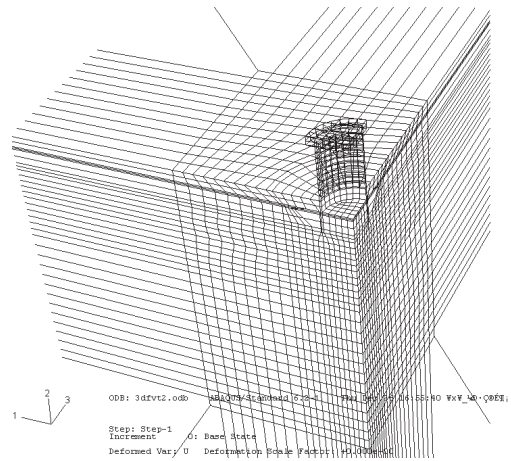
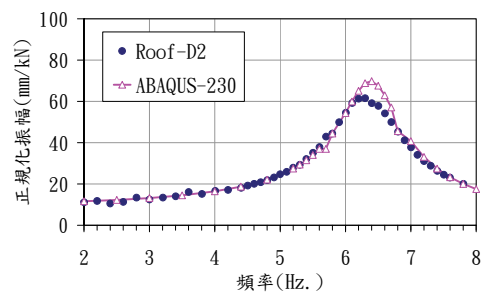
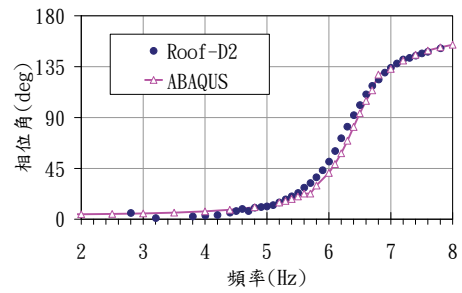


圖 14 FVT-2 完整分析模型



(a) 正規化振幅



(b) 相位角

圖 15 FVT-2 完整分析結果與比較

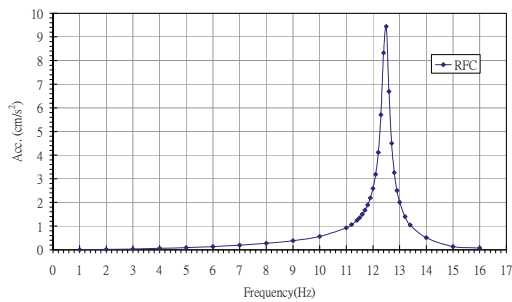
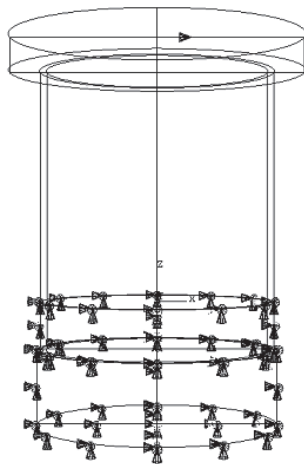


圖 13 FVT-2 條件下剛性基盤分析結果