

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高鐵行車引致台南科學園區地盤等振度圖模擬及高科技廠 房結構試驗與分析二

計畫類別： 個別型計畫

計畫編號： NSC91-2745-P-002-001-

執行期間： 91 年 09 月 16 日至 93 年 03 月 15 日

執行單位： 國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人： 陳正興

共同主持人： 李洋傑

報告類型： 完整報告

處理方式： 本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 9 月 9 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高鐵行車引致台南科學園區地盤等振度圖模擬及高科技廠房結構振動試驗與分析(二)

Contour of Ground Vibrations Induced by HSR Train Passing TSIP
and Vibration Test and Analysis for High-Tech Factory (II)

計畫編號：NSC 91-2745-P-002-001

執行期限：91 年 9 月 16 日至 93 年 3 月 15 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

興建中之台灣高速鐵路路線將穿越台南科學園區，高鐵列車高速行駛所引起之振動能量，傳遞進入園區地盤，經初步評估園區內部分區域之素地振動值超出高科技廠房之基地設置標準，變成國科會亟待解決之問題。

由於一般高科技廠房在結構設計上採用比傳統結構規格要高許多的防震設計，也因此高科技廠房結構對於素地振動值將會有相當程度之修飾作用，如果園區內素地振動值與高科技廠房內生產樓層地板振動值之轉換關係沒有進一步釐清，則園區內高科技廠房生產受高鐵行車振動之影響便缺乏可靠的評估。

本計畫將延續【高鐵行經南科園區引致振動分析】計畫，對高鐵行車所引致園區地盤振動與高科技廠房結構之振動，做一全面的分析與試驗。數值模擬分析方面屬於計畫(一)的部份，此一分析將涵蓋台南科學園區距離高鐵路線 800 米內的地盤，台灣高速鐵路穿越園區路段之不同高架橋結構型式將全部納入數值模型中，尤其是高速鐵路鋼軌所引致高架橋相鄰跨間的互制作用也將做最接近現況的模擬，完成在關鍵低頻範圍 (2 ~ 12.5 Hz) 之全園

區素地等振度圖模擬，以及高科技廠房之數值模擬震動分析。

對於計畫(二)的部分則為現地振動試驗與分析。現地試驗部分為利用南部科學園區之晶圓廠房實體結構進行廠房結構微動量測、重型卡車行車振動試驗、強迫振動試驗，藉以評估晶圓廠房實體結構之振動特性及其受各種震源作用之振動情形及減震效應，作為晶圓廠房結構設計及設置減震措施之參考。

關鍵詞：高速鐵路、振動試驗、高科技廠房結構

Abstract

The constructed Taiwan High Speed Rail (THSR) passes through the Tainan Science-based Industry Park (TSIP). According to the analytical predictions made by the ICEC and NCREE, the ground vibrations induced by the future operation of the THSR will exceed the vibration criteria of the high-tech fabs inside the TSIP. Therefore, the vibration problem becomes a very important issue for the development of the TSIP.

The structure of the fab is usually very huge and stiff. When the vibrations propagate from the ground into the fab, the foundation and structure has the effects to modify the

amplitude as well as the phase of the vibrations. In order to accurately predict the influence of the ground vibrations to the production floor, it has to clarify the effects of modification by the foundation and structure.

In order to solve this problem, two parallel projects are conducted, the numerical analysis and the in-situ vibration test. The former, called Project I, is aimed to predict the ground vibrations induced by the THSR and to do the soil-structure analysis for the fab and the foundation soils. The latter, called Project II, is to conduct the in-situ vibrational tests to measure the vibrational characteristics of the fab structure and the ground, as well as the decay of vibrations from the ground to the structure.

This project is the Project II. The in-situ tests were conducted at a Fab inside the TSIP. The tests include the ambient measurements, the traffic-induced vibration tests and the shaker-induced vibration tests. Test results obtained can be used to deduce the dynamic characteristics of the fab structure, and the decay of vibrations from the ground into the structure. Those information are the key issue to accurately assess the vibration of the fab influenced by external excitation sources, and can be used for the design of the vibration reduction countermeasures.

Keywords: High Speed Rail, vibration test, high-tech fab.

二、緣由與目的

台灣的高科技產業日益精進，已發展成為台灣最重要的經濟產業，而晶圓廠之晶片生產製程對環境振動之要求很高，目前 0.13 微米晶片製程之振動要求為 VCE Curve，將來 0.10 或 0.07 微米製程之要求將更高。對一外在之振動源而言，其振波傳至廠房結構物界面時，因受土壤 - 結構互制作用之影響而產生散射作用，所造成基礎之振動將小於原來素地（自由場）之

振動，而所造成基礎振動將再經廠房結構系統之動力反應放大（或衰減）作用傳至工作平台之基面，此工作平台之振動量才是真正控制生產製程之振動規範。

以往之設廠規範，較注重於素地振動之分析與量測，但對於廠房結構對減低環境振動影響之研究則較少，面對生產製程之振動要求日益嚴格之發展趨勢，實有必要對廠房結構之振動特性作詳細之分析，確實了解其對工作平台可能產生之影響，以作為評估工作平台振動量之基本資料，並可進一步研究各種可能之改善措施，有效控制工作平台之振動量。

目前在南部科學園區內已興建有相當多之廠房，正是從事現地實體結構試驗之最好時機，若能規劃完整而周詳之試驗計畫，則可把握此時機從基礎了解到整個廠房結構之動力特性，作為未來建廠之重要參考資料。此種機會非常難得，可針對實際晶圓廠房結構從事數值模擬分析與現地實體結構試驗之研究，藉由分析與試驗之交互驗證，突破以往研究之盲點，使獲得最完整之研究成果。

本研究總計畫包括數值模擬分析與現地實體結構試驗兩部份，本計畫(二)屬現地實體結構試驗部份，計畫於南部科學園區內之廠房結構作試驗，從事最完整、最周詳之試驗，以獲得最有價值之實體試驗資料。

三、結果與討論

1. 試驗內容

本計畫所規劃之現地廠房振動試驗配置如圖 1 所示，在廠房之三樓版中心位置附近裝設 MK-4600 激振器，如圖 1 之紅色符號所示，而振動量測系統則包含二套系統，分別為：

(a).SPC-51 系統：在廠房北側與南科北路中間處設立五個測站，共裝設 15 個 VSE-15D 速度型感測計，連接於 SPC-51 集錄系統，如圖 1 之藍色符號所示。

(b). μ -Musycs 系統：在廠房 1F, 2F, 3F 與 4F 設立十四個測站，共裝設 34 個 VSE-15A 速度型感測計，全部感測計均連線至設立於三樓版中心位置附近之 μ -Musycs 集錄系統，如圖 1 之綠色符號所示。

利用上述所設之系統，依序進行下列各項試驗：

(1). 微動量測

利用所有感測計（共 49 只）量測全廠房與周圍地盤之微動資料，藉由此項之量測結果，分析廠房各振動模態之特徵頻率，掌握其對外在不同頻率震源振動之反應特性與敏感性。另可同時量測得素地之微動資料，將其與廠房各樓層之微動資料作比較，可知廠房對素地微動之減振效應。

(2). 重型卡車行車振動試驗

此項試驗為利用重型卡車行駛於廠房周圍之道路以激發廠房之振動。試驗前首先於南科園區道路上廠房旁路段之路面設置一系列之橡膠減速墊，如圖 2 與 3 所示，共計 26 道，每道間距為 4.5 公尺，總長為 112.5 公尺。然後於離峰時間進行交通管制，安排重型之載重卡車於南科北路上以各種速率行駛，卡車於通過每道橡膠減速墊即產生跳動，行經一系列之減速墊即可產生近乎等速移動之週期振動，藉以激發附近地盤與廠房結構物之振動，此時利用所有佈設於廠區周圍以及廠房內各樓層之感測計（共 49 只）量測行車所引致之振動，包含在廠房各樓層之振動、

廠房外素地之振動，藉由此項之量測結果，可分析廠房各樓層與周圍素地受不同頻率行車振動之影響，以及振動由地盤傳入廠房結構物各樓層之衰減或放大特性，。

(3). 強迫振動試驗

利用夜間或施工停工時間，啟動設於三樓之 MK-4600 激振器，使廠房產生單頻之穩態振動，記錄各樓層測站位置之振動反應，藉以分析廠房各振動模態之特徵頻率，同時建立其動態反應函數，並與數值模擬分析作相互驗證，此動態反應函數可作為預測廠房對各種不同震源所引致振動之根據。

2. 分析方法

對於三種試驗所量得各測點之記錄，資料處理方法如下：

(1). 對於微動量測與重型卡車行車振動試驗

速度頻譜之計算以三分之一倍頻寬(1/3 Octave)之速度平方之平均方根值 RMS(Root Mean Square)為準，實際採用之中心頻率與其上下限係根據 ANSI S1. 6-1984 所訂之標準值，如表三所示。1/3 倍頻頻帶頻譜(One-Third-Octave-Banded RMS Amplitude Spectra)係以分貝(dB)表示 RMS 速度振動量。其計算步驟簡述如次：

若量測所得之速度反應歷時為 $v(t)$ ，先將其經由傅利葉轉換求得傅氏譜振幅 $V(f)$ ，則其單邊功率頻譜密度函數(Power Spectrum Density Function) $S(f)$ 可由下式求得：

$$S(f) = \frac{2|V(f)|^2}{T} \quad (1)$$

其中 T 為速度歷時之等效穩態延時 T_{eff} ，需注意的是 T_{eff} 應包含實際有效振動之延

時，並不包含快速傅利葉轉換時所補之零。對應中心頻率為 f_i 之 $1/3$ 倍頻帶內之振動含量為：

$$E(f_i) = \int_{f_i^l}^{f_i^u} S(f) df \quad (2)$$

上式中 f_i^l 與 f_i^u 為對應於中心頻率為 f_i 之上下限頻率。在每一頻寬內，速度振動量之均方根值(RMS) $\sigma(f_i)$ 為

$$\sigma(f_i) = \sqrt{E(f_i)} \quad (3)$$

再由下式可計算相對於參考速度 v_0 之振動分貝(dB)值為 $L(f_i)$ ：

$$L(f_i) = 20 \cdot \log_{10} \frac{\sigma(f_i)}{v_0} \quad (4)$$

上式中 v_0 為參考速度，本計劃所用之 $v_0 = 10^{-6} \text{ in/sec}$ ，為晶圓廠振動規範常用之標準參考值。

(2). 對於強迫振動試驗

每一試驗頻率之歷時記錄作濾波處理，濾波範圍取 $0.5 \sim 30 \text{ Hz}$ ，令所得速度歷時記錄為 $v(t)$ 。若該試驗之振動頻率為 f_k ，週期為 T ，選取其中 N 個週期長度之記錄，計算對應於該試驗頻率之富氏級數係數，所得即為振動振幅，其計算式為

$$A(f_k) = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} v(t) e^{-2\pi i f_k t} dt \quad (5)$$

因此對應於試驗頻率之穩態振動歷時可表為 $\bar{v}(t) = A(f_k) e^{2\pi i f_k t}$

針對各試驗振動頻率，其振動量以速度平方之平均方根值 RMS (Root Mean Square) 為準，以分貝(dB)表示，其計算式為

$$V_{RMS}(f_k) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \bar{v}(t)^2 dt} \quad (6)$$

$$L(f_k) = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_{RMS}(f_k)}{v_0} \quad (7)$$

上式中 v_0 為參考速度，亦取晶圓廠振動規範常用之標準參考值，即 $v_0 = 2.54 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 。

3. 試驗結果

(3.2)

(1). 微動量測

本試驗所佈設之感測計共 54 只，能量測到廠房與周圍地盤之微動資料。以下舉出廠房外素地 1(簡稱為 FF1)、廠房一樓版中央位置(簡稱為 1FC)與三樓版中央位置(簡稱為 3FC)三處之微動量測結果如圖 4、5 與 6 所示，由三圖之比較可知：

在 NS 方向上，FF1 在各振動頻率下大都低於 40dB；在 1FC 皆高於 50dB，頻率在 16Hz 以上則介於 60dB~80dB，其中在 63Hz 高達 93dB；而 3FC 除在 20Hz、40Hz 以及 63Hz 約在 40dB 左右外，其餘頻率情形皆低於 40dB。

在 WE 方向上，FF1 除了在 3.15Hz 以及 16Hz 左右有略大於 40dB 的情形外，其餘皆低於 40dB；在 1FC 則在 5Hz、10Hz 以及 20Hz 之後大於 40dB，在 63Hz 時高達 64dB；在 3FC 則除了 40Hz 以上頻率作用時會有稍微大於 40dB 的情形外，在較低頻率時皆在 30dB 附近。

在鉛垂方向上，在 2Hz~16Hz 間，振動約在 40dB~50dB，其餘頻率皆低於 40dB；在 1FC，除了在 63Hz 時有高達 70dB 之尖峰值外，其餘頻率下主要介於 30dB~50dB 之間；在 3FC 除了在 20Hz、40Hz 以及 63Hz 有 50dB 左右的振幅外，其餘皆介於 30dB~40dB 之間。

比較三處之振動，除一樓樓版在 NS 方向有較大之振動外(可能係受廠房內機械設備之運轉影響)，三位置各方向之

振動值在頻率 40Hz 以下均小於 40dB,且在 3FC 之水平向以及鉛垂方向之振動均小於一樓樓版之振動,而一樓樓版之振動又略小於廠房外素地之振動,顯見廠房結構具有部份之減振效果;至於在頻率 40Hz 以上時,廠房結構內之一樓樓版與三樓樓版具有較廠房外素地略大之振動,應係受廠房內機械設備及電流之影響。

(2). 重型卡車行車振動試驗

此項試驗為本計劃最重要之試驗項目,結果最具有價值。本試驗所用之載重卡車之總重為 22 噸,試驗時之行車速率為 35km、45km、50km、60km、70km 與 80km,每種速率行駛 1 或 2 次,視記錄結果而定。由各種行車速率之量測結果顯示,以行車速率為 50km 時之效果最好,此時所引致之振動主要為 3Hz 之振動,可引致結構物產生最大之振動。以下舉出車速為 50km 之試驗結果作比較分析,選取的紀錄為素地 1(簡稱 FF1)、廠房之一、二、三與四樓版中央位置(分別簡稱為 1FC、2FC、3FC 與 4FC)之振動量測結果作分析,比較結果如圖 7、8 與 9 所示。

由圖 7 素地之振動歷時記錄可知,本試驗載重卡車行駛確能引致地盤產生相當大之振動,其中最主要為鉛垂向之振動,車行橫向(WE)之振動次之,而平行車行方向(NS)之振動最小。由圖 8 廠房結構各樓層之振動可知,鉛垂向之振動由一樓樓版往三樓樓版逐漸減小,但兩水平方向之振動卻由一樓樓版往二、三與四樓版逐層增加,尤其是廠房結構之短向(即 WE 向)具有更明顯之放大作用,因四樓為鋼構,其振動量有非常大之放大作用。由廠房結構 WE 向之

振動歷時記錄,可明顯看出廠房結構已達共振之現象,顯示廠房結構短向之自然振動頻率為 3Hz,此點可由圖 9 各樓層振動之富氏譜得到驗證,各樓層 WE 向之富氏譜在頻率為 3Hz 時有單一之尖峰值,且隨樓層之增加而振動加大,結構放大作用非常明顯。

此外,由圖 9 比較素地與一樓樓振動之富氏譜,可明顯看出在水平 WE 向以及鉛垂方向之振動,一樓樓版之振動均小於素地之振動量,表示基礎版具有明顯之減振效果。

(3). 強迫振動試驗

強迫振動試驗為利用設於三樓版中央位置處之 MK-4600 激振器,使廠房產生單頻之穩態振動,記錄各樓層測站位置之振動反應,試驗之頻率範圍為 2~10Hz。分析試驗結果顯示,僅激振器周圍之樓版產生較顯著之振動,而其他位置之振動則相對很小,此乃由所用激振器之能量有限,其最大水平出力僅 10 噸,因此沒有辦法激起整箇樓版之振動。以下舉出三樓版中央位置(簡稱為 3FC)與三樓版東北角位置(簡稱為 3FNE)二處在試驗頻率分別為 3Hz 與 6Hz 時之振動量測結果比較如圖 10 與 11 所示。由二圖之比較可知,不論在 3Hz 或是 6Hz 頻率作用下,3FC 在各方向之反應皆遠大於 3FNE。另外值得一提的,圖上顯示其在 WE 方向上之振幅差距最大,表示該方向為激振器之出力方向,約為 5~10 倍,表示 MK-4600 激振器僅能激起三樓樓版在激振器周產生局部明顯之振動。

四、結論

1. 水平向強迫振動試驗中,顯示激振器僅能激起三樓樓版在激振器周產生局部明顯

之振動，在主要出力方向上，不論在任何頻率作用下，所激起三樓版中央位置之振動反應皆大三樓版四個角落位置之振動。

2. 由微動量測之結果可知，廠房外素地與廠房結構各樓層版之振動值在頻率 40Hz 以下均小於 40dB，且三樓樓版之振動小於一樓樓版之振動，而一樓樓版之振動又略小於廠房外素地之振動，顯見廠房結構具有部份之減振效果；至於在頻率 40Hz 以上時，廠房結構內之一樓樓版與三樓樓版具有較廠房外素地略大之振動，應係受廠房內機械設備及電流之影響。
3. 由重型卡車行車振動試驗之結果可知，本試驗載重卡車行駛確能引致地盤與廠房結構產生相當大之振動。比較素地與一樓樓版之振動，可明顯看出一樓樓版之振動均小於素地之振動量，表示基礎版具有明顯之減振效果。
4. 由重型卡車行車振動試驗所引致廠房結

構各樓層所產生之振動量測結果可知，鉛垂方向之振動由一樓樓版往三樓樓版逐漸減小，但兩水平方向之振動卻由一樓樓版往二、三與四樓版逐層增加，具有放大作用，尤其是廠房結構之主要自然頻率方向，將具有更明顯之放大作用，此為振動評估時必須特別注意之事項。

五、參考文獻

1. 行政院科技顧問組(2001)，「高鐵南科振動問題評估專案報告」。
2. 中鼎公司與美國ICE公司(1999)，「台灣高鐵計畫南科振動影響評估及對策研擬工作成果報告」。
3. 林聰悟、陳正興、李洋傑(2000)，「高鐵行經南科園區振動研究 - 高架橋基礎與連續基礎之減振效果評估」，國科會專題研究。
4. 中華顧問工程司(2001)，「南科園區橋梁基礎實體模型試驗計畫」。

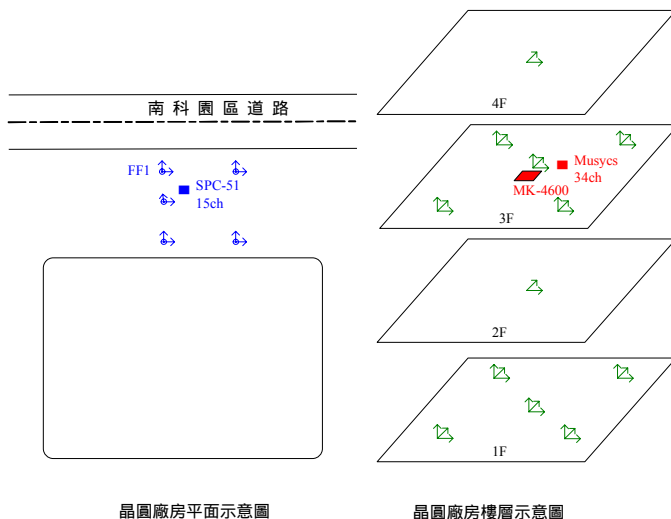


圖 1 廠房試驗配置圖



圖 2 卡車行車振動試驗位置圖



圖 3 卡車行經一系列橡膠減速墊之情形

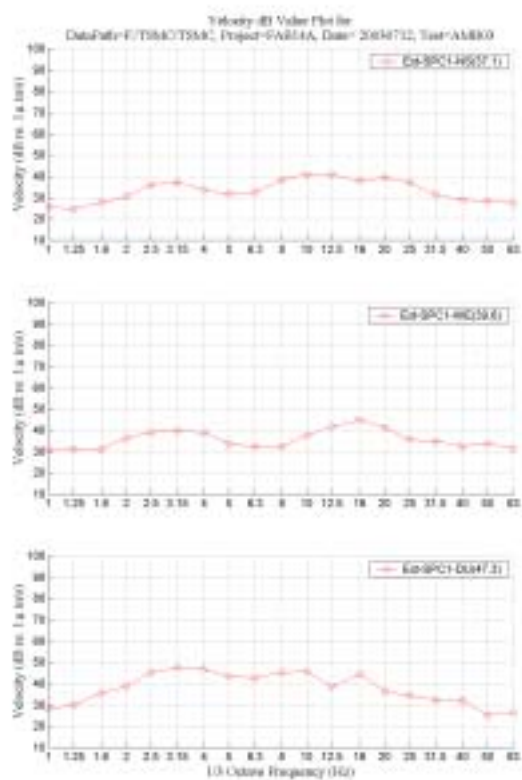


圖 4 素地 1(FF1)位置之環境微動

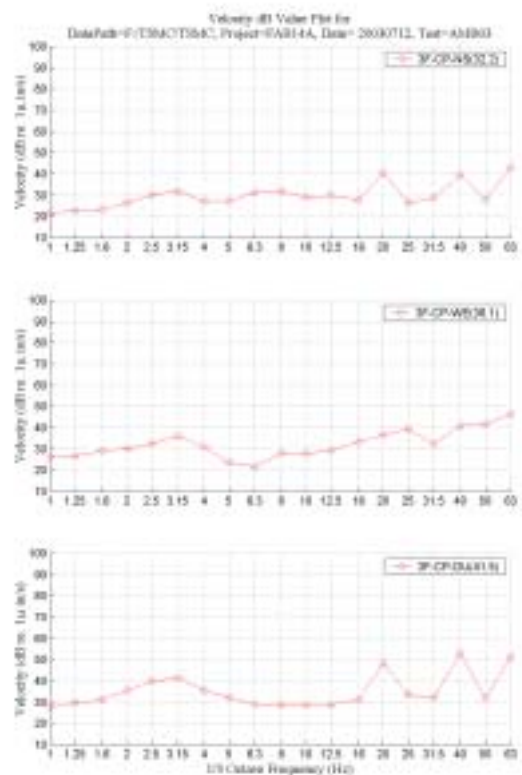


圖 6 三樓版中央(3FC)位置之微動

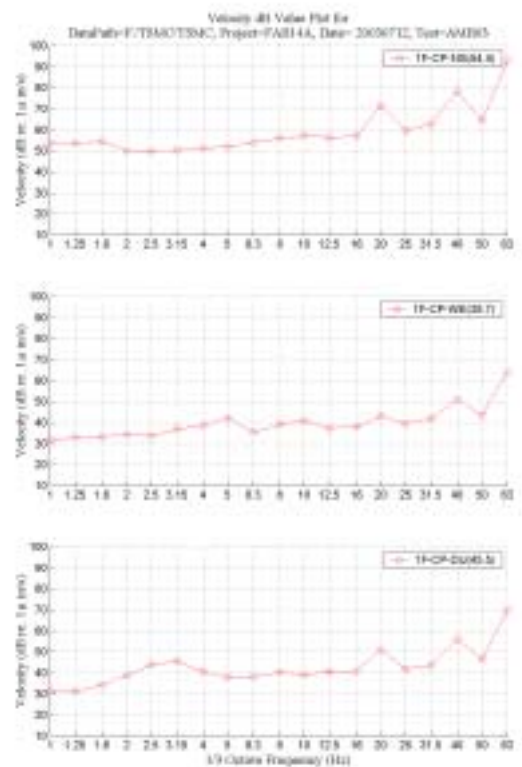


圖 5 一樓版中央(1FC)位置之微動

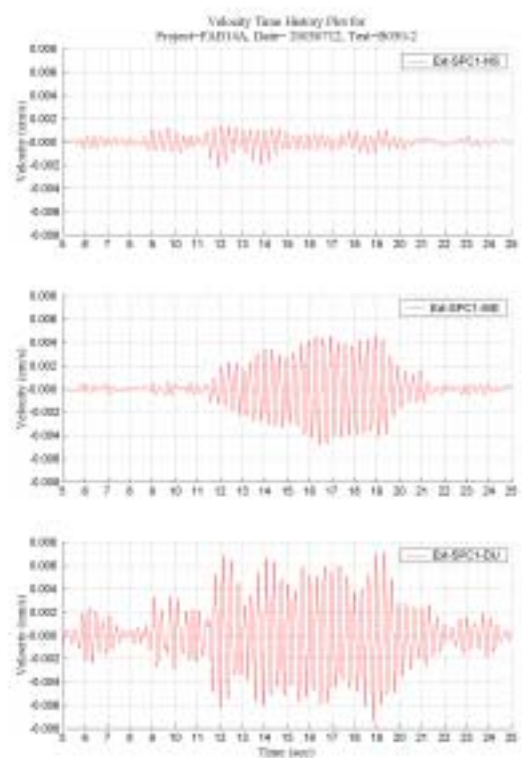


圖 7 素地之振動歷時記錄(行車速度 50km)

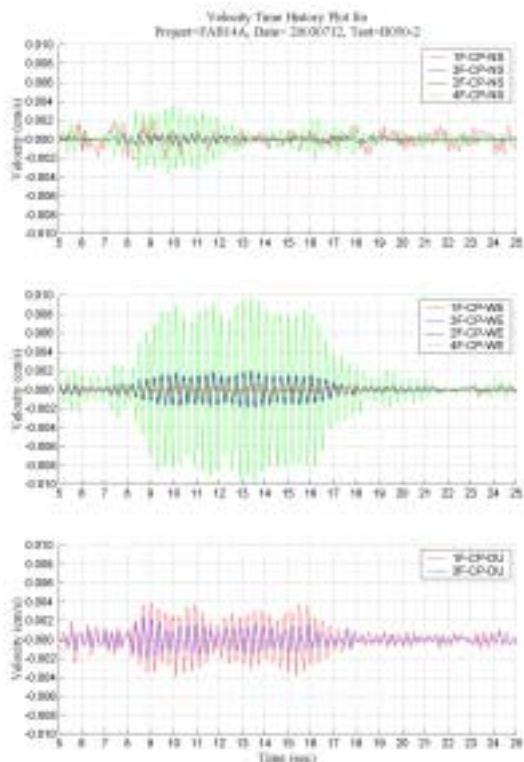


圖 8 各樓層之振動歷時(行車速度 50km)

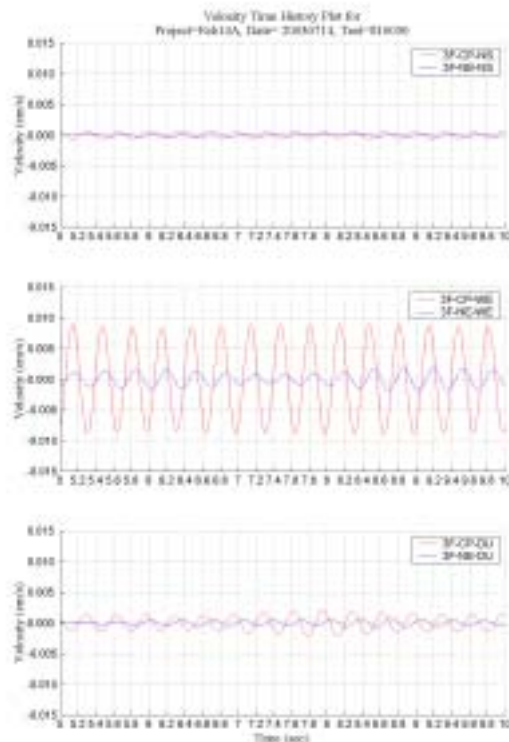


圖 10 強迫振動試驗 3FC 與 3FNE 位置之振動比較(振動頻率 3Hz)

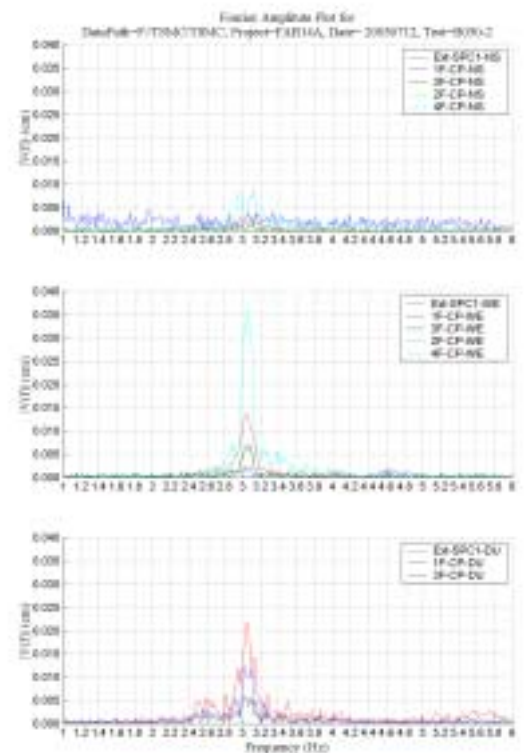


圖 9 廠房各樓層與素地 1(FF1)振動富氏譜之比較(行車速度 50km)

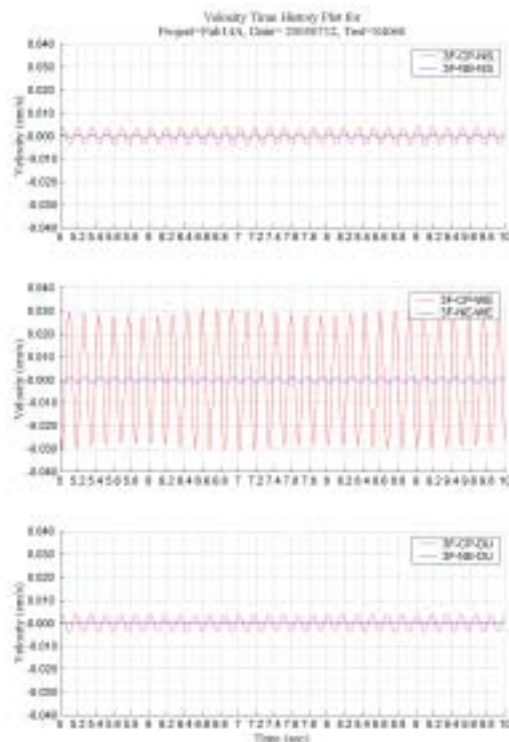


圖 11 強迫振動試驗 3FC 與 3FNE 位置之振動比較(振動頻率 6Hz)