

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※

※ 移動車輛所造成之結構振動 ※

※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

計畫類別：個別型計畫    整合型計畫  
計畫編號：NSC 89-2211-E-002-122  
執行期間：89年8月1日至90年7月31日

計畫主持人：楊永斌 教授

- 本成果報告包括以下應繳交之附件：
- 赴國外出差或研習心得報告一份
  - 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
  - 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
  - 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學土木工程學系

中華民國 91 年 1 月 12 日

# 移動車輛所造成之結構振動

計畫編號：NSC 89-2211-E-002-122

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：楊永斌 國立台灣大學土木工程系

## 一、中文摘要

本計畫案針對移動車輛所造成的結構振動進行研究，共有二個主題：一為高速列車-軌道橋梁之互制振動，另外則為飛機-跑道互制振動。在第一個主題，利用動態濃縮的技巧，將車輛自由度濃縮至接觸鋼軌元素自由度中，建立車-軌互制(VRI)元素，以求解耦合的列車-鋼軌-橋梁系統方程式；利用所建立的 VRI 元素與分析程序，探討高速列車與軌道橋梁在不同系統參數下之動態反應。在第二個主題方面，利用三個自由度之剛性懸浮系統來表示飛機，跑道結構則以 Mindlin-Heterosis 厚板元素來模擬，同樣採用動態濃縮的方式，導得飛機-跑道互制(ARI)元素，接著利用這個元素，分析飛機在降落、滑行及起飛階段之機身與跑道板之動態行為，並探討不同飛機及跑道參數性值對飛機-跑道互制行為之影響。

關鍵詞：高速列車、橋梁、軌道、動態濃縮、車-軌互制元素、飛機、跑道、飛機-跑道互制元素

## Abstract

This project is aimed at investigating the structural vibrations caused by moving vehicles, which contains two major subjects: one is the vibration of the high-speed train-tracked bridge system and the other is the vibration of the airplane-runway system. In the first subject, the degrees of freedom of the vehicle were condensed into those of the rail element in contact by using the dynamic condensation technique, which results in the the vehicle-rail interaction (VRI) element. The VRI element derived was then employed

to analyze the dynamic responses of the high speed train and the tracked bridge under various system parameters. In the second subject, the airplane was modeled by using a three-degree-of-freedom rigid suspended mass system and the runway structure by using the Mindlin-Heterosis thick plate element. The airplane-runway interaction (ARI) element was developed through use of the dynamic condensation method. The VRI element was then used to study the dynamic behaviors of the airplane and runway during the landing, taxiing run and take-off stages. The influence of various system parameters on the interactions of the airplane-runway system was also investigated.

Keywords: high speed train, bridge, track, dynamic condensation, vehicle-rail interaction element, airplane, runway, airplane-runway interaction element

## 二、緣由與目的

本計畫案主要探討移動車輛所造成的結構振動問題，廣義來說，「車輛」可以是一般常見的汽車、卡車、列車(普通、高速及磁浮)，甚至是飛機等交通工具，至於「支承結構」則可能是橋梁、導軌、鋪面、停車塔、土堤乃至於機場跑道等，由於這些結構在所支承的移動車輛作用下會產生振動，可能造成結構的功能及服務性大打折扣，甚至造成破壞。

隨著國內高速鐵路及捷運系統的興建，上述移動車輛(列車與輕軌電車)與支承結構(橋梁與軌道系統)間之動力互制問題益發顯得重要，直接影響到未來營運成效的好壞，以往國內對這方面的研究並不多

見，因此值得投入心力加以探討，所得結果也可提供相關機構與工程界參考。另外，由於飛機與跑道間的互制振動問題將影響到飛機結構之安全性及乘客的舒適度，文獻上相關的研究極為罕見，故本計畫第二部分即嘗試針對這個問題做初步的研究。

### 三、研究內容

本計畫包含高速列車-軌道橋梁互制振動與飛機-跑道互制振動二部分，茲分述如下：

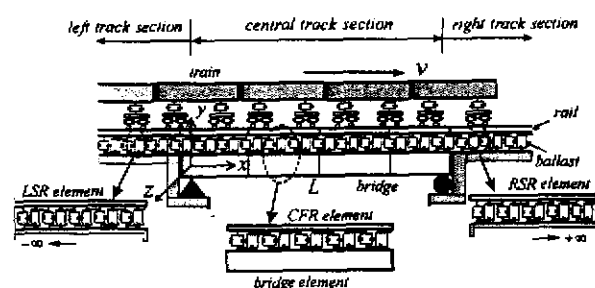
#### 1. 高速列車-軌道橋梁互制振動

考慮具有 15 節 Manchester 標準車廂[1]之列車，將列車視為多部序列移動車輛的組合，其中每部車輛由一個車體、二個轉向架(台車)及四個車輪所組成，如圖一所示，共有 10 個自由度。軌道系統包括了二根鋼軌、軌枕及道碴等三部分，其中鋼軌為 UIC 60、連續焊接之型式，假設為無限長，軌枕由混凝土製成，不考慮其效應，但其質量計入鋼軌質量之中，道碴以均佈之彈簧-阻尼器單元來模擬，其質量則計入橋梁質量之中，如此軌道結構即簡化成了一個黏彈性支承鋼軌系統(圖一)。橋梁為簡支型式，具有相等斷面及均勻性質，以一簡支直梁來模擬。

當列車車輛在橋上行駛時，車輛的重量及動力效應作用於橋梁使橋梁產生變形，而橋梁的變形又反過來進一步造成車輛的變形，二者間明顯存在互制作用，另一方面，鋼軌與橋梁間因道碴的連繫作用，彼此間也有互制，因此形成了所謂車輛-鋼軌-橋梁互制 (Vehicle-Rail-Bridge Interaction, 簡稱 VRBI) 系統，其中由於互制的關係，車輛、鋼軌及橋梁的方程式彼此間為耦合的(coupled)。在本研究中將車輛及鋼軌-橋梁二部分分開考慮，視為二個獨立的子結構，分別以多剛體動力及有限元素二種方式進行分析，其中無限長鋼軌根據不同區段，即橋梁、左路堤或右路堤段(圖一)，分別以中央有限(Central Finite Rail, CFR)、左側半無限(Left Semi-infinite Rail, LSR)及右側半無限(Right

Semi-infinite Rail, RSR)等三種鋼軌元素來模擬，而橋梁則以一般直梁元素來模擬。

為有效求解上述 VRBI 系統之耦合方程式，利用吳和楊[2]所提出之動態濃縮程序，先將二個子結構間之接觸(互制)力表示成車輪反應的函數，再利用車輪與鋼軌接觸點間之束制關係，進一步將接觸力表示成鋼軌接觸點反應的函數，再根據內插位移場之觀念，將車輛自由度全部濃縮至對應(接觸)之鋼軌元素中，建立車-軌-橋互制 (VRBI) 元素；利用這種元素，建立濃縮後之鋼軌-橋梁運動方程式，求解得到鋼軌與橋梁之反應，代回相關式子求得車輛之反應。最後，利用所建立的分析模型與程序進行參數分析，探討不同系統參數對列車及橋梁反應之影響。

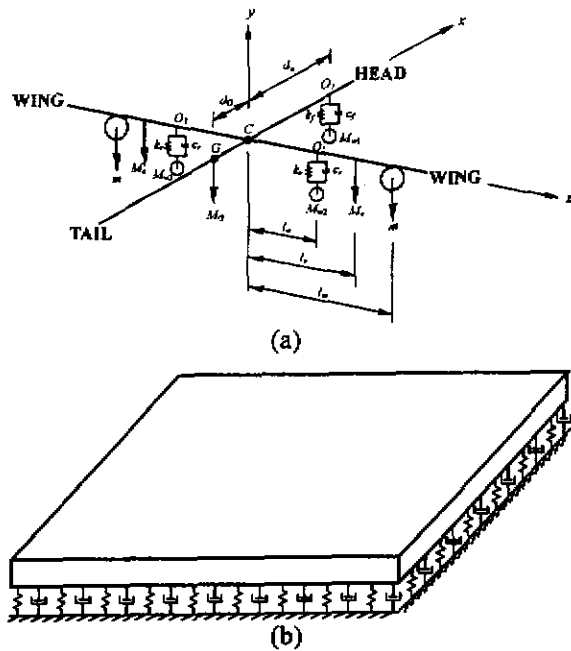


圖一 列車、軌道與橋梁結構示意圖

#### 2. 飛機-跑道橋梁互制振動

將飛機模擬成具有三個輪子之懸浮質量體，具有垂直、翻滾及俯仰等三個自由度，如圖二(a)所示，機翼及引擎的質量亦加以考慮，機輪以黏彈性模型來表示，以模擬輪胎的變形與吸能特性；跑道簡化成多個簡支黏彈性支承板，可考慮土壤之效應，如圖二(b)所示，其中每個簡支板以 Mindlin-Heterosis 厚板元素來模擬，可準確求得跑道(須視為厚板)之反應。利用先前發展出之動態濃縮程序[3]，將飛機自由度濃縮至對應之板元素中，建立所謂飛機-跑道互制 (ARI) 元素，最後加以求解。利用這個程序，分析飛機滑行、起飛及降落時之飛機及跑道反應，在起飛過程中，飛機加速至起飛速度後，由三輪接觸變為二輪接觸，然後起飛，而在降落時，飛機先以二輪接觸然後再三輪接觸，最後以三輪減速

滑行至停止；在分析這些行為時，飛機與跑道之接觸點隨不同階段而有所不同，較一般車-橋互制問題困難許多，但拜先前所發展的多元動態濃縮法之賜，這些問題可輕易加以解決，程式亦只須局部修改即可；另外，在降落瞬間機輪與跑道間會產生很大的衝擊效應，這裡假設機輪與跑道接觸瞬間，機輪因衝擊效應產生一向上之加速度，其大小由接觸瞬間機輪之動量來決定，而跑道則因此動量作用而產生一初始的變形狀態。根據影響飛機與跑道之參數進行參數分析，瞭解各參數對系統行為之影響大小，可作為飛機及跑道維修與設計之參考。



圖二 (a)飛機模型；(b)跑道模型

#### 四、結論

上述二部分研究所獲得的結論分別敘述如下：

##### 1. 高速列車-軌道橋梁互制振動

(1)列車與橋梁間會發生共振行為，分析所得共振速度符合理論預測結果；(2)軌道存在會加重列車與軌道的振動，特別是鋼軌加速度反應，因此分析時須考慮軌道效應，否則會低估鋼軌與列車之反應；(3)不

平整度愈高，列車反應愈大，且隨速度增加而更加明顯，但會逐漸趨於一穩定值；(4)車廂質量對於橋梁衝擊係數影響不大，對列車最大加速度反應則有些微的影響，且質量愈小反應愈大；(5)道碴勁度對列車反應之影響較大，對橋梁反應相對較小，道碴勁度愈小，列車及橋梁反應愈大，並且隨列車速度增加而愈加明顯。

##### 2. 飛機-跑道橋梁互制振動

(1)在滑行的過程中，飛機的垂直反應由於懸吊系統及輪胎的阻尼效應而逐漸減少；(2)在起飛第一階段，因前輪離地造成後二輪接觸力大增，跑道反應也大為增加；(3)在飛機降落過程中，機身及跑道因衝擊效應而產生瞬間劇烈振動，引致相當高的加速度反應，當前輪著地時，機身反應會有一明顯的峰值出現；(4)增加跑道厚度、基礎土壤勁度、輪胎及懸吊系統的阻尼，可有效降低飛機反應，改善乘客舒適度；(5)增加輪胎、懸吊系統的勁度以及飛機速度，將使飛機的反應明顯增加，造成舒適度降低以及機上精密儀器可能的損壞。

#### 五、研究結果自評

本計畫執行的進度與成果符合預期之目標，而研究所得之結果，也使我們對高速列車-軌道橋梁及飛機-跑道系統之振動特性有了深入的了解，可供未來高速鐵路、捷運及飛機營運維修等方面的參考。部份結果已發表於相關研討會[4]及期刊[5]，其他部分也將陸續加以發表。另外，本計畫案也產生出一本碩士論文，如文獻[6]所示。

#### 六、參考文獻

1. Iwnick, S., "Manchester benchmarks for rail vehicle simulation," *Vehicle Sys. Dyn.*, 30, 1998, 295-313.
2. 吳演聲、楊永斌，"動態濃縮法在列車橋梁互制問題上之應用與參數分析"，八十八年電子計算機於土木水利工程應用研討會論文集(一)，中興大學，台中市，中華民國八十九年二月，37-44 頁。
3. Yang, Y. B., and Wu, Y. S., "A versatile