

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

車輛與結構之互制振動(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-002-054-

執行期間：91年08月01日至92年07月31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：楊永斌

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫期中進度報告

車輛與結構之互制振動研究 (2/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-018

執行期間： 91年08月01日至 92年07月31日

計畫主持人： 楊永斌 教授

E-mail: ybyang@ntu.edu.tw

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 92 年 5 月 20
日

車輛與結構之互制振動研究 (2/3)

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-018

執行期間： 91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

主持人：楊永斌 國立台灣大學土木工程系

E-mail: ybyang@ntu.edu.tw

一、中文摘要

車輛與結構之互制振動是一個複雜的力學問題，其原因在於此一問題包含了「橋梁」與「車輛」兩種子結構，而且兩者隨著時間而相互移動。由於兩者都是彈性體，因此在相互移動的過程中，會有能量的相互傳遞，此一現象可以經由兩者間的「接觸力」之變化觀察出。主持人與研究群過去曾進行一系列有關車輛移動問題的研究，不管是理論的解析解，或是數值的分析，都取得了一定的研究成果，發表在不同的國際期刊中。在這三年期的研究案中，吾人主要是就一些過去較少涉及的問題加以探討，基本上雖仍以原計劃的內容為主軸，但在研究過程中，仍免不了因問題之擴大，而稍微調整主題，唯整體而言，仍屬相符若節，在此一報告中，將僅就兩項最突出的成果加以簡述。

關鍵詞：橋樑、地震、彈性支承、有限元素、高速列車、鐵路、車輛、車橋互制元素

Abstract

The interaction dynamics between the bridge and moving vehicles is a complicated problem in that it consists of two subsystems, i.e., the bridge and moving vehicles, and that the two subsystems move with respect to each other. Because the two subsystems are elastic bodies, energies of various forms can be transferred between the two bodies, which can result in variation of the contact forces. In the past decade, the principal investigator and his group have conducted a series of research related to the vehicles moving load problems, including both the analytical and numerical studies. Most of the results have been published in various international journals. In this three-year research project, focus was placed on those subjects not fully covered by previous studies, as outlined in the project proposal. However, it is admitted that in the process of researching, some minor adjustments are unavoidably made on the research items, although the main direction remains basically unchanged. In this report, only two major achievements will be summarized.

Keywords: Bridge, earthquake, elastic bearing, finite element, high speed train, railroad, vehicle, vehicle-bridge interaction.

二、緣由與目的

1964 年日本首次成功的讓子彈列車以每小時 210 公里的速度，通行於東京與大阪之間，從此之後，所謂的高速列車或子彈列車逐漸成為大都會間一項重要的交通工具，緊接著日本之後的是歐洲國家，他們一方面將舊有的鐵路加以提速，一面興建新的鐵路，幾乎將大部分的重要城市，都連結在綿密的高速鐵路網之下。近年來，亞洲的韓國、中國大陸和臺灣，也都急起直追，全力在發展高速鐵路系統。

以臺灣而言，高速鐵路從台北到高雄全長 345 公里，設計最高時速為 350 公里，最高營運時速為 250 至 300 公里。由於受到地形的限制，高速鐵路的結構型式包括高架結構、隧道、路堤與路塹三類，而其中單就「高架橋/橋樑」就佔了 73%，由此可見，高架橋所衍生的問題，在臺灣高鐵的建造中，其重要性應居於首要地位。

1. 列車行駛於橋梁上遭受地震的反應

臺灣地處環太平洋地震帶，地震發生頻繁，在九二一地震的陰影之下，一般社會大眾最常問的問題之一就是：地震來臨時對於行駛於高架橋的高速列車之安全有無影響？會不會出軌？應該如何因應？事實上這是一個高度複雜的力學問題，其原因在於問題本身包含兩個振動源，一個是列車的振動，另一個則是地表的振動，據個人所知，文獻上幾乎找不到相關的研究。

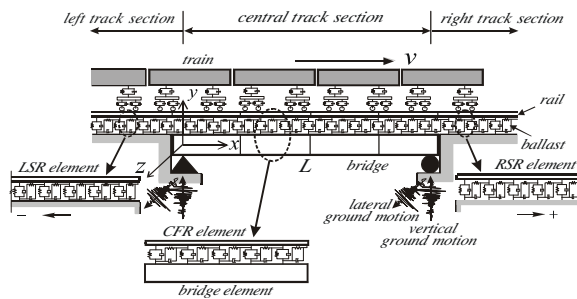


圖 1 車-橋-軌道互制模型

基於上述理由，吾人開始嘗試建立所需的分析模型，將原先所開發的「車-橋互制」(vehicle-bridge interaction)元素(Yang and Yau 1997)

加以擴張，使之能考慮「車-橋-軌道」三者間的互制作用，另外，也為了模擬列車脫軌(derailment)的情況，必須能計算車廂各個輪子的接觸力 (contact force)，我們將「車、橋、軌道」等三部分都以三維幾何結構的方式來加以模擬，如圖 1 所示。

從圖 1 中，可以看出我們考慮了車輛的質量、懸吊系統、軌道、道渣、橋梁，以及土堤的作用，依軌道所在位置之不同而推導了左邊半無限軌道(LSR)元素、右邊半無限軌道(RSR)元素、及中間有限軌道(CFR)元素。此外，為配合國內高鐵的情況，我們假定每座橋梁能同時提供兩組的軌道，供南下與北上列車之用，如圖 2 和圖 3 所示。

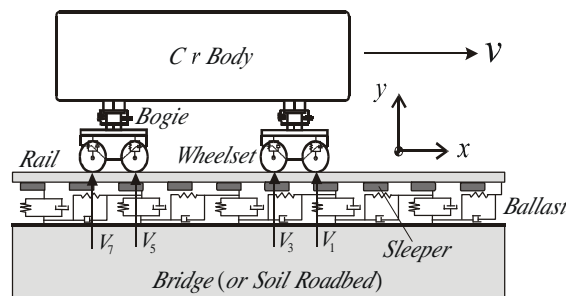
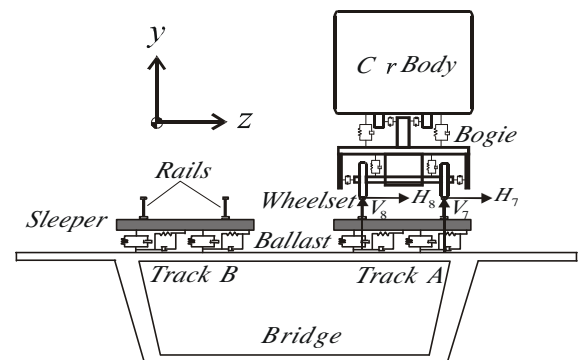


圖 3 高架橋斷面示意圖

圖 2 車橋系統側視圖



從上述二圖也可以看出，本研究假定每個車廂有兩個轉向架(bogie)，每個轉向架下面有四個輪子，這些細部結構都在模型的考慮之內，在歷時分析時，吾人可以計算出每個輪子與軌道間的水平 and 垂直接觸力，這些力量都是在計算車輛脫軌時所必需的。

在進行車橋系統受地震作用時，最重要的是要修改系統的運動方程式，使之考慮移動車輛與地震的雙重作用，根據吾人的推導，此一運動方程式與傳統結構物受震的運動方程式之最大的不同，在於除了必須考慮地表加速度的作用外，也須要考慮地表的位移及速度的作用，詳細的推導已經發表在 Yang and Wu(2002) 一文中，圖 4 示為在九二一地震下（採用 TAP003 的水平力），列車的脫軌潛能圖，圖中顯示了安全(safety)、可能不穩定(possible instability)、和不穩定(instability)三種情況。未來將進一步研究如何利用此等潛能圖，以決定行進中列車遭遇地震時的因應模式，期能將脫軌的可能性降至最低。

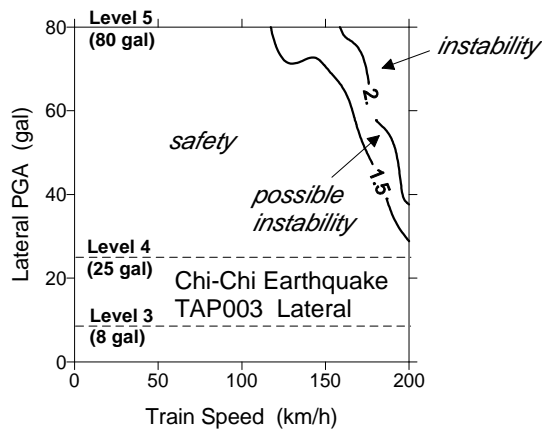


圖 4 列車遭遇地震時的的脫軌潛能圖

2. 彈性支承對列車引起的橋梁反應之影響

我國由於位處地震帶，為了隔震之故，橋梁在設計時，多半在大樑與橋柱之間加上一彈性支承(elastic bearing)，以阻絕由地表傳遞至橋梁的地震力，此種設施經證實在地震中確實有效。然而，基於其「隔絕」的特性，其功能形同過濾器(filter)，因此也會阻絕行進列車的動能之向下傳遞，因此就列車行進時的舒適度(comfort level)以及橋梁的疲勞度(fatigue)及維修觀點而言，是明顯屬於負面的。因此之故，彈性支承是否應該安裝在高速鐵路的橋梁上，在實務上仍然是一個爭議的問題。

為探討彈性支承的效應，吾人曾以彈性梁的第一模態與剛性(rigid)模態的組合，來近似彈性支承梁的動態反應，如圖 5 所示，並由此建立橋梁的衝擊反應公式，詳細的推導請參閱 Yau 等(2001)。

在本計劃中，吾人定義 $\hat{\epsilon}$ 為梁之撓曲勁度對彈性支撐勁度之比值(stiffness ratio)，延續上述採用近似模態的作法，利用解析的模式，建立了彈性支撐梁在系列載重作用下發生共振(resonance)的條件，以及相消(cancellation)的條件，以及勁度比 $\hat{\epsilon}$ 對此二條件的影響。

另外，我們發現只要相消條件存在，那麼共振現象就永遠會被壓制住，利用此一特性，即可建立彈性支承橋梁的最佳設計準則。除此之外，吾人以上述的共振與相消條件，也可成功的解說台鐵鳳山溪橋為何會出現大幅度的振動，圖 6 所示為該橋振動實驗量測值與理論值之比較，從該圖可以完整的解釋共振及相消現象。詳細內容請參見 Yang 等(2003)。

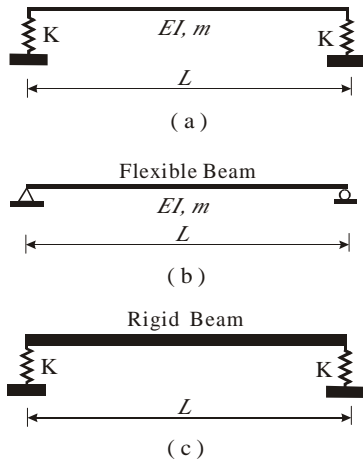


圖 5 彈性支承梁的模態組合

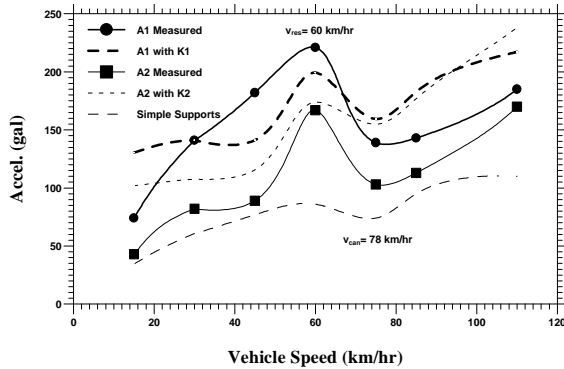


圖 6 鐵路橋的衝擊振動反應

三、結論

本研究所建立的車-橋-軌道互制模型及受震分析理論，提供了一個良好的理論構架，可作為爾後高速列車行進中遭遇地震時，分析脫軌潛能的基礎。

本研究同時以理論模型解說了彈性支承梁共振及相消的機制，藉助於此一機制，吾人可為彈性支承梁得出一最佳化之設計，將橋梁之振幅控制在最低之水準。

四、參考文獻

Yang, Y. B., and Yau, J. D. (1997), "Vehicle-Bridge Interaction Element for Dynamic Analysis," *J. Struct. Eng.*, ASCE, 123(11), 1512-1518. (Errata: 124(4), p. 479)

Yang, Y. B., and Wu, Y. S. (2002), "Dynamic Stability of Trains Moving over Bridges Shaken by Earthquakes," *J. Sound & Vibr.*, 258(1), 65-94.

Yang, Y. B., Lin, C. L., Yau, J. D., and Chang, D. W. (2003), "Mechanism of Resonance and Cancellation for Train-Induced Vibrations on Bridges with

Elastic Bearings,” *J. Sound & Vibr.*, (in print).

Yau, J. D., Wu, Y. S., and Yang, Y. B. (2001), “Impact Response of Bridges with Elastic Bearings to Moving Loads,” *J. Sound & Vibr.*, 248(1), 9-30.