

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

(計畫名稱)

版式軌道自動化應力分析程式之建立與應用(1/2)

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2211-E-032-021-

執行期間：九十一年八月一日至九十二年七月三十一日

計畫主持人：李英豪

共同主持人：

計畫參與人員：顏少棠、劉耀斌

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學土木工程學系

中華民國九十二年五月三十一日

# 版式軌道自動化應力分析程式之建立與應用(1/2)

## Development and Application of Automatic Stress Analysis Program for Slab Track

計畫編號：NSC 91-2211-E-032-021

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：李英豪 淡江大學土木工程學系教授

### 中文摘要

由於版式軌道擁有較優良之結構強度、穩定度與安全性，且其經濟效益遠比傳統道碴軌道高出甚多，因此版式軌道已成為目前世界各國積極的研究對象。本研究首先透過國內外相關文獻之回顧得知版式軌道分析之基本假設與限制，並發現極少有文獻在對版式軌道系統各組成元件複雜反應之敏感度分析，及比較與驗證有限元素解與理論解之間無法銜接所產生的問題方面，從事更深入之研究。因此，本研究之主要目的在以軌道力學之彈性理論分析為基礎，驗證理論分析與有限元素法分析之差異，引進必要之修正因子並確立力學分析程序之完整性，以作為更深入探討版式軌道設計與力學行為之依據。

本研究擬採用 ABAQUS 程式進行三維有限元素模擬分析，研究中將以固體元素、樑元素、彈簧元素、基礎函數，分別模擬混凝土版、鋼軌、彈性扣件與路床等版式軌道的主要元件。本計畫預計分兩年兩期完成，第一期的主要研究重點在探討有限元素分析解與理論解之差異，並利用 Visual Basic 軟體建立一套擁有良好使用者介面，可供建立 ABAQUS 程式之前處理與後處理的自動化分析處理程序之程式，以便於後續對各項版式軌道設計因素進行詳盡之分析。主要工作要項包括：(1)國內外相關研究之文獻蒐集與整理，(2)確立理論分析之程序，(3)探討影響版式軌道力學行為之因素，(4)探討有限元素分析解與理論解之差異，與(5)建立自動化分析程序之程式。本計畫的順利執行將有助於國內學術界對版式軌道的了解，並對於國內之版式軌道設計、維修相關技術得以提昇。本計畫之最終目標在協助提昇我國版式軌道工程相關之基礎與應用科技，以配合國家永續發展之需要。

**關鍵詞：**版式軌道、彈性理論、ABAQUS、有限元素法

### Abstract

Due to the superior structural capacity, stability, safety, as well as economic benefits of slab tracks compared to those of traditional rail-ballast counterparts, slab track systems have become more and more popular in recent railway applications. A review of the-state-of-the-art procedures in track analysis was first conducted and the fundamental assumptions and limitations were identified. In particular, the effects and sensitivity analysis of various design components of slab track systems were rarely investigated in the existing literature and the gaps between theoretical closed-form solutions and finite element solutions are unresolved. Consequently, the main objective of this study is to investigate their theoretical discrepancies, develop stress adjustment factors and analysis procedures based on elastic track theory to account for various practical track conditions more realistically.

The well-known three-dimensional finite element program (ABAQUS) will be adopted in this study. According to earlier literature, various elements will be carefully chosen to simulate different components of the slab track system, i.e., block elements, beam elements, and spring elements will be used to model concrete slabs, rails, and various rail fastenings as well as the subgrade support, respectively. The entire project consists of two Phases (I and II) to be completed within two years. The primary research foci of the Phase I are to investigate the

theoretical discrepancies between available closed-form solutions and finite element solutions as well as to develop a user-friendly interface program as a pre- and post-processor of the ABAQUS program for future slab track analysis. The major tasks include: (1) literature review; (2) derivation and validation of closed-form solutions; (3) effects of various design components; (4) finite element analyses and identification of theoretical discrepancies; and (5) development of a user-friendly interface program. With the successful accomplishment of this project, it is expected that the research findings will be efficiently and widely applied in many more practical railway design and analysis problems. The ultimate goal of this study is to advance the fundamental and applied technologies in slab tracks analysis and design for our country's long-term infrastructure development.

**Keywords :** Slab Track, Elastic Theory, ABAQUS, Finite Element Method

## 一、前言

長久以來鐵路在台灣地區城際間的運輸系統中佔著重要的角色，其重要性非但不隨著公路運輸的活絡而減少，而且隨著運輸需求的增加，國內已積極的投入建設縱貫本島城際間的高速鐵路以因應未來之需要。而隨著台北都會區大眾捷運系統的完工通車與其相關支線工程的延續，以及高雄都會區大眾捷運系統之規劃興建，再加上高速鐵路的停靠站如桃園、新竹、台中、嘉義、台南等地區亦正積極研擬規劃設計之聯外輕軌運輸系統，使得我國的鐵路事業已進入一個嶄新的里程碑，如此更奠定我國在軌道工程方面持續發展之必要性。有鑑於此，近年來在產、官、學三方面的單位積極的投入相關的研究與發展，在國內成立相關的專屬單位、舉辦軌道工程相關的學術研討會、派遣人員赴外訓練、根植國內軌道工程教育與課程，其目的在因應國家永續發展之需要，以奠定我國軌道工程之基礎與技術。由此可彰顯我國對於軌道工程相關基礎發展、應用科技的研發與專業人員的培養之急迫性與重要性。

目前使用的傳統道碴式軌道在列車的重覆載重下易造成承載結構強度變弱，需要以大量的資源與時間來進行密集的維修工作，也由於其軌道承載強度不足而逐漸顯現其缺點。軌道工程的新技術中，版式軌道(Slab Track)是以混凝土版與彈性材料取代傳統軌道之道碴，因而比傳統道碴軌道擁有更佳的強度，在高密度列車的重覆載重下較不易產生變形與破壞，且在穩定度與安全性上都有一定程度的提高，再加上其耐久的結構型式大量的減少維修的頻率，因而降低了列車調度的複雜性與維修經費。根據國外經驗顯示，版式軌道比傳統道碴軌道在經濟效果上更具有良好的收益，目前已被廣泛的應用在軌道工程上。

早期版式軌道的力學是以理想之彈性理論進行分析，藉以求得鋼軌、混凝土版與路基之變形及應力。而實際上版式軌道組成甚為複雜，非理論解可精確地掌握其力學行為。因此，目前軌道之分析與設計絕大多以有限元素法程式來模擬。然而，吾人須知在複雜的版式軌道系統中，影響的因素甚多，再加上各國所設計的版式軌道在配置上各有不同，或有直接以有限元素法之分析結果作為設計之依據的做法，如此尚無明確的分析方式與驗證步驟實有疑慮。

再者目前國內外相關研究中，往往僅能針對特定情況進行分析，其分析結果或許能適用於某特定之情況與參數範圍，若對於考量整體性的反應與更廣泛的分析則仍嫌不足。相關研究針對各組成元件在與版式軌道系統反應的敏感度分析方面，從事更深入之研究亦不多，而且對於如何構建有限元素模型，以確保其正確性與精確性亦沒有明確的結論。再者，在有限元素分析的使用後，因無法與理論解銜接，而捨棄了理論解的應用，其比較與驗證之步驟實有必要加以釐清。因此，對於版式軌道的力學分析方式應以理論解為基礎，再與數值分析之方式加以驗證與整合，以確立其力學原理之完整性，以作為後續擴展更深入研究之依據。

## 二、研究目的

隨著軌道工程相關研究的發展，在理論分析未能滿足設計之需求下，工程人員逐漸以有限元素法程式進行計算來取代理論分析的不足。然而，由於版式軌道系統的結構堪稱複雜，即使是以有限元素法程式進行分析，仍然需要使用諸多假設。而且進行模擬時，分析個案將會因為使用者進行元素切割與模式選擇的不同而造成分析結果的差異。最明顯的問題在於不同的研究個案所採用的分析模式略有不同，其分析結果亦有所差異，研究之間很難可以彼此精確的比較與驗證。而研究人員從單一個案的分析結果來下結論，往往會有以偏概全的問題。所以如何有效且一致的使用有限元素法，來進行版式軌道的力學分析應是重要的關鍵。

因此，本研究之主要目的在於以軌道力學之理論分析為基礎，驗證與銜接理論解與有限元素分析解之間的差距、整合兩者之關係，並藉由因次分析的方式探討最佳有限元素模型的建立，進而更深入探討版式軌道之設計模式與力學行為，判斷各種影響其力學行為之因素，以確立力學分析程序之完整性。在本計畫第一期的主要研究內容包括：(1)以軌道力學之理論解為基礎，發現控制反應之參數，討論理論解與數值分析結果之差異，進而驗證控制參數之重要性。(2)透過一系列嚴整的分析與驗證，比較各種有限元素模擬版式軌道的差異，探討其特性與誤差。以此結果建立有限元素程式使用時，均一系統化的分析程序。(3)整合理論解與有限元素分析之關係，並將其斷層銜接。如此，吾人將可由理論解判斷有限元素分析之正確性。(4)應用自動化分析的概念，使用電腦程式來建立分析模式的自動化流程。(5)進行一系列之參數分析與驗證，藉此判斷各種影響版式軌道力學行為之因素，以確立力學分析程序之完整性。(6)以因次分析的方法整合研究成果，建立無因次調整因子，以此作為軌道設計、施工與維修等作業的依據。

## 三、文獻探討

本計畫依據研究的需求，首先針對國內外相關文獻做全面性的文獻蒐集、整理、分類，以便進行一系列的探討。綜合本計畫第一期的研究可將文獻探討分為下列幾個部分。研究中首先針對版式軌道的研發歷史與應用、使用情況與其成效進行探討。版式軌道於 1955 年由日本開始研發，日本新幹線正式營運後證明了使用新式的軌道版技術確實比傳統的軌道系統更具經濟效應【1, 2】。因此，許多先進國家亦相繼投入相當資源來研究版式軌道，目前世界各國所發展的版式軌道系統在設計的理念以及分析的方法截然不同，至目前為止主要由日本、北美地區以及歐陸等地區大規模的鋪設營運【3】。台鐵於民國 81 年在竹南-造橋段上採用版式軌道取代傳統的道碴式軌道。台北捷運系統於除部分仍使用道碴式軌道外，其營運系統中之高架、隧道與機廠等路段皆採用版式軌道。除此之外，目前規劃興建中之高速鐵路鐵路工程也評估選用版式軌道作為設計。

接著本研究針對軌道力學理論進行探討，傳統道碴式軌道是以 Talbot 所提出的連續彈性支承樑理論為基礎導出理論解，藉以求得軌道系統中的鋼軌、混凝土版與路基之彎矩及應力【1, 4, 5】。而版式軌道亦是應用此原理，以樑理論模擬混凝土版構建雙重彈性支承樑分析法推導版式軌道的理論解【6】。然而由於理論的理想假設與實際的力學行為有所差距，所以目前分析與設計大都以有限元素程式進行結構計算為依據。

再者，以有限元素程式求解力學問題在某些方面能夠突破理論解假設條件的限制，真正表現結構的真實力學行為，因此在適當的假設條件下，以有限元素法來探討結構體受力作用下的力學行為已成為目前的趨勢。大部分的研究以有限元素的分析方式作為依據，最具代表性之案例為日本山陽新幹線之版式軌道分析【7】，大陸專家將各種可能分析版式軌道之理論假設加以彙整，以樑、版之力學觀念推導各種可行之理論解，並說明有限元素法分析之步驟【6】。近年來國內對於軌道工程之相關研究也蓬勃發展，研究的課題包含力學分析、設計、

材料性質、建造方式以及震動影響與結構互制等。在軌道力學方面，黃民仁在其著作中介紹軌道力學的分析方式【1】。內政部營建署「預鑄式軌道版自動化生產技術研發」的專案報告中，進行軌道版的材料特性與基本力學性質之分析，並針對軌道版的設計與其受力時的力學行為進行探討【8】。而郭振銘等人以有限元素法軟體 ABAQUS 模擬版式軌道系統，參考日、德等國家的經驗建立版式軌道靜力與動力分析模型，並與日本新幹線版式軌道分析範例進行驗證工作【2, 10, 11, 12】。

綜合探討相關文獻後，可發現世界各國所使用版式軌道設計理念，建造方法，使用成效皆不相同，力學分析方式亦無一定的標準。一般利用理論解求解力學問題往往將數個條件設為理想狀態，而與真實的力學型態有所差異。而其他相關研究以有限元素法程式來模擬，往往僅能針對某一特定情況進行分析，對於考量整體性的反應與更廣泛的分析則仍嫌不足。再者，有限元素法程式的應用須謹慎的判斷輸入模式，不同的元素網格切割以及元素配置極易因此些微的差異而產生影響，對於分析結果應要更為謹慎的驗證，才能確保分析結果的穩定。理論分析可說是力學分析的基礎，由於目前相關有限元素分析文獻中捨棄與理論解比較的做法，使得有限元素分析結果與理論解無法間銜，使有限元素解之正確性較無法明確地掌握。

#### 四、研究方法

本計畫將針對上述所探討的問題提出解決之道，研究中以理論分析為理念、應用有限元素法為輔助，針對應用有限元素法分析版式軌道之步驟，包括使用的分析理念、元素選擇、維度考慮、輸入參數與分析驗證進行探討。本計畫將以所建立的自動化分析處理程序之程式針對任何版式軌道機制，自動化產生有限元素法程式分析之前處理程序，以建立一系列之有限元素法分析模式，並在經過有限元素法程式分析後將運算結果自動進行彙整。研究中對於有限元素分析方式以理論解為基礎，再與資料分析與統計之方式加以驗證與整合，以確立其力學分析之完整性，作為後續擴展研究之依據。主要的研究方法與步驟如下：

##### 4.1 確立理論分析之程序

本計畫首先針對軌道力學所採用的理論分析進行探討，傳統軌道所採用的理論分析為 1913 年 Talbot 所提出的連續彈性支承樑理論為基礎導出的理論公式，以鋼軌上的撓度為例其理論解如公式 1 所示，其中 P 為輪重、E 為鋼軌彈性係數、I 鋼軌慣性矩； $\phi_1$  稱為齊姆曼 (Zimmerman) 函數，為一系列正弦、餘弦組合成之函數，其組成如公式 2 所示。公式 3 中  $\beta$  為表示鋼軌與路床之間材料強度相對關係的參數，其內容與剛性鋪面的相對勁度之倒數類似，其單位以長度的倒數[L<sup>-1</sup>]表示。其中，u 為鋼軌彈性支承係數，定義為鋼軌底部下沉單位位移所需施加於鋼軌單位長度的力與壓力單位[FL<sup>-2</sup>]相同。至於其他的反應如鋼軌上的應力、彎矩、路床反力皆可由材料參數配合齊姆曼函數求得【1】。

$$y(x) = \frac{P}{8EI\beta^3} \phi_1(\beta x) \quad (1)$$

$$\phi_1(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \quad (3)$$

版式軌道的力學理論將混凝土版假設為另一彈性連續樑，與鋼軌、扣件組成、路床構成雙重彈性樑的架構。其公式組成較為複雜，但亦是由鋼軌、路床、扣件組成、混凝土版的材料常數所構成的參數配合齊姆曼函數，來求得鋼軌與軌道版上的應力、彎矩、與撓度，詳細組成可參考相關文獻【6】。然而，理論解有許多理想的假設以及過於簡化的程序，使得在分

析過程中無法模擬實際的軌道行為，因此，必須採用其他方式來輔助分析。

在探討傳統軌道與版式軌道的理論公式後，本研究將公式中每項考慮的參數因子進行深入的研究，並將實際軌道系統上所量測的數值，如何轉換成理論解所引用的材料參數的求得方法進行剖析，確定理論分析之程序將之整理與進一步推導，以作為驗證有限元素分析之用。

#### 4.2 探討影響版式軌道力學行為之因素

影響版式軌道力學行為之因素包含荷重型態、列車速度、軌道建造之材料性質、路基土壤之強度、扣件組成與環境因素等。在探討傳統軌道與版式軌道的理論公式後，本研究發現在固定軌道系統中各種構件之間的組成關係可達到相同的分析結果。在傳統軌道系統中的 $\beta$ 為重要的控制參數，而版式軌道的理論公式中亦有相同類型的參數，分別是 $l_R$ 、 $l_{RK}$ 、 $l_K$ 。此三個參數在系統中其有相當程度的重要性，因此將這三個參數稱為版式軌道的相對勁度半徑，如公式 4 所示，為長度的單位。

$$l_R = \sqrt[4]{\frac{E_1 I_1}{k_1}}, l_{RK} = \sqrt[4]{\frac{E_2 I_2}{k_1 + k_2}}, l_K = \sqrt[4]{\frac{E_2 I_2}{k_2}} \quad (4)$$

其中 $l_R$ 為鋼軌彈性模數 $E_1$ 與扣件組所形成的支承反力係數 $k_1$ 之間的相對勁度半徑， $I_1$ 為鋼軌慣性矩。 $l_{RK}$ 為混凝土版 $E_2$ 與扣件組反力係數 $k_1$ 及路床形成的支承反力係數 $k_2$ 的相對勁度半徑， $I_2$ 為混凝土版慣性矩。 $l_K$ 則是混凝土版 $E_2$ 與路床支承反力係數 $k_2$ 的相對勁度半徑。尤其探討 $l_K$ 時，將混凝土版斷面的慣性矩與路床彈性支承係數 $k$ 代入公式中； $l_K$ 將可改寫為公式 5，其與剛性鋪面的相對勁度半徑的形式 $l = \sqrt[4]{Eh^3 / (12 * (1 - \nu^2) * k)}$ 極為相似，其中 $\nu$ 為混凝土版之柏松比。

$$l_K = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12k}} \quad (5)$$

根據筆者過去在剛性鋪面的相關研究經驗指出，應用因次分析方法來從事力學分析可獲得許多影響系統反應的重要控制參數。本計畫亦以相同的研究方式，以上述的軌道相對勁度半徑為基礎，配合其他參數諸如軌道系統尺寸、作用載重、軌枕間距、鋼軌軌矩等，應用無因次參數針對軌道系統反應做一系列之探討，再輔助以有限元素分析並加以驗證，以確認控制參數與系統反應間的關係。

#### 4.3 有限元素分析

本研究採用美國 Hibbit、Karlsson & Sorensen (HKS) 公司所研發的 ABAQUS 三維有限元素軟體程式來進行軌道系統的模擬分析【13, 14】。研究過程中以固體元素、樑元素、彈簧元素、基礎函數，分別模擬混凝土版、鋼軌、彈性扣件與路床等版式軌道的主要元件，探討不同的元素切割與配置方式對分析結果造成的影響。藉著一系列的模擬分析決定最佳化的元素切割與配置，以達到最精簡的分析步驟，完成建立自動化分析程序的準備工作。

##### 4.3.1 有限元素分析模式的構建

在構建有限元素分析模式之前，本研究首先針對版式軌道的各項構件加以探討，並以有限元素針對所用模擬元素進行分析比較，慎選架構分析模式的元素，最後選擇適當的元素模擬版式軌道模型，其中鋼軌以線性樑元素模擬、由線性彈簧元素模擬扣件組成、路床以基礎函數取代，至於混凝土軌道版因使用元素的不同可分三種模式，分別是樑元素模式、版元素模式與三維固體元素模式，其架構模式圖例如圖 1 所示。

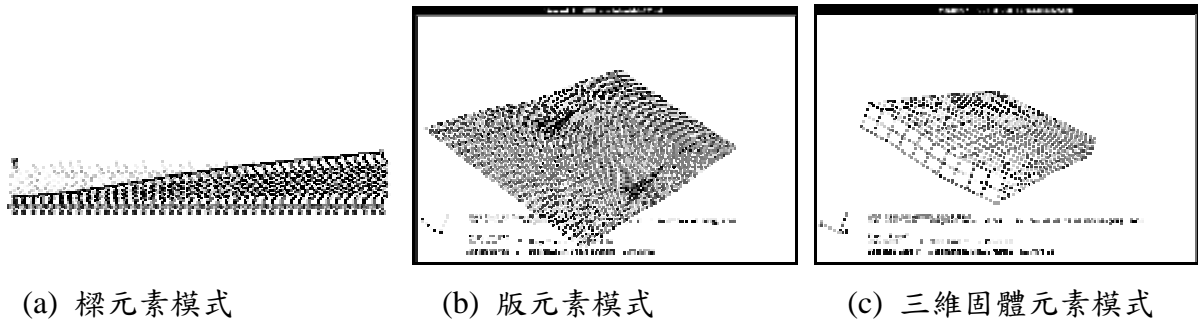


圖1 有限元素分析版式軌道模型圖例

#### 4.3.2 探討有限元素分析解與理論解之差異

本研究將傳統軌道的彈性基礎樑理論解與有限元素分析驗證，兩者的分析結果甚為接近。研究中亦將彈性基礎上的雙重樑理論解與有限元素分析的樑元素模式、版元素模式與三維固體元素模式所建立的模型進行驗證，分析的結果指出樑元素模式與理論解最為接近、版元素模式與三維固體元素模式與理論解則產生差距。其主要原因在於理論公式在推導時做了很多假設且將樑元素為設定為平面上的直線，力學性質僅表現在所作坐落的平面上。版元素亦是一種經過簡化程序的元素，最主要的假設就是版本身視為如同薄紙一般且在厚度方向為不可壓縮，版以中性軸為基準來表示節點的撓度與變形量，而節點斷面上的應力是經由內插所計算而得。而三維固體元素考慮了各種自由度的特性，以此元素模擬混凝土軌道版時，並且不再使用版或樑的許多假設，是一種較為接近物體實際力學行為的元素。因此，由於假設條件、組成律與力學性質的不同，三種不同模式的分析結果自然將產生差異。正確的有限元素分析結果亦可視為是理論解的延伸與擴充。

#### 4.4 自動化分析程序

本研究所採用的 ABAQUS 程式雖然擁有甚為優良之分析能力，然而在建立輸入檔時必須熟知座標系統、各種元素之定義、元素之配置、邊界條件與及分析程序的使用方式，往往必須一再謹慎地更正與確認，其過程頗為繁雜。而且其輸出檔將列出龐大的分析結果，再判讀時頗為費力。因此，本研究針對 ABAQUS 程式之程序、分析方式與輸入輸出檔案架構進行深入的瞭解，進而以 Visual Basic 軟體與 FORTRAN【15】程式，根據 ABAQUS 程式分析程序之架構，編輯可供建立 ABAQUS 程式之前處理與後處理之自動化分析處理程序。

##### 4.4.1 版式軌道模型之修正

本研究進而根據前述有限元素分析解與理論解之差異，來修正有限元素的分析模型。在版元素與三維固體元素所建立的分析模型中，由於加入理論解無法考慮的另一個座標方向，因此版的寬度與軌距也成為有限元素分析需要考慮的參數。在進行有限元素分析時，必須針對分析模型加以調整，才能配合理論解的假設，降低彼此的誤差。本研究將軌距與版的寬度修正至配合理論解的假設取代實際的版式軌道模型，經由一系列的分析再次將分析結果與理論解驗證，分析結果證實修正後的模型與理論解差距更小。

##### 4.4.2 有限元素模型之參數分析

本計畫將三種有限元素分析模式進行的參數分析，針對分析模型的元素選擇、網格切割方式、軌道尺寸之不同建立一系列的分析模型，藉由分析結果探討其差異性，以確立分析模型的穩定性與可靠性。研究中再經由分析結果的精確度比較，以及觀察分析程序中所使用的電腦資源與運算時間的判斷，發現樑元素模式的變異性甚低可應用最單純的 B31 元素進行分

析，而版模式的建構以 S8R5 元素模擬混凝土軌道版最佳，至於三維固體元素的模型構建以 C3D20 元素的模擬成效最為適合。

研究中以理論公式所探討的版式軌道相對勁度半徑 $l_R$ 、 $l_{RK}$ 、 $l_K$ 為基礎，構建不同組成特性的版式軌道分析模型，再經由分析與驗證後，發現當 $l_R$ 、 $l_{RK}$ 、 $l_K$ 組成比例關係為固定時，系統將呈現所相同的分析結果。本研究在確立這種特性後以不同的無因次參數作為控制因子討論軌道尺寸的效應。研究中發現當軌道長度 $L$ 與相對勁度半徑 $l_K$ 所組成的無因次參數 $L/l_K$ 達到 6.0 時，版模式與三維固體元素的模型的分析撓度與應力可完成收斂而視為無限長理論的狀態。而軌道版的寬度亦隨著版寬 $B$ 的無因次因子 $B/l_K$ 的增加而收斂，這與剛性鋪面的版理論相似。接著，本研究以不同的網格切割方式進行分析，發現在 S8R5 版元素的模式中，必須使分割的元素盡量接近於正方形，分析結果較為精確與穩定，而每個元素的長度 $S$ 需控制 $S/l_K$ 在 0.2 以下方能收斂。至於三維固體元素的網格切割方式必須考慮厚度方向的切割層數，在綜合研究結果後判定最佳的切割層數為 3 層，而且必須使分割的元素盡量接近於立方體。研究中的分析結果，建議 C3D20 三維固體元素的尺寸應控制在 $S/l_K \leq 0.15$ 。綜合上述的參數分析結論，本研究確立了三種有限元素分析模式的最佳化分析模型，以此模型作為基準的分析結果將與理論解最為接近，可以此最佳化模型來進行其他的參數分析。

#### 4.4.3 自動化參數分析程式

本計畫以上述的最佳化分析模型結論，應用 Visual Basic 軟體構建一套自動化參數分析程式，應用此程式可建立不同模式的 ABAQUS 程式輸入模型，並由電腦程式自行控制分析程序的進行。本研究建立自動化參數分析程式的目的在於進行參數分析，因此程式可藉由使用者的需求輸入欲分析的可能參數，其中包括元素選用、模型尺寸、網格切割、材料參數、軌道形式等，程式將自動產生一系列分析模型的批次檔案，藉由自動化控制使分析程序進行，使用者不需鑽研複雜的 ABAQUS 程式輸入形式即可方便的運作。

研究中針對 ABAQUS 程式之輸出檔案格式的架構，以 FORTRAN 軟體編譯可自動搜尋與整理資料的程式。藉由程式的運作可由龐大的 ABAQUS 輸出檔案群中，將研究所需的重要資料加以彙整成簡單、清晰的資料結構，以作為資料分析與探討之用。本研究經由一再地修正與驗證而完成自動化程式，以確立本程式之功用可適合於各種版式軌道的參數分析。

## 五、研究結果

### 5.1 無因次參數的辨識與驗證

無因次參數的辨識與驗證的主要目的是期望從分析結果發現可代表整體性質的廣泛參數，而不僅限於鋼軌、路床、扣件與混凝土版之某個特定分析的材料參數範圍。本文以軌道版上的應力參數驗證為例，首先由分析模式中可知作用在版上的載重是經由彈性扣件組傳遞至版上，而在所建立的模型中扣件組是以彈性銜接元素模擬，因此作用在版上的載重即是節點上彈性銜接元素的反力。在已知其彈性勁度的情況下，此反力可用銜接元素上的變形量來表示。由傳統軌道力學的理论公式中得知鋼軌上的變形量為 $P l_R^3 / E_1 I_1$ ，並可用來代表系統中的載重參數，其中 $P$ 為輪重、 $E_1$ 為鋼軌彈性係數、 $I_1$ 為鋼軌慣性矩， $l_R$ 為鋼軌與扣件組的相對勁度半徑。接著由剛性鋪面的研究中得知，荷重半徑( $a$ )與相對勁度半徑( $l$ )的比值所構成的無因次參數 $a/l$ 可用來表示荷重與版系統的關係，進而求得分析的力學性質。根據此一概念，本研究將版式軌道中的 $P l_R^3 / E_1 I_1$ 用來代表系統中的載重參數，其單位表示與荷重半徑同為長度單位[L]，其與混凝土軌道版與路床的相對勁度半徑 $l_k$ 的比值，可代表軌道版系統中載重與版之間的無因次參數，本研究因此將其定義為版式軌道的正規化載重因子，如公式 6 所示：



$$F_{NL} = \frac{P\ell_R^3}{E_1 I_1} \times \frac{1}{\ell_k} \quad (6)$$

本研究應用版式軌道自動化參數分析程式進行參數分析與驗證，由表 1 的應力驗證資料中可發現：雖然當系統中構建模型的參數皆不相同，但若正規化載重因子  $F_{NL}$  為固定時，則系統反應的無因次參數  $\sigma h^2/P$  將獲得相同的比值，因此可以驗證出所發現的控制參數之適用性。

表 1 分析模型無因次參數驗證表(軌道版應力)(部分資料)

$F_{NL}$	荷重 P(kN)	軌道版 版寬 $b_2$ (mm)	軌道版 版厚 $h_2$ (mm)	軌道版 彈性模數 E(kPa)	路床 反力模數 k (kN/m <sup>3</sup> )	軌道版 應力 $\sigma$ (kPa)	$\sigma h^2/P$
7.83E-03	574	2430	76	3.434E+07	22950	15039	0.153
7.83E-03	586	2430	81	2.943E+07	23423	13665	0.153
7.83E-03	598	2430	87	2.453E+07	23896	12155	0.152
7.11E-03	562	2250	84	4.120E+07	49922	13567	0.171
7.11E-03	574	2250	90	3.434E+07	50973	12135	0.171
7.11E-03	586	2250	95	2.943E+07	52024	11036	0.172
3.87E-02	3587	2300	101	2.453E+07	46344	64246	0.181
3.87E-02	3658	2300	109	1.962E+07	47262	56045	0.182
3.87E-02	3729	2300	124	1.373E+07	48180	44586	0.182

\*以 RE132 型鋼軌分析

## 5.2 資料庫建立與迴歸分析

本研究以自動化分析程式的彙整結果進行資料分析，分析時應用新型統計技術—投影追逐迴歸(PPR)分析建立一系列的無因次撓度與應力調整因子之預估公式。本文以 C3D20 三維固體元素模式版式軌道有限尺寸應力調整因子之建立為例，研究中為了不使分析的模式僅限於單一個案，因此以包括幾組不同的鋼軌形式、路床、扣件與混凝土版之材料參數，構成不同的無因次參數  $F_{NL}$ 。在各組不同的  $F_{NL}$  模式中又以軌道無因次長度因子  $L/\ell_k$  為變數，構建數種不同的分析個案。當經由自動化分析程式的分析彙整後，由資料庫可得到不同分析個案的所有資料，研究中便將分析所得的應力與理論解的分析應力相比，以此得到版式軌道因不同  $F_{NL}$ 、 $L/\ell_k$  所形成的應力比  $R_L$ 。圖 2 表示三個主要的變數之關係，圖 3 所示為以投影追逐迴歸(PPR)分析的投影模式圖，版式軌道有限尺寸應力調整因子  $R_L$  值預估方程式如公式 7：

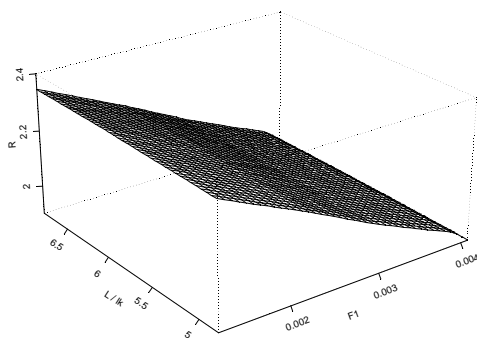


圖2  $L/\ell_k$ 、 $F_{NL}$  與應力比  $R_L$  的關係

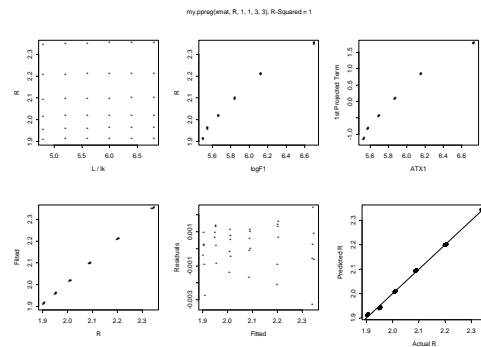


圖3 PPR 分析投影模式圖

$$\sigma_{FEM} = \sigma_{Theory} \times R_L \quad (7)$$

$$R_L = 2.08393 + 0.15076 \phi_1$$

$$\phi_1 = -185.0178 + 79.36327 \alpha_1 - 11.42032 \alpha_1^2 + 0.55734 \alpha_1^3$$

$$\alpha_1 = 0.00511 X_1 + 0.99999 X_2$$

$$X = [X_1, X_2] = \left[ \frac{L}{\ell_K}, \log_{10}(F_{NL}) \right]$$

Statistics : N = 36 , R<sup>2</sup> = 0.9983 , SEE = 0.006442

Limits :  $4.8 \leq \frac{L}{\ell_K} \leq 6.8$  ,  $1.23 \times 10^{-3} \leq F_{NL} \leq 4.08 \times 10^{-3}$

### 5.3 版式軌道撓度與應力調整因子

吾人可藉由理論解的應力值  $\sigma_{Theory}$ ，配合調整因子  $R_L$  預估有限尺寸對分析結果的影響，不需經由複雜的有限元素分析即可正確地預估版式軌道的實際應力。本研究應用相同的研究方法分別建立，版元素模式與三維固體元素模式的有限尺寸的應力  $R_{\sigma L}$  與撓度調整因子  $R_{\delta L}$ 、軌矩應力調整與因子  $R_{\sigma D}$  與撓度調整因子  $R_{\delta D}$ 。藉由這一系列的應力與撓度調整因子預估公式，可估算出以有限元素模型分析實際版式軌道時的應力與撓度值，進而以此作為分析與設計的依據，節省有限元素模型需要的複雜分析過程。其撓度與應力的預估方式如下列所示：

$$\sigma_{FEM} = \sigma_{Theory} \times R_{\sigma L} \times R_{\sigma D} \quad (8)$$

$$\delta_{FEM} = \delta_{Theory} \times \frac{1}{R_{\delta L}} \times R_{\delta D} \quad (9)$$

## 六、結論與建議

### 6.1 結論

本研究首先由軌道力學的公式中探討其控制參數，並以有限元素法驗證之，以此確立理論分析之程序並確認影響版式軌道力學行為的因素。本研究再針對不同的分析模式建立樑元素模式、版元素模式與三維固體元素模式等有限元素模型，由其力學特性探討其分析結果與理論解的差異性，並探究造成差異的適切原因。期望若以較複雜之模型分析時，其結果正確與否亦可由理論解作為輔正之依據，以確立力學分析程序之完整性。

研究中以不同的有限元素分析模式進行研究，由分析結果中得到最佳有限元素分析模型的建立方法，應用此最佳化的模型的建立方式將可節省電腦分析資源、運算時間並確保分析的精確度。將所建議的版式軌道最佳化分析模式應用在本研究所建立的自動化分析程式中，可針對各種版式軌道的參數進行分析，程式並將自動彙整分析結果以利使用者進行資料分析。此程式的應用將大量簡化有限元素程式分析作業的程序，如此將可簡易的分析一系列龐大的問題，直接由自動化分析程式的處理結果判讀其趨勢。而且程式所彙整的分析結果將建立一個完整的資料庫，以此作為相關的統計分析或探討詳盡之力學模式將會非常簡便。

本研究以自動化分析流程的分析結果，配合投影追逐迴歸(PPR)之分析方式，針對版式軌道中的設計主要考量—鋼軌上的撓度與混凝土軌道版的應力，建立一系列的無因次預估模式，應用此預估模式與理論解的分析結果可預估其真實的反應，節省有限元素模型需要的複雜分析過程。

### 6.2 建議

本計畫第一期的研究目標與要求進度目前已完成絕大部分，研究中完成自動化分析程式之構建，並以此建立版式軌道中鋼軌上的撓度與混凝土軌道版的應力等多個無因次預估模

式，可供修正理論分析以進而計算版式軌道之用。然而軌道模式甚為複雜，有關於多輪軸之反應、混凝土襯砌底層等因子，則還需進一步地進行探討。除了應用本研究的自動化分析可延續研究外，研究單位過去在剛性鋪面的相關研究成果亦可與版式軌道分析加以整合。而對於版式軌道的環境或其他因素所造成的影響，如鋼軌挫曲、混凝土軌道版的翹曲與軌道震動等需進一步討論。

因此，本研究為了延續研究成果的應用已開始準備第二期研究之工作，目前已完成鋼軌挫屈行為的理論模式推導，並以有限元素分析進行初步的模擬，針對鋼軌挫屈的研究範疇進行深入的了解。此外，本研究並嘗試以剛性鋪面之分析理應用在版式軌道上，首先針對混凝土軌道版與剛性鋪面版的力學性質進行比較，以作為更為深入的研究基礎。藉著第一期計畫的完成結論，擴展至接下來的研究，定可使本計畫進行的版式軌道分析更為豐富。

### 參考文獻

1. 黃民仁，陳世芳，鐵路工程學，文笙書局，1993。
2. 郭振銘，林煜清，李念祖，版式軌道行為特性與設計需求，國科會專題研究報告，NSC85-2221-E-006-058，1996。
3. David N. Bilow, and G. M. Randich, Slab Track For The Next 100 Years, *American Public Transportation Association 2000 Rail Transit Conference*, 2000.
4. 翁禮維，鐵路工程，大中國圖書公司印行，1986年。
5. William, W. H., *Railroad Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982
6. 王其昌等，鐵路新型軌下基礎應力計算，中國出版社，1987。
7. 佐佐木 直樹著，王其昌譯，版式軌道，中國出版社，1983。
8. 財團法人台灣營建研究中心，預鑄軌道版自動化生產計技術研發，內政部營建署，民國87年。
9. 王其昌譯，軌道動力學分析，西南交通大學，1987。
10. 林煜清，版式軌道之研究與分析模型的建立，碩士論文，成功大學土木工程學系，民國八十六年，p.p.41~45。
11. 孫鈺茹，建立日本新幹線版式軌道之分析模型，碩士論文，成功大學土木工程學系，民國88年。
12. 曾俊維，以三維有限元素分析軌道結構之動力行為，碩士論文，成功大學土木工程學系，民國90年。
13. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, "Getting Started With ABAQUS/Standard : Interactive Version," 2002.
14. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, "ABAQUS/Standard User's Manual," Volume I & Volume II, Version6.2.1, 2000.
15. "Microsoft FORTRAN PowerStation Professional Development System," User's and Reference Manuals, Microsoft (Taiwan) Corp., 1994.
16. Huang, Y. H., *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
17. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, *AREMA Manual for Railway Engineering*, 2001.