

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(2/2)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92-2211-E-032-013-

執行期間：九十二年八月一日至九十三年七月三十一日

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

中華民國九十三年七月三十一日

版式軌道自動化應力分析程式之建立與應用(2/2)

Development and Application of Automatic Stress Analysis Program for Slab Track

計畫編號：NSC 92-2211-E-032-013

執行期限：92年8月1日至93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。本研究第二期的主要研究重點在探討版式軌道可能發生之溫差翹曲效應，及因荷重、溫差作用所產生之長焊鋼軌挫曲行為，以及因列車長期作用引發軌道震動造成軌道弱化之現象進行深入之研究。研究中將慎選並分析一系列不同的軌道版設計之有限元素程式案例。第二年度工作要項包括：(1)因次分析原理之應用與混凝土版之溫差翹曲行為探討，(2)鋼軌挫曲之研究，(3)軌道震動對扣件組影響之探討，(4)版式軌道破壞之研究，與(5)敏感度分析與應用實例分析。本計畫亦於研究後期整合研究成果，發展一套具有良好使用介面的軌道力學分析程式 TKUTRACK。

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。計畫的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。

關鍵詞：版式軌道、彈性理論、ABAQUS、有限元素法、長焊鋼軌挫曲

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. Furthermore, the investigation of temperature curling effects, buckling of continuously welded rails (CWRs) due to the combined effects of loading and curling, as well as rail weakening effects due to the long-time vibration of the slab tracks system are the major concern of the Phase II. Many series of finite element factorial runs over a wide range of railway designs will be carefully selected and conducted. The major research approach and tasks include: (1) application of the principles of dimensional analysis and temperature curling effects; (2) buckling of CWRs; (3) investigation of the effects of vibration on rail fastenings; (4) damage and deterioration of the slab tracks system; and (5) sensitivity analysis and several practical case studies.

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, buckling of CWRs

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，且為了因應國內運輸需求的增加，目前已積極的投入建設縱貫本島城際間的高速鐵路，以供未來之需要。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、學三方面等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。而在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，而比傳統道碴軌道擁有最佳的強度，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。且進行模擬時，分析個案將因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，如何有效且一致地使用有限元素法，來進行版式軌道的力學分析應是重要的關鍵。因此，本計畫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，判斷影響其力學行為之因素，以確立力學分析程序之完整性。

三、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。本研究首先以軌道力學之理論解為基礎，來發現控制反應之力學參數，並討論理論解與有限元素分析結果之差異，進而驗證控制參數之正確性。接著，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。此外，研究中進行一系列分析探討焊接長軌的挫屈行為。並蒐集國外相關文獻，彙整軌道破壞型式之資料，以做為軌道維修與管理初步研究的依據。研究中亦應用自動化分析的概念，建立有限元素程式使用時系統化的分析程序，依據此方法比較各種有限元素模擬版式軌道的差異，探討其收斂特性，以此結果確立最佳化分析模型。此外，本研究整合剛性鋪面的研究成果，應用因次分析與統計迴歸的方法，建立版式軌道的力學預測模式，以此建立新式的版式軌道應力計算程序。最後並整合研究成果建立版式軌道力學計算程式 TKUTRACK。主要的研究方法與研究成果如下所述。

三、軌道力學理論與控制參數辨識

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。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。接著，本研究針對軌道力學理論進行探討，將傳統道碴式軌道所採用縱枕理論分析法與橫枕理論分析法所推導的理論解，以及版式軌道所採用的雙重彈性支承樑分析法進行詳

盡的探討。研究中由上述各種分析方法的理論解重新推導，並以因次分析的原理將各種分析公式中的所有參數以無因次參數型態表示，進而辨識出軌道力學的主要控制參數。而本研究觀察軌道力學理論公式的推導過程中，發現其模式與剛性鋪面的版理論相似。因此，研究中以剛性鋪面的相對勁度半徑 $\ell = \sqrt[4]{E_c h_c^3 / (12(1-\nu^2)k)}$ 為基礎，重新定義軌道的相對勁度半徑。

本研究定義道碴式軌道的軌道相對勁度半徑為 $\ell_r = \sqrt[4]{E_s I_s / u}$ ，其中 $E_s I_s$ 為鋼軌彎曲勁性 (Flexural Rigidity)； u 是整合之彈性基礎稱為軌道勁度 (Track Stiffness) 或鋼軌彈性支承係數 (Modulus of Rail Support)。若以縱枕理論計算載重作用在道碴式軌道之反應，軌道上的撓度 δ 、彎矩 M 、與軌枕上的反力 F 的公式，可處理成正規化撓度 $\frac{\delta E_s I_s}{P \ell_r^3}$ 、正規化彎矩 $\frac{M}{P \ell_r}$ 、正規化軌枕反力 $\frac{F}{P}$ ，將只和無因次參數 x/ℓ_r 有關，其關係如公式 1 所示。若以橫枕理論計算載重作用在道碴式軌道之反應，軌道上的撓度 δ 、彎矩 M 、與軌枕上的反力 F 的公式，可處理成正規化撓度 $\frac{\delta \times u \times s}{P}$ 、正規化彎矩 $\frac{M}{P \times s}$ 、正規化軌枕反力 $\frac{F}{P}$ ，將只和無因次參數 s/ℓ_r 有關，其關係如公式 2 所示。其中， s 為軌枕支承間、 x 為與作用載重相距之長度。本研究以數值分析方式加以驗證，最後觀察到當無因次參數 s/ℓ_r 、 x/ℓ_r 固定時，正規化的力學反應將呈現一致的結果，因此，驗證上述之無因次參數為其主要之控制參數。

$$\frac{y E_s I_s}{P \ell_r^3}, \frac{M}{P \ell_r}, \frac{F}{P} = f\left(\frac{x}{\ell_r}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\delta \times u \times s}{P}, \frac{M}{P \times s}, \frac{F}{P} = f\left(\frac{s}{\ell_r}\right) \quad (2)$$

同理，本研究在推導版式軌道的公式中，議定亦了版式軌道的軌道相對勁度半徑為 ℓ_r 、 ℓ_{rk} 、 ℓ_k ，其內容如公式 3 所示。

$$\ell_r = \sqrt[4]{\frac{E_s I_s}{u_1}} \quad \cdot \quad \ell_{rk} = \sqrt[4]{\frac{E_c I_c}{u_1}} \quad \cdot \quad \ell_k = \sqrt[4]{\frac{E_c I_c}{u_2}} \quad (3)$$

其中， $E_s I_s$ 為鋼軌彎曲勁性； $E_c I_c$ 為軌道版彎曲勁性； u_1 、 u_2 分別表示鋼軌部分與基礎部分的彈性支承係數。而本研究以因次分析的方式加以分析，並經由計算與驗證，最後確立在鋼軌與軌道版上的正規化撓度 $\frac{\delta E_s I_s}{P \ell_r^3}$ 與正規化彎矩 $\frac{M}{P \ell_r}$ ，僅與無因次參數有關 $\frac{\ell_r}{\ell_{rk}}$ 、 $\frac{\ell_r}{\ell_k}$ ，其關係式如公式 4 所示。

$$\frac{\delta E_s I_s}{P \ell_r^3}, \frac{M}{P \ell_r} = f\left(\frac{\ell_r}{\ell_{rk}}, \frac{\ell_r}{\ell_k}\right) \quad (4)$$

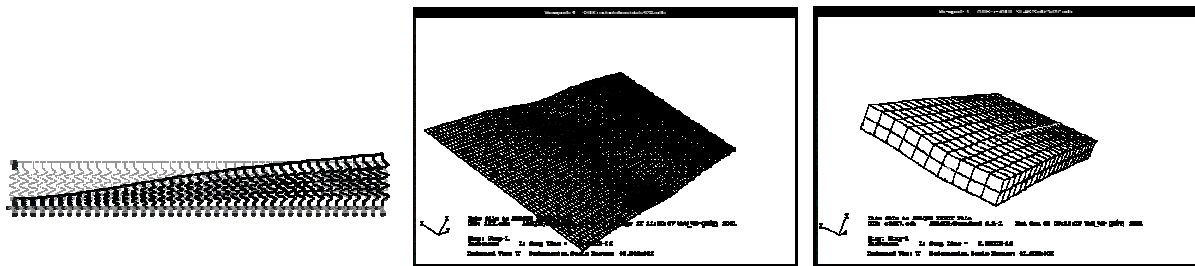
四、最佳化有限元素分析模型之建立

如何構建最佳之有限元素分析模型，有效率地進行分析，為本研究之主要目的之一。因此，研究中將透過一系列的收斂性分析，來觀察分析模型構建時元素的選擇、分析程序、模式選用、網格切割方式、分析模型的大小、電腦運算時間與消耗資源。綜合上述的各項因素，藉此判斷構建最佳化三維有限元素模型的方法，有效率地使用 ABAQUS 程式構建有限元素分析模型，以確立分析模型的適當性與效率。

4.1 分析模型構建

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。



(a) 樑元素模式

(b) 版元素模式

(c) 三維固體元素模式

圖1 有限元素分析版式軌道模型圖例

本研究在二維結構模型中，採用樑元素作為傳統道碴式軌道中鋼軌的模擬元件，而版式軌道的構建方法，則將混凝土版結構視為結構中的另一個樑，同樣以樑元素模擬之。在三維結構模型中，本研究以二維版殼元素或三維固體元素來模擬版式軌道中的混凝土版，鋼軌部分採用樑元素模擬，扣件組以 JOINTC 元素模擬，路床則以基礎函數來構成。本研究根據 ABAQUS 程式的使用方法，使用四點、與八點九點版殼元素，建立以版殼元素為基礎的分析模型。另外又以八點固體元素、二十點固體元素、與二十七點固體元素建立以固體元素為基礎的分析模型。其架構模式圖例如圖 1 所示。

本研究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。分析結果顯現利用樑元素模式所建立的版式軌道系統與理論解的驗證最為吻合。版殼元素與三維固體元素所建立的版式軌道模型的分析結果與理論解的驗證情況，在鋼軌部分差異並不大，但是在混凝土軌道版的部分具有明顯的差異。

4.2 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 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。

4.3 應力收斂特性分析

本研究以上述建立之自動化分析程序進行一系列的收斂特性分析，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。由分析結果發現，關於鋼軌的模擬彈性，在扣件間距 s 以 3 段樑元素配置，即可將分析的收斂程度達到 99.9%。

本研究在以版殼元素模擬軌道版時，以不同的元素配置各種不同的切割密度進行比較。元素的切割方式如圖 2 所示。其中位置 I 為荷重區域處，採用最細之切割方式，邊長為 C 。位置 II 延續位置 I 之切割方式，本研究採用 8 倍的 C 之長度。而位置 III 的網格切割密度為位置 I 之四分之一。研究中定義的切割密度(Mesh Fineness)為 C 之尺寸比上使用元素的邊長。

由圖 3 之分析結果發現，8 點元素或 9 點元素會隨著網格切割越密而撓度值越大而快速收斂，其收斂程度遠比 4 點元素來得好。其中又以 8 點元素的 S8R5 與 9 點元素 S9R5 最佳。

而在以三維固體元素模擬軌道版進行分析時，除了元素種類的影響外，水平(X、Y)方向

與垂直(Z)方向的切割亦有相當程度的影響。由分析結果發現，當切割層數為 1 層時，各種三維固體元素的收斂性不佳，甚至有發散的現象，因此不建議使用。三維固體元素中收斂特性較佳為 20 點之 C3D20 元素與 27 點之 C3D27 元素，其收斂情況如圖 4 所示。圖中之數字表示垂直方向的切割層數，由此可觀察到此兩種元素的收斂效果甚佳。

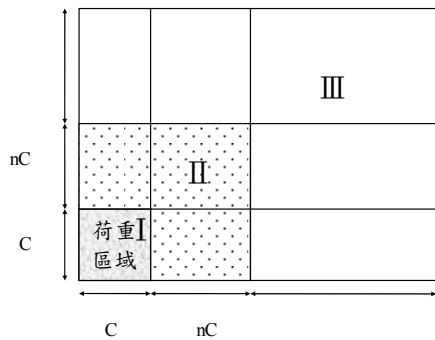


圖2 切割方式

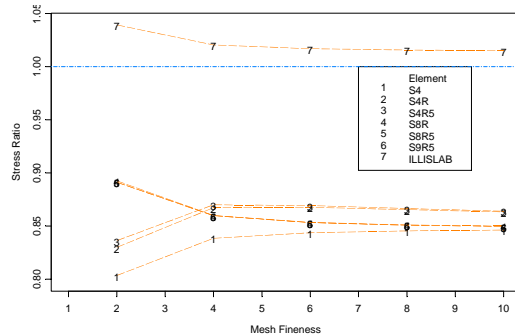
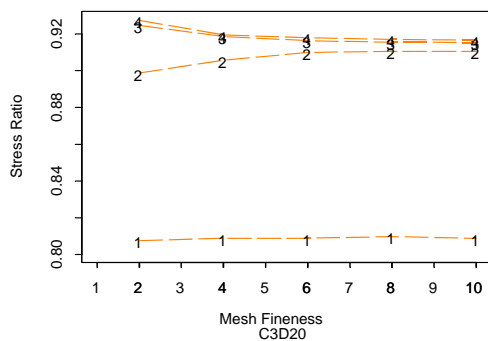
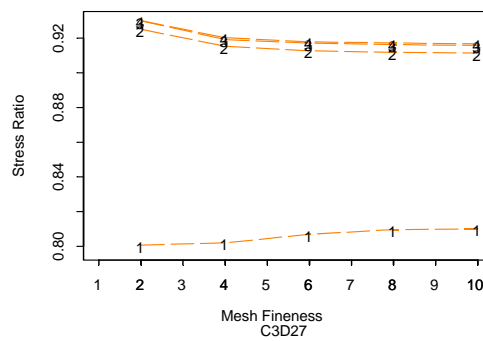


圖3 版殼元素應力收斂比較



(a) C3D20 元素



(b) C3D27 元素

圖4 三維固體元素應力收斂比較

4.4 最佳化有限元素分析模型

由上述的收斂性分析中可發現以三維固體元素分析時，僅要在厚度方向控制切割為三層時即可達到收斂。所以，以二維版殼元素或三維固體元素模擬混凝土版結構，主要的切割方法乃控制在水平向的切割方式。接著，本研究針對版式軌道水平向切割方式收斂特性、完整扣件組結構與簡化扣件組結構的收斂特性進行探討。進而確立最佳化有限元素分析模型的構建方式，以期建立最精簡的分析模型，並可達到分析時要求的精確度。

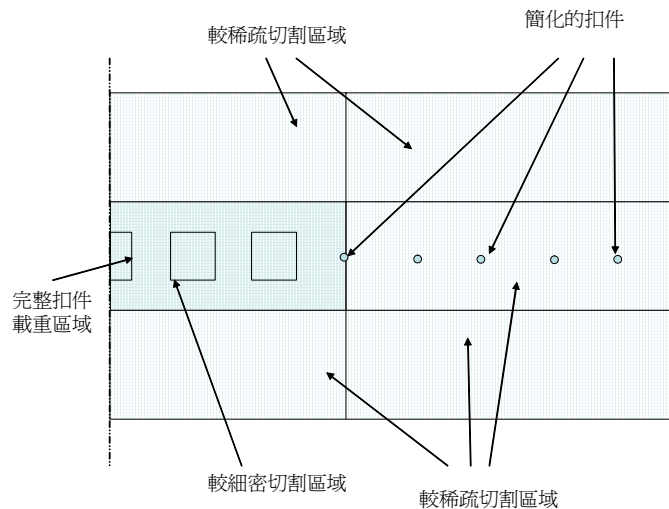


圖5 最佳化有限元素分析模型

本研究所建議的最佳化三維有限元素分析模型構建方法。在鋼軌部分以 B31 樑元素分析

即可，而切割方式在軌枕間必須採用 3 個樑元素模擬。在軌道版方面，建議使用 S8R5 以及 C3D20 元素模擬。扣件模擬則僅需在靠近載重位置三個完整之扣件，其他扣件可用線性彈簧元素取代。因此，在水平面之 X 方向切割方式採用兩倍的載重區域以較密之密度切割，而 Y 方向在四個扣件間距的範圍內以較密之密度切割，其示意圖如圖 5 所示。而水平向之切割密度方式以 Mesh Fineness=6 為佳，厚度方向切割三層。

五、軌道應力分析模式之建立

本計畫根據筆者過去在剛性鋪面相關研究之經驗與成果，建立一種新式的軌道應力分析模式。研究中將以因次分析所辨識出的主要控制無因次參數為基礎，並以本研究所建立的自動化分析程序來進行一系列的分析，最後並以投影追逐迴歸建立應力預估模式。

5.1 分析模組之分解

本研究以自由體圖的概念將軌道系統分解成鋼軌與扣件模組、軌道版模組兩個部分，再應用因次分析的方式，將各個分析模組的結構反應個別求解。如此將軌道模組分解後對，於分析時，所需處理參數的複雜度，將遠比整體結構同時分析時之複雜度小。其分解的自由體圖如圖 6 所示。

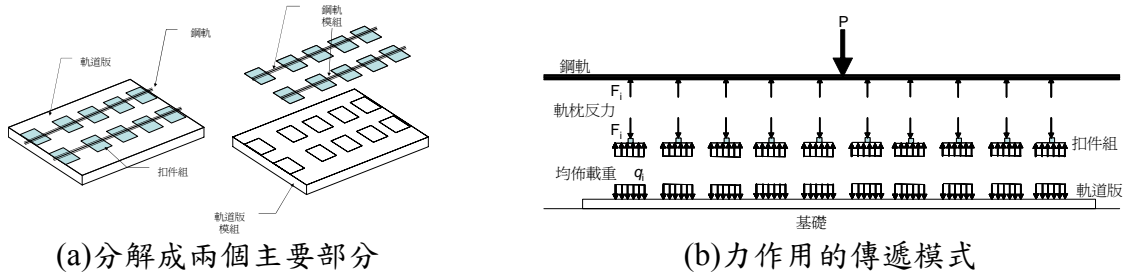


圖6 版式軌道分解之自由體圖

當載重作用在軌道上，鋼軌之力學反應將傳遞至扣件反力上，而系統中扣件反力作用在軌道版上，可視為單純的混凝土版塊承受數個來自於扣件所傳遞下來的均佈載重，其型式就如剛性鋪面相同，如此在軌道版部分將可應用剛性鋪面的力學原理來分析。

5.2 鋼軌與扣件模組之分析

本研究進行模組分析時，首先探討鋼軌模組中鋼軌扣件反力的預估模式，當列車載重 P 作用在剛軌時，以公式 5 可計算任意位置的扣件反力，其中 R_{Da} 為輪軸影響之應力調整因子， D_a 為列車兩輪軸之間的軸距； R_{Fo} 為計算系統中最大扣件反力的應力調整因子； R_{Fi} 為預估任意扣件反力的應力調整因子。以 R_{Fo} 為例其公式如公式 6 所示。

$$F_i = P \times R_{Da} \times R_{Fo} \times R_{Fi}$$

$$R_{Fo} = f\left(\frac{\ell_{rk}}{\ell_r}, \frac{\ell_k}{\ell_r}, \frac{s}{\ell_r}\right) \quad (5)$$

$$R_{Da} = f\left(\frac{D_a}{\ell_r}\right)$$

$$R_{Fi} = f\left(\frac{x}{\ell_r}\right)$$

$$R_{Fo} = 0.64903 + 0.28037\Phi_1 + 0.03782\Phi_2$$

$$\Phi_1 = -2.302 + 2.729A_1 - 2.310A_1^2 - 56.964A_1^3 - 74.696A_1^4$$

$$\Phi_2 = -2.346 - 25.790A_2 - 78.043A_2^2 - 95.504A_2^3 - 41.271A_2^4$$

$$A_1 = 0.0034x_1 + 0.0001x_2 - 0.0497x_3 + 0.9987x_4 + 0.0098x_5 \quad (6)$$

$$A_2 = -0.2056x_1 - 0.0016x_2 - 0.0470x_3 + 0.8708x_4 - 0.4441x_5$$

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = \left[\frac{\ell_{rk}}{\ell_r}, \frac{\ell_k}{\ell_r}, \frac{s}{\ell_r}, \log\left(1 + \frac{s}{\ell_r}\right), \log\left(1 + \frac{s}{\ell_k}\right) \right]$$

$$\text{Statistics: } N = 2430, R^2 = 0.9995, \text{SEE} = 0.0063$$

$$\text{Limits: } 1.25 \leq \frac{\ell_{rk}}{\ell_r} \leq 4.50, 0.59 \leq \frac{\ell_k}{\ell_r} \leq 8.03, 0.31 \leq \frac{s}{\ell_r} \leq 9.39$$

當完成鋼軌扣件反力的預估後，則可將軌道版的結構型式與受力行為，視為剛性鋪面而

應用版理論的分析模式來進行分析。模組分解後的各個扣件反力作用載重分佈如圖 7 所示，其型式就如同數個均佈載重作用在混凝土版上。

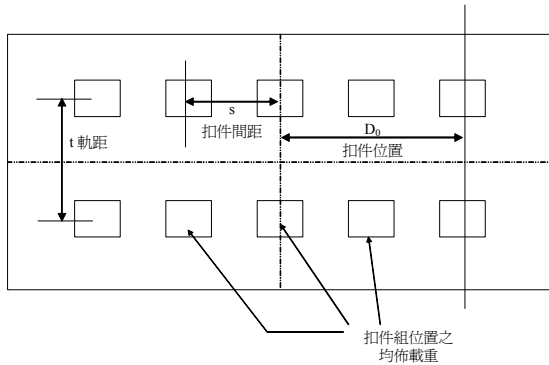


圖7 版式軌道分解之自由體圖

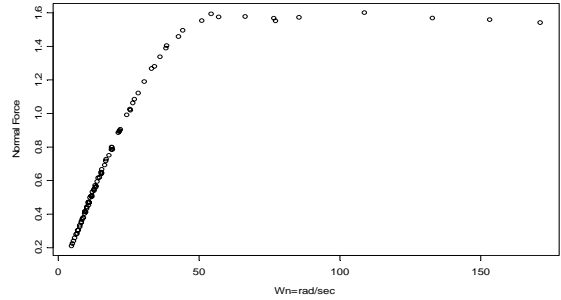


圖8 正規化反應與基本振態頻率之關係

5.2 軌道版模組之分析

接著，本研究以公式 7 計算每個扣件反力對臨界位置的最大反應，其中 σ_{wi} 為每個扣件反力所形成的作用載重以 Westergaard 中央應力公式所計算的理論解， $R_{D_{0i}}$ 為每個扣件根據所在位置所應折減的調整值，其調整模式如公式 8 所示。

$$\sigma_{sum} = \sum_{i=0}^n \sigma_{wi} \times R_{D_{0i}} \quad (7)$$

$$R_{D_{0i}} = f\left(\frac{a}{\ell}, \frac{D_{0i}}{\ell}, \frac{D_{0i}}{a}\right) \quad (8)$$

接著，需再針對其他影響因子進行調整，本研究建立鋼軌位置調整因子 R_t 、有限尺寸調整因子 R_{LW} 、雙層版應力調整因子 R_{eff} 等。最後彙整的軌道版應力預估模式如公式 9 所示。

$$\sigma = \sigma_{sum} \times R_{LW} \times R_t \times R_{eff} \quad (9)$$

本研究亦針對軌道版系統的動力行為進行探討，將動力作用下軌道振動之影響以 ABAQUS 程式進行分析。研究中以阻尼比為 0.05 基準，建立 80 種不同的結構模型進行分析，並將分析結果中的最大扣件反力值比上靜力作用時的最大扣件反力值定義為正規化反應。由分析結果顯示，此正規化反應與結構的基本振態(Fundamental Mode)之自然頻率呈現規律的關係，其關係如圖 8 所示。而由此也可觀察到動力反應影響最大為靜力的 1.6 倍。

六、軌道破壞型式與軌道挫屈

本研究由國內外相關文獻彙整軌道破壞的相關型式，依材料與結構可分成鋼軌與扣件，軌枕，與道碴路基三大類。研究中根據其破壞型態與破壞程度整理出詳盡之列表，以做為未來進行軌道維修與管理相關研究之基礎。

此外，本計畫亦針對軌道挫屈行為進行詳盡之分析與探討。本研究首先以基本之挫屈理論解為基礎，應用有限元素分析加以驗證。研究中以伊利諾大學所發展的 ILLI-BUCKLE 程式為藍本，建立一套更功能更廣、更具有適用性與考慮更多參數之自動化分析程序。進而針對模擬軌道挫屈的有限元素進行一系列分析，並由此分析結果探討各種元素之收斂特性，以決定模擬軌道挫屈的構建方式，其構建方法如圖 9 所示。

本計畫應用研究中所建立之自動化分析程序，構建各種不同組合方式之軌道型式，並以不同參數進行敏感度分析，構建一系列分析之資料庫。由分析結果顯示，影響挫屈載重之變化主要來自於軌道抵抗側向變形之能力，因此主要的控制機制在於道碴系統的側向(Y向)反力

模數、扣件組之側向(Y向)勁度、與扣件組之垂直向轉角(Z向)勁度。

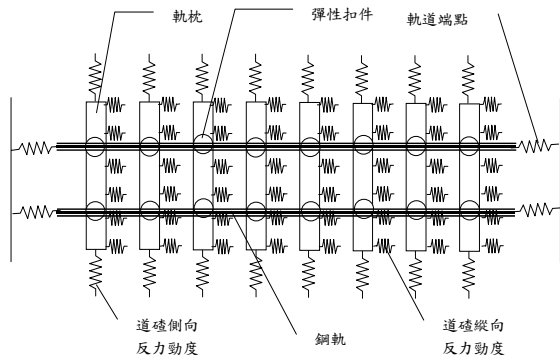


圖9軌道挫屈模擬示意圖

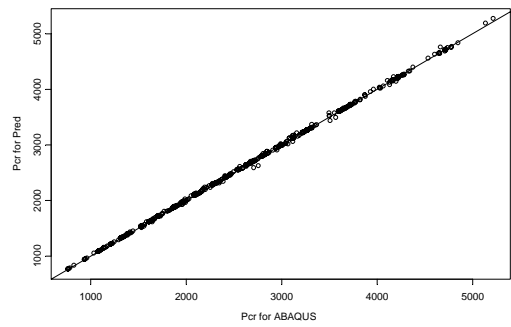


圖10 軌道挫屈預估模式之驗證

接著，本研究觀察軌道挫屈之型式類似於彈性基礎上的樑模式，因而由理論公式之推導過程中定義軌道側向相對勁度半徑 $\ell_R = \sqrt[4]{E_s I_s / U_{22}}$ 。並由因次分析進行參數辨識，獲得主要之無因次控制參數為 L_s / ℓ_R ，其中 U_{22} 為扣件之側向勁度， L_s 為鋼軌之長度。最後並以研究中所建立之資料庫，以迴歸分析配合 Box&Cox 轉換(Box and Cox Transformation)方法，且結合等值側向扣件之觀念，建立軌道挫屈預估模式。其預估模式所計算之結果與 ABAQUS 分析結果之驗證如圖 10 所示，結果非常吻合。

七、TKUTRACK 程式之建立

本研究綜合上述的分析流程以及所建立的調整因子，應用 EXCEL 程式並配合其中的 Visual Basic 編輯器工具，將分析方法建立在 EXCEL 程式下，並以 Visual Basic 編輯一套具有良好使用介面的軌道力學分析程式 TKUTRACK，如圖 9 所示。研究中並將 ABAQUS 程式分析的結果，與本研究所建立之 TKUTRACK 進行計算之結果進行驗證，其結果如圖 10 所示。由此可觀察到應用 TKUTRACK 程式所預估的應力值，與 ABAQUS 程式的分析結果甚為吻合。



圖11 TKUTRACK 程式示意圖

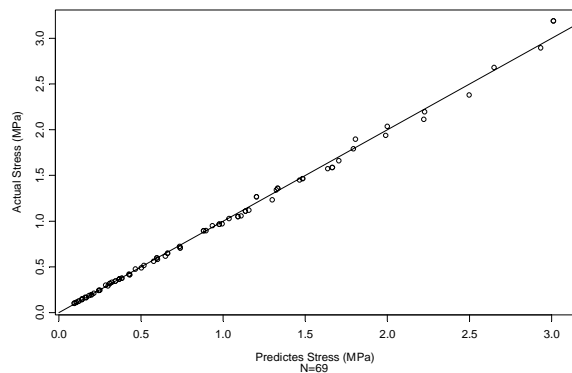


圖12 程式應力計算之驗證

八、結論與建議

8.1 結論

本計畫將現有軌道力學分析所應用的彈性支承樑理論，結合剛性鋪面力學分析方式，擴展為三維軌道力學分析模式之應用。研究中經由因次分析方式並以數值分析加以驗證，確立了軌道力學的主要控制參數。而本研究在有限元素分析方面，完成自動化分析程式之構建，

並以此進行各種元素的收斂特性分析，進而建立軌道結構模型的最佳化構建方式。接著，本研究以過去在剛性鋪面的研究經驗與成果，應用辨識出的主要控制參數，以模式分解再結合的步驟建立新式軌道力學計算程序，並應用投影追逐迴歸分析建立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。

再者，本計畫亦針對軌道挫屈進行詳盡之探討，針對各種分析模式進行收斂特性，並構建軌道挫屈的預估模式。此外，本研究亦完成軌道破壞型態資料彙整的初步研究，以此做為未來後續研究之基礎。最後，本研究整合新式軌道力學計算程序中的所有元件，以 Visual Basic 編輯一套具有良好使用介面的軌道力學分析程式 TKUTRACK。

8.2 建議

本文的研究過程中確立理論與數值分析之環節，未來可應用本研究所奠定之基礎，利用因次分析之方法，以及研究中所構建的自動化分析程序，針對軌道系統更進行深入的研究。本研究以軌道靜力學為分析基礎，進而推展至動態分析。對於未來可由動力學的理论基礎尋找動態反應的主要參數，並以無因次參數之觀念進行研究，探討軌道之振動反應、互制行為與軌枕墊版或其他隔振裝置對系統之影響。並由此基礎為出發點進行更高階之研究，以作為軌道分析與設計之輔助。另一方面，本研究以線性分析為基礎，而研究過程中考慮未來可能應用非線性模式進行分析，因此建構相關的有限元素模型時保留相當的彈性，未來只要針對分析結構中使用元素之相關參數進行調整即可進行非線性行為之分析。

本研究藉由因次分析方式所建立的軌道應力與撓度分析方式並非針對特定個案所完成，因此具備廣泛性與整體性之考量為相較於其他研究的優點。應用時僅需由軌道系統之主要控制參數求得的相關之應力或撓度的調整因子，即可預估任意型態的軌道結構反應。應用此研究方式之特點，未來可在後續研究中可參考過去在剛性鋪面的研究成果，以此建立其他如扣件能力喪失、多版之效應、軌道接頭之結構弱化、或軌道版翹曲之相關調整因子，如此將可使研究更加完備。

參考文獻

1. 黃民仁，陳世芳，*鐵路工程學*，文笙書局，1993。
2. William, W. H., *Railroad Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982
3. 王其昌等，*鐵路新型軌下基礎應力計算*，中國出版社，1987。
4. 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。
5. 吳忻達，*接縫式混凝土鋪面參數分析與驗證*，碩士論文，淡江大學土木工程學系，民國九十二年。
6. 顏少棠，*版式軌道力學分析與應用*，博士論文，淡江大學土木工程學系，民國九十三年。
7. 藍苑綾，*綜合性指標在軌道養護管理系統之應用*，碩士論文，淡江大學土木工程學系，民國九十二年。
8. Lee, Y. H., J. H. Bair, C. T. Lee, S. T. Yen, and Y. M. Lee (1997). Modified PCA Stress Analysis and Thickness Design Procedures, *Transportation Research Record 1568*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 77-88.
9. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, "Getting Started With ABAQUS/Standard : Interactive Version," 2002.
10. Huang, Y. H., *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
11. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, *AREMA Manual for Railway Engineering*, 2001.