



軌道扣件的設計分析與未來展望

鄭永長／國立高雄科技大學機電工程系 教授

徐銘毅／國立高雄科技大學機電工程系 研究生

鐵路車輛為人們經常使用的交通工具之一，除了車輛系統本身的動態穩定性、安全性與舒適性的要求之外，軌道系統穩固性能也是相當重要的。鋼軌的穩固性與列車行駛安全息息相關，然而，強度佳而且壽命長的扣件系統，才能提升鋼軌的穩固性。本文以軌道扣件系統為探討的主軸，以軌道扣件的設計、強度分析為重點進行說明，最後闡述未來有關軌道扣件的發展，以及可以繼續研究的方向。

背景簡介

在先進國家由於工商業迅速發展，人口集中於大都市，原有之交通建設已經不敷使用，故建造高速鐵路提供快捷之交通服務，能解決車多擁擠的問題，縮短城鄉差距提高商業活動。隨著列車速度提升，更須提供乘客一個安全、穩定與舒適度高的行車品質。

除了車輛系統的穩健設計之外，與行車安全以及舒適度息息相關的，就是軌道系統的穩固性能。當列車行經曲線路段時，常常因為列車的蛇行動以及離心力的作用，而

造成鋼軌側移，使得鋼軌產生較大的側向力。也會因為列車的煞車行為，使鋼軌產生縱向作用力。還有，反覆的交通量，也會造成鋼軌垂直方向的動態作用力。為了確保鋼軌的穩定性能，扣件系統則是扮演非常重要的角色。

隨著政府積極發展前瞻基礎建設的同時，軌道產業的各項關鍵議題持續被重視，在 107 年度的軌道產業關鍵議題座談會中，更明確的指出幾項最適合列為我國軌研中心推動軌道產業發展之最優先項目與設備能量之規劃，如圖 1 所示。圖中清楚的顯示，鋼軌扣

優先發展項目之測試需求一覽表

- 前期滿足國產化研究與開發獲得相關實績驗證、性能之檢測需求
- 介面性之檢測能量缺口

| 優先發展項目 | 測試項目需求全貌與現況滿足國際軌道通用標準 (EN、IEC、JIS、CNS) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|--------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| 軌道複合基板 | EN 13146-5 絕緣耐壓 | EN 13146-6 腐蝕 | EN 13146-7 扣夾力 | EN 13146-8 疲勞 | EN 13146-9 動態 | EN 13146-10 靜態 | EN 13146-1 鑰定拔 | EN 13146-2 縱向束制力 | EN 13146-3 扭矩力 | EN 13146-4 衝擊負荷 | EN 13146-5 衰減測試 | EN 13146-6 一段路 | EN 13146-7 整車負載 | EN 13146-8 驗證測試 | 研發用 |
| 轉向架 | UIC 615-4 框架動態特徵分析 | UIC 615-4 框架靜態強度 | EN 13749 框架動態疲勞 | UIC 515-4 乘客車輛與拖車轉向架結構強度 | JIS E 4208 框架受後應力應變檢測 | JIS E 4208 轉向架懸吊系統及彈簧測試 | EN 13798 系統安全因子 | EN 15827 及材料強度 | JIS E 4207 系統強度 | EN 13104 設計條件 | EN 13104 與煞車 | | | | |
| 輕軌號誌轉轍器 列車自動防護 | EN 50205 安全繼電器 | CNS 14546 號誌燈光強度與亮度 | EN 50124-1 絕緣耐壓 | EN 50121-3-2 絕緣耐壓 | EN 50155 電磁相容性 | EN 50125-3 環境模擬 | EN 50125-3 振動與衝擊測試 | EN 50238-3 列車偵測相容性 | EN 13232-4 轉轍器靜力負載 | EN 13232-4 轉轍器百萬次測試 | EN 13232-4 轉轍器保持力與續軌測試 | EN 50128 軟體驗證 | EN 50126 RAMS 驗證 | | |
| 集電弓 | JIS E 6301 電刷板接觸力 | IEC 60494-1 接觸力橫向自然測試 | IEC 60494-1 耐衝擊 | IEC 60494-1 橫向剛度 | IEC 60494-1 氣密性 | IEC 60494-1 弓網維持力 | IEC 60494-1 環境總平均抬力 | IEC 60494-1 集電弓懸吊測試 | IEC 60494-1 耐振測試 | IEC 60494-1 橫向振動測試 | IEC 60494-1 位移 | IEC 60494-1 燃弧 | IEC 60494-1 集電弓性能 | | |
| 車門 | EN 45545 防火耐燃 | ISO 10140-2 隔音量 | ISO 12567-1 隔熱 | EN 14752 水密 | EN 14752 乘客之保持力 | EN 50125 環境模擬 | EN 50125-3 振動與衝擊測試 | EN 14752 耐振動與衝擊測試 | EN 14752 手動開門操作力 | EN 14752 障礙物偵測 | EN 14752 車門閉鎖力 | EN 14752 百萬次測試 | EN 14752 氣密 | EN 14067 空氣動力測試 | |
| 牽引系統 (馬達) | CNS 15588-2 一般溫升 | CNS 15588-2 電性 | CNS 15588-2 噪音 | IEC 61377 扭力 | CNS 15588-2 轉速 | CNS 15588-2 短時間過載 | CNS 15588-2 溫升測試 | CNS 15588-2 振動 | CNS 15588-2 牽引系統 (馬達) 驗證測試 | IEC 61377 效率 | IEC 61377 系統保護 | | | | |
| 車輛儲能與配合C3 電力 土建檢討 後續推動 | IEC 62620 電性測試 | IEC 60623 環境測試 | EN 61373 振動測試 | EN 61373 衝擊測試 | IEC 62619 落下測試 | IEC 62619 撞擊測試 | IEC 62619 內部短路測試 | IEC 62619 延燒測試 | IEC 62619 延燒測試 | IEC 62619 延燒測試 | IEC 62619 延燒測試 | IEC 62619 延燒測試 | IEC 62619 延燒測試 | IEC 62619 延燒測試 | IEC 62619 延燒測試 |

圖 1 軌道研究中心優先發展規劃示意圖

件系統的縱向束制力、扭轉力、扣夾力與疲勞測試被列為現階段的研究重點之一。由此可知，如何建立軌道扣件的研究能量與知識，在現階段是非常重要的。本研究將介紹常用的扣件種類，分析扣件時所使用的測試法規，最後探討扣件的一些未來發展。

軌道扣件系統介紹

一般而言，扣件系統大致上包含以下幾個元件：鋼軌 (rail)、軌枕 (sleeper)、扣夾 (rail clip)、螺栓 (bolt with washer)、墊片 (rail pad)、墊塊 (gauge plate)。如圖 2 所示^[1]。不同形式的扣夾則搭配不同的墊塊與固定方式。依據形式的不同，大致上可以分成以下幾類^[2]：

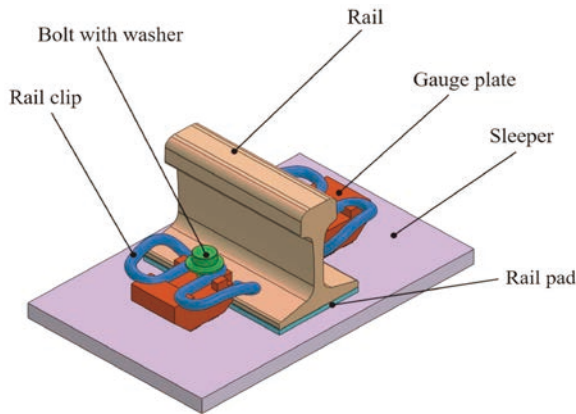
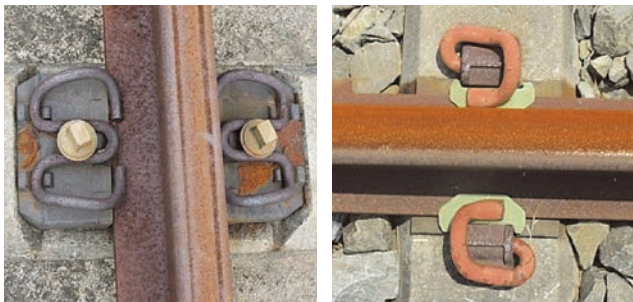


圖 2 軌道扣件系統示意圖

(1) 混凝土枕扣件系統：這一類型的扣件系統大多使用彈性扣件 (elastic fastening)，扣夾本身是金屬材質，藉由扣夾所具有的彈性與剛性，搭配其他組件，如鎖固螺栓，墊塊，即可將鋼軌穩固地固定在軌枕上面。目前常見的大概有 Vossloh 扣件、Pandrol 扣件，如圖 3 所示。



(a) Vossloh 300 型

(b) Pandrol e 型

圖 3 混凝土枕扣件系統

(2) 木枕扣件系統：使用在木枕系統上面的扣件，大多使用道釘進行鋼軌與枕木的固定，為了避免道釘的抗力不夠，受到衝擊振動時會逐漸被拔起，而改用彈簧道釘，利用其彈性緩和衝擊作用力。一般的道釘如圖 4 所示。



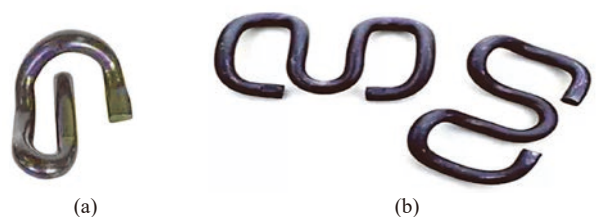
圖 4 道釘系統

(3) 彈性基鈹或直接固定式扣件系統：彈性基鈹設計採三明治的形式，上、下鈹材質為鑄鐵，上、下鈹間是橡膠彈性材，以良好之熱接方法連結成一體，除基鈹底部及錨錠螺栓扣鎖處採防蝕塗料處理外，其它部位均採彈性材料進行整體包覆設計。於鋪設無碴軌道工程中，鋼軌固定在鋼筋混凝土基座上或鋼構上之扣節裝置之材料。如圖 5 所示。



圖 5 彈性基鈹系統

在各種軌道扣件系統中，在台灣常見的扣件有兩種類型，如圖 6 所示。在圖 6(a) 中，扣夾型式為 Pandrol e 型，經常用於台鐵路線系統。在圖 6(b) 中，扣夾型式為 Vossloh 型，經常用於捷運路線、高速鐵路路線。



(a)

(b)

圖 6 台灣常見軌道扣件種類

扣件系統的測試與設計分析

扣件系統的測試

在扣件系統中的扣夾，是經過許多機械加工程序而產出的，然而在這些複雜的生產程序後，為了確保扣夾可以有效地且穩固地將鋼軌固定在軌枕之上，這些扣夾必須要通過一些法規測試，方可無虞的使用在正線上。有關扣件系統的測試法規，大致上是依據 EN 13146 扣件試驗標準 (Test methods for fastening systems)。在這個法規中總共包含了 10 個測試項目^[3]：

- Part 1: Determination of longitudinal rail restraint (縱向鋼軌束制檢視)
- Part 2: Determination of torsional resistance (扭轉阻抗檢視)
- Part 3: Determination of attenuation of impact loads (衝擊負載衰減檢視)
- Part 4: Effect of repeated loading (反覆負載的效應)
- Part 5: Determination of electrical resistance (電阻抗)
- Part 6: Effect of severe environmental conditions (惡劣環境條件效應)
- Part 7: Determination of clamping force (扣夾力檢視)
- Part 8: In service testing (運轉試驗)
- Part 9: Determination of stiffness (剛性檢視)
- Part 10: Proof load test for pull-out resistance (抗拉力的驗證負載測試)

扣夾元件在通過這些法規測試後，代表不管在材質上，機械性質，或電阻抗性質上，都可以滿足設計要求，如此才能正式投入運轉。

扣件系統的設計分析

目前有關扣件的研究，大致上可以分成軟體模擬分析、實驗測試分析兩大部分，依照不同的規範要求，大約可以分成幾個方面：

- (1) **結構強度分析方面**：以扣夾為分析對象，依據測試法規 EN 13146-1, EN 13146-2, EN 13146-3, EN 13146-7, EN 13146-9 進行有限元素分析，探討扣夾本身的應力、變形量。在這個方面的研究，首先利用 3D 繪圖軟體，繪製扣夾的 3D 模型，根據不同

的測試法規，設定外力與邊界條件，給定扣夾的材料性質參數，將整個系統進行網格切割，最後進行有限元素的求解。研究的結果如圖 7 所示^[1]。

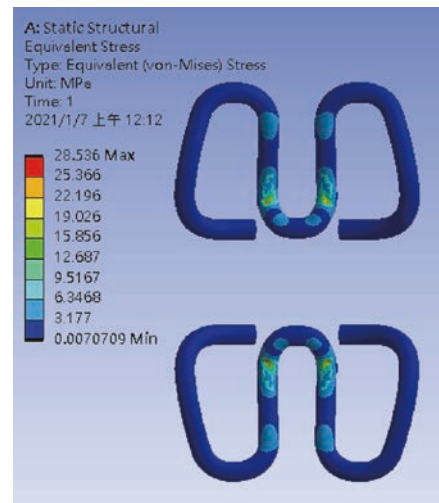


圖 7 扣件系統有限元素分析結果

- (2) **實際測試方面**：以扣夾為分析對象，依據測試法規 EN 13146-5，進行扣件的阻抗測試。依據測試法規 EN 13146-6，給定環境的條件設定，例如：溫度、濕度、鹽分…等等，進行扣件的環境測試。依據測試法規 EN 13146-10，進行扣件與軌道系統的抗拉負載測試。最後，依據測試法規 EN 13146-8，將扣件安裝於測試路線上面，以固定的交通量進行試運轉測試。
- (3) **疲勞壽命與安全性分析方面**：扣件在實際應用上，很重要的是使用壽命，依據測試法規 EN 13146-4，給定扣件系統反覆的作用力，進行扣件的疲勞分析，可以預估扣件的使用壽命以及疲勞安全係數。相關的研究結果如圖 8 所示^[1]。

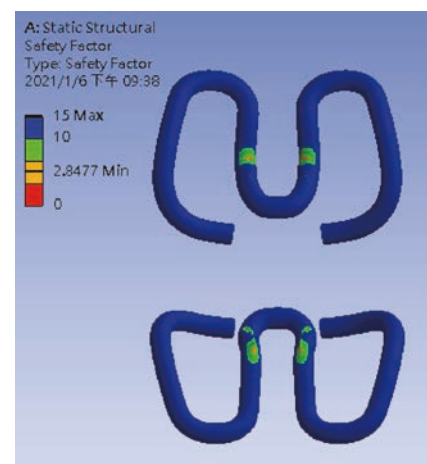


圖 8 扣件系統疲勞安全係數分析結果

(4) 振動模態分析方面：扣件主要的功用，是將鋼軌固定在軌枕或道版上面，當列車通過時，扣件系統受到動態的作用力，因此，除了進行疲勞分析、衝擊力的分析之外，還必須考慮共振頻率，如果外力的頻率與扣夾本身的自然頻率接近，則將會引發系統的共振，也會導致扣夾破壞而斷裂。扣夾的自然振動模態如圖 9 所示^[4]。

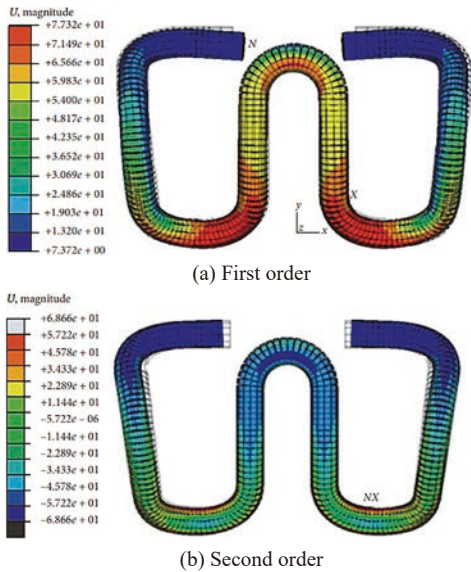


圖 9 扣夾的振動模態

未來發展

扣件應用在軌道系統中，讓鋼軌得到良好的固定與定位，從早期的木枕道釘，發展至現今的彈性扣件，還有彈性基鈹的組合。在材質與外型上皆有很大的進步，未來隨著高速鐵路的速度提升，車輪作用在鋼軌上的力量也將增加，此時鋼軌的定位與穩固性，也是相當值得去研究的。

在往後的扣件設計、研究與產品開發的過程中，除了模擬分析和實際測試，在初期的設計階段，可以加入實驗設計與最佳化的程序。為了同時可以滿足多項的法規要求，需引入多目標最佳設計的概念，這樣方可同時兼顧到多種性能，在設計的初期節省開發成本。待扣夾尺寸外觀確認後，在進行模型加工製作，最後進入實驗測試階段，不僅可以節省人力，也可以縮短開發的時程。

結論

軌道的扣件系統自從軌道車輛發展至今，就是一直在演化與進步，為了符合車輛速度的提升，扣件系統也必須提供更強而有力的穩固性能。除了現有的扣夾型式以外，仍不斷地設計出更快速結合與拆裝的扣件系統。在扣件材質的發展方面，為了可以讓鐵路車輛在更嚴峻的環境中行駛，並且因應極端氣候，扣件的材質必須做些調整與改變，結構的設計也是在滿足不一樣的需求，滿足更新的挑戰。這些新款式的扣件只要可以通過測試法規，未來將可安裝在正線上，讓乘客有更好的乘車舒適性與安全性。

參考文獻

1. Yung-Chang Cheng, Chen-Ming Kuo, Cheng-Kang Lee, Min-Sheng Xie (2021), Optimization design of rail clip in Vossloh fastening system by uniform design and grey relation analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 235(21), 5639-5652.
2. 黃民仁、張欽亮 (2017)，新世紀鐵路工程學：基礎篇，文筆書局股份有限公司。
3. EN 13146: 2002. Railway applications—Track—Test methods for fastening systems. 2002.
4. 呂立依 (2016)，軌道扣件振動特性研究，國立成功大學土木工程學系，碩士論文。



土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。