



# 脫軌事故原因調查經驗分享

郭振銘／財團法人鐵道技術研究及驗證中心 執行長

李鎮宇／台灣電力公司林口發電廠土木工程 專員

近年來台灣努力提升運輸安全，106 年臺鐵三民站普悠瑪列車出軌事故堪稱為以科學方法專案配合工程專業進行鐵路重大事故調查之濶觴。運用事故現地調查資料，開發特殊試驗收集枕木握裹道釘拉拔力，建立有限元素分析模型，估計輪軌橫向力造成軌距擴大，在進一步使用軌道車輛運動分析軟體模擬事故路線與列車通過情境，判斷脫軌可能原因之合理性。嚴謹度正確性容或有待商榷之處，產官學研合作的模式與寶貴的經驗，值得分享推廣與超越。

儘管 PC 枕已經逐漸取代傳統木枕，然而仍存在於側線的木枕年久失修被懷疑是脫軌事故的原因。為了提升鐵路事故調查的品質，接軌先進國家運輸安全調查的嚴謹度，交通部鐵道局與成大土木軌道工程實驗室合作，結合軌道車輛運動分析軟體、力學理論、現地試驗、有限元素分析，證明道釘在腐朽木枕中的抗拉拔力下降，確實可能導致列車通過時鋼軌鬆動發生落軌意外。

## 事故說明

106 年 10 月 24 日由玉里往花蓮方向的列車行經三民站擬進入第 4 股道待避列車交會（圖 1）。行經第 18 號轉轍器處，司機員察覺列車有異常拉扯，立即緊急停車，惟第 2 車至第 6 車已出軌（圖 2）。



圖 2 事故現場照片 [1]

根據列車 ATP 紀錄實際發生脫軌時車速僅 37 km/hr 並未超過該道岔區速限 45 km/hr，顯然有線形以外的影響導致脫軌。由於出軌事故區間（第 18 號道岔）銜

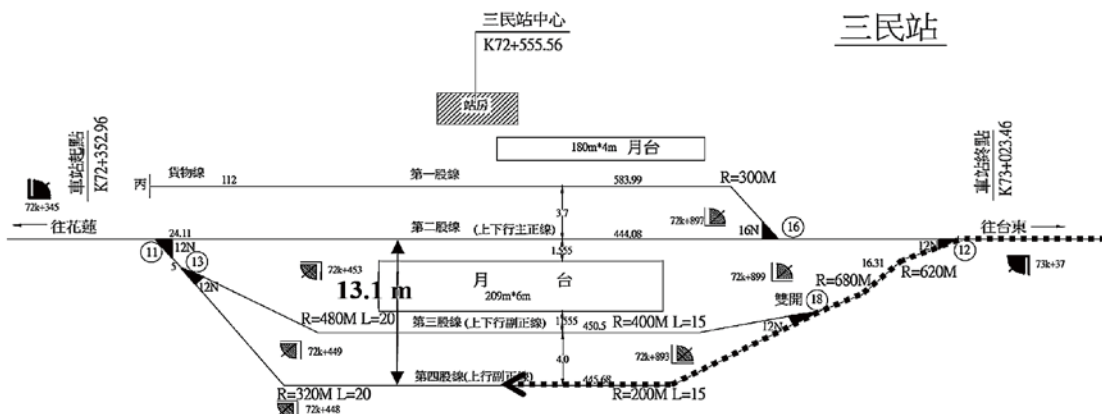


圖 1 三民站路線圖 [1]

接雙開道岔形成反向曲線之特殊線形脫軌風險，以及計有數十根枕木腐朽損壞，道釘抗拉拔力可能因而下降，列車通過時造成鋼軌外翻、軌距擴大等現象。

### 軌道車輛運動分析

由於短時間內無法完整獲得普悠瑪車輛參數建立穩定車體模型，因此借用 Simpack 已具抗橫向和蛇行穩定性之內建車輛模型（圖 3）。唯該車輛為 1,435 mm 軌距車輛，採用 UIC S1002 鋼軌。

模擬車輛以不同車速通過兩組道岔組成的彎道，發現當車速達到 54 km/hr 即於事故現場 2 號與 3 號車廂中間附近發生脫軌。據此分析結果檢視該道岔區速限為 45 km/hr 確為合理與必要。根據列車 ATP 紀錄實際發生脫軌時車速僅 37 km/hr，顯然有線形以外的影響導致脫軌。

以事故發生之 37 km/hr 車速行經不同鋼軌外翻角度之路線，分析結果發現當軌距擴大為 79 mm 即發生車輛脫軌。

現地道岔 30 個軌距量測值顯示，彎道最大軌距加寬量為 48 mm；75 百分位加寬量為 37.5 mm。以最大彎道軌距加寬量 48 mm 計算，車軌橫壓造成軌距擴大達到  $79 - 48 = 31$  mm，根據模擬分析即發生脫軌。

### 軌框有限元素模型

為瞭解道釘抗拉拔力對軌距擴大之間的關係，以分析軟體 Staad.Pro 建立軌枕間距 400 mm 之模型，軌枕節點

另以垂向、縱向、及側向彈簧模擬道岔提供之束制與承載力。道釘提供鋼軌抵抗側翻的力矩則以旋轉彈簧模擬。有限元素模型以梁元素組成鋼軌，因此鋼軌受力必須轉移至其質心（圖 4）。模型外觀與有限元素模型如圖 5。

約束軌枕之彈簧勁度分別根據臺鐵道岔側向、縱向阻力規範、及容許垂直位移量推估。垂向力則考慮普悠瑪車廂重及乘客重量，車速產生的動態效應則以動力係數概估。模型以旋轉彈簧模擬道釘提供鋼軌抵抗側翻的力矩。由於國內尚無道釘拉拔試驗數據，因此特別設計治具進行現地道釘抗拉拔力試驗。

### 道釘抗拉拔力試驗

為瞭解木枕腐朽嚴重程度與數量，對軌距擴大大量的影響。將木枕腐朽程度造成道釘不同程度的鬆脫，區分為四個等級（圖 6）。每個等級至少拉拔三支道釘，合計進行 13 次拉拔試驗（圖 7）。實驗結果呈現「完好」的木枕道釘拉拔力明顯超越其他等級，「堪用」、「勉強堪用」與「腐朽」間差異並不顯著。由於木材並不是均質的材料，木枕內部空洞或纖維疏鬆也無法從外部觀察出來，目視裂紋狀況與道釘最大拉拔力不完全相符。即使同一根木枕，不同位置的拉拔力也可能不同。根據現地試驗結果整理出腐朽程度不同的道釘勁度如表 1。

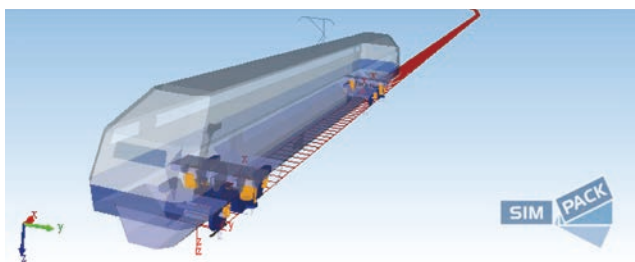


圖 3 本分析採用之車輛模型

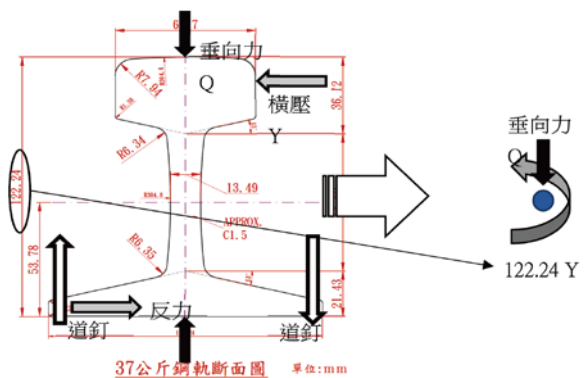


圖 4 鋼軌受力分析<sup>[2]</sup>

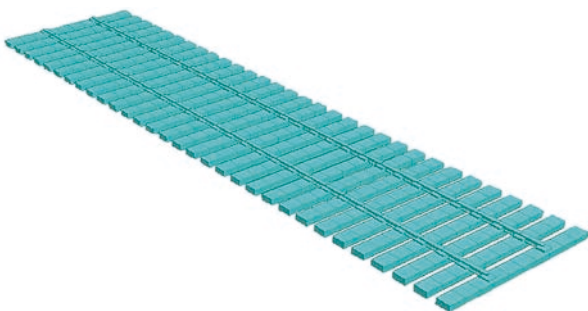
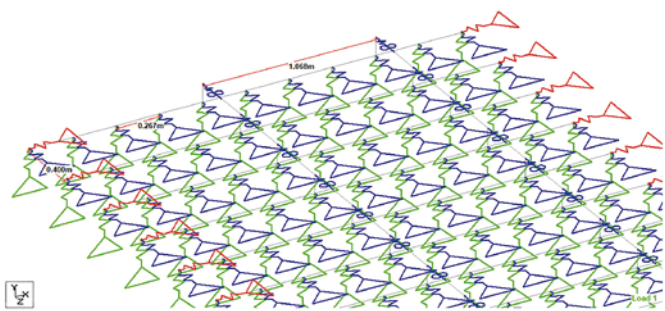


圖 5 以 STAAD.Pro 建立之軌框模型<sup>[2]</sup>



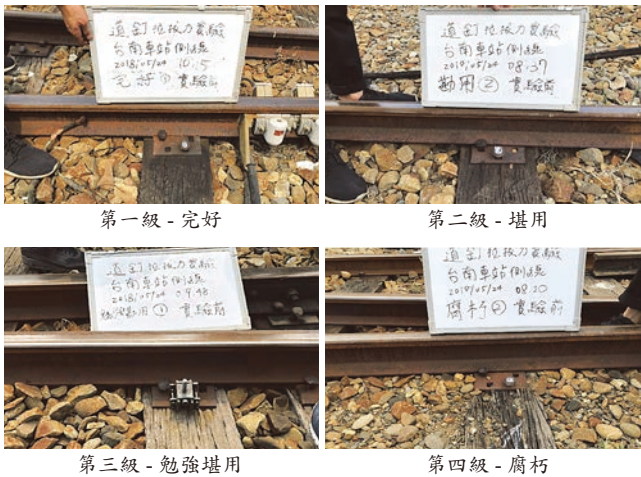


圖 6 木枕分級 [2]



圖 7 現地實驗照片 [2]

表 1 腐朽程度與道釘勁度對照表

腐朽程度	道釘勁度 (kgf/mm)	道釘鬆脫力量 (kgf)	旋轉彈簧勁度 (kN-mm/deg)
腐朽	108	216	276
勉強堪用	191	382	489
堪用	203	406	519
完好	445	890	1138

### 力學分析結果

初步結果圖 8 顯示全部枕木均屬嚴重腐朽的情況下，65 kN 橫壓力將導致軌距擴大量遠超過本分析案例之脫軌臨界線 31 mm。若全部枕木道釘拉拔強度僅剩 25%，而其中連續七根枕木嚴重腐朽道釘強度降至 5%，軌距擴大量亦高達 30 mm，達到瀕臨脫軌的嚴重狀態。

軌枕老化道釘抗拉拔力降低 50%，轉向架軸間七根枕木腐朽的情況，僅剩 7 mm 餘裕瀕臨脫軌，是否足夠包容連日降雨造成路基鬆軟及軌道不整等尚未考慮的因素，仍非常值得憂慮。

圖 9 顯示在脫軌係數 0.5 較小橫向力作用下，僅所有木枕腐朽之道釘受力超越最大拉拔力；當脫軌係數增加到 0.7，除了全部完好的枕木沒有被拔出之外，其餘等級枕木道釘均超越最大拉拔力呈現拔出與鋼軌外翻。

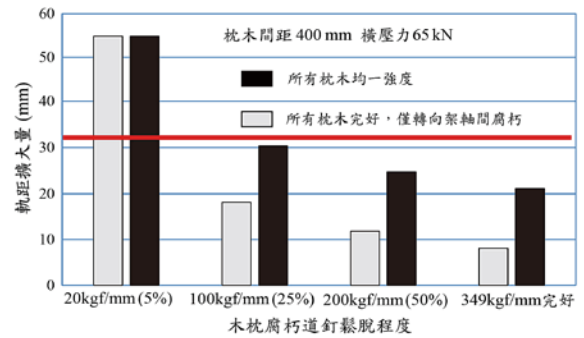


圖 8 枕木腐朽程度與範圍對軌距擴大量之影響 [2]

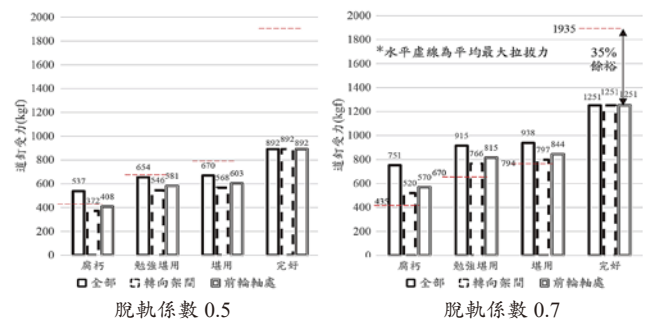


圖 9 木枕腐朽位置與程度影響道釘受力 [2]

比較同一種腐朽程度但發生位置不同，發現比較常見的零星分散的腐朽木枕，造成脫軌的機率也不大。連續數根木枕均腐朽才是脫軌的高風險群，因此鐵路養護單位若發現連續數根木枕腐朽應該立即抽換。

### 總結

結合實際需求，面對未曾思考過的難題，讓團隊成員練習運用專業學識及科學方法，提出可以檢驗論證的說明，是一次非常有意義的經驗及進步。不論從學術研究、人才培育、運輸安全、調查技術等面向，都有不同程度的收穫與突破。

雖然木枕與道釘是古老的技術，也正在逐步淘汰中，但是這個調查經驗不僅進一步跨入鐵道車輛與軌道關係的 domain knowledge，也建立了克服困難勇於嘗試的信心。尤其是綜合使用了多體機構運動分析、有限元素分析、鐵路養護規範、力學理論歸納、特殊治具設計、現地試驗、分析情境研擬與判讀等等方法及階段，希望鼓勵更多學者率領研究團隊，接軌實際需要解決的問題，不論問題是否尖端前瞻，即使是冷僻傳統領域。都是多贏的結局。

### 參考文獻

- 交通部鐵路重大事故專案調查報告 106/10/24 臺鐵三民站正線出軌事故專案調查報告 (2018)。
- 李鎮宇，枕木道釘拉拔力對行車安全之影響，碩士論文，國立成功大學土木工程系 (2018)。