



軌道路線結構之性能品質升級

林智強 / 國立高雄科技大學土木工程系 助理教授

臺灣鐵道路網發展已相當完整，鐵道運輸包含每日通勤、商務出差、觀光旅遊…等交通量，其中觀光路線以臺鐵的環島路網最具有其特殊價值，而臺鐵已營運 135 年，其路線與車輛條件等，皆是相對其他鐵路營運單位老舊與複雜，因此需要結合新的技術來提升列車營運速度，進而提升觀光與安全，並可帶來更大的經濟效益。鐵道技術在近幾年蓬勃發展，若要能夠提升列車速度，除了車輛本身性能須具備外，其他相對的軟硬體也需配合，其中路線條件是關鍵之一，而臺鐵路線複雜度相當高，沿線包含路堤、橋梁和隧道段，尤其路堤段較長而問題也相對較多，路線上的提速關鍵在於彎道，彎道的設計與其線形和列車特性都有相關，有基本的理論與模擬可輔助，但應用於實際路線上時仍須考量其現地特性，現今可結合新的工程技術與設備，提高路線穩定性，讓軌道運輸更加安全與快速。

軌道路線的現況

臺灣擁有多種的軌道運輸系統，包含高速鐵路、城際鐵路、都會捷運和都市輕軌，其運輸特性皆不相同；最直接可從營運長度、最高的營運速度以及平均營運速度來說明這些運輸系統的差異，簡單整理四種運輸系統的代表如表 1 所示，表中可看出營運路線最長的是臺灣鐵路（簡稱臺鐵），台灣高鐵（簡稱高鐵）則是最高營運速度和平均營運速度皆為最快；從表中亦可知各軌道運輸的主要土建形式，其中高鐵在全路線上的土建工程中，橋樑或高架橋段約佔全路線的 73%，另外隧道佔全路線的 18%，其餘 9% 則是採用

路堤或路塹型式，而台北捷運和高雄捷運也類似的方式在靠近都會區的位置採用地下段為主，到路線的末端位置採用高架橋為主，而部分路段和在機廠附近則有部分的土堤段；輕軌主要是服務都市較為核心的地區，加上其路線與一般道路混合使用，因此路線皆為平面。

由於臺鐵的路線是最長的，且也是唯一可環島的路線，本文將以臺鐵為主探討軌道結構性能。運輸安全是最優先的基本考量，而路線品質更是最直接影響到安全，臺鐵在路線上主要為土堤段，而土堤結構如圖 1 所示，從位於最上方依序往下的是鋼軌、扣件系

表 1 軌道運輸系統之代表與基本特性

項目	台灣高鐵	臺灣鐵路	台北捷運	高雄捷運	高雄輕軌
運輸系統屬性	高速鐵路	城際鐵路	都會捷運	都會捷運	都市輕軌
營運路線土建主要形式	高架橋	路堤	高架橋、地下段	高架橋、地下段	平面路段
營運長度 (公里)	350	1,065	146.2	42.7	14.63
最高營運速度 (公里/小時)	300	130	80 70 (文湖線)	80	50
平均 營運速度	200 (直達車)	90 (自強號)	35	35.15	20

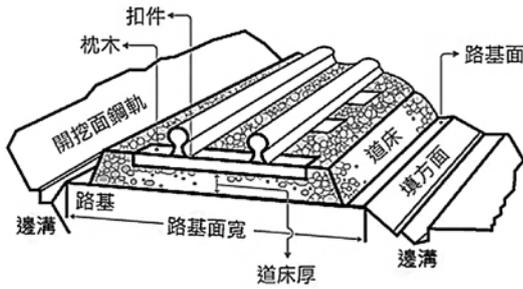


圖 1 臺鐵土堤段路線結構

資料來源：<https://www.railway.gov.tw/tra-tip-web/adr/about-1-5>

統、軌枕（枕木）、道碴（道床）、次道碴和路基，各個構件皆有其力學特性以及其常見之問題；對於鋼軌而言，在路線上目前常使用長焊鋼軌，其優點在於消除鋼軌接頭，然而依據長焊鋼軌理論可知，長焊鋼軌的中間為不動區間，在兩端末位置為可動區，因此會在端末位置設置伸縮接頭，在特定路段上常因為列車載重、路基條件不良或是鋼軌焊接品質不良導致鋼軌產生斷裂；扣件系統之所以稱之為系統則是因為目前使用於軌道上有許多種類，臺鐵最常使用的則是 E 型鋼軌扣夾，其主要的優點為易於施工養護；軌枕與道碴層，一般路線以有無使用道碴分為有碴軌道與無碴軌道，臺鐵路線上大多數採用有碴軌道如圖 2，只有在新建的路線或是特定的路線上採用無碴軌道，以臺鐵的無碴軌道來說，常見的有版式軌道和 PC 直結式防振軌道如圖 3 所示，其優點在於軌道下部結構採用混凝土整體澆置而成，強度上相當高且大大降低維護成本，因此也稱之為省力化軌道，雖然優點相當多，但是考量路線現場施工，以及混凝土需要養護時間，會影響到列車日間的營運，目前較常用於新建之路線上，導



圖 2 臺鐵道碴軌道



圖 3 臺鐵無碴軌道（左至右依序為版式軌道和 PC 直結式防振軌道）

致路線上會有出現有碴與無碴軌道交界的位置，此位置亦為軌道結構勁度變化段，是需要相當注意的位置；最下層為路基其承載了上部所有的作用力，其最需注意的是當噴泥現象發生時，會導致路基的土壤被掏空，使得路基失去承載能力影響到路線安全。

在 2021 年提出宜花東快鐵的構想，期望在臺鐵的既有路線上將營運速度提升至每小時 160 公里，列車速度的提升需要全方面的考量，從軌道、車輛、電力、號誌... 各方面都需要衡量，近期鐵道局亦有「宜花東地區鐵路提速計畫可行性研究」計劃案進行中，其主要在探討 1,067 公厘軌距下的提速技術以及作業指引，本文將以列車提速之觀點探討軌道性能品質升級。

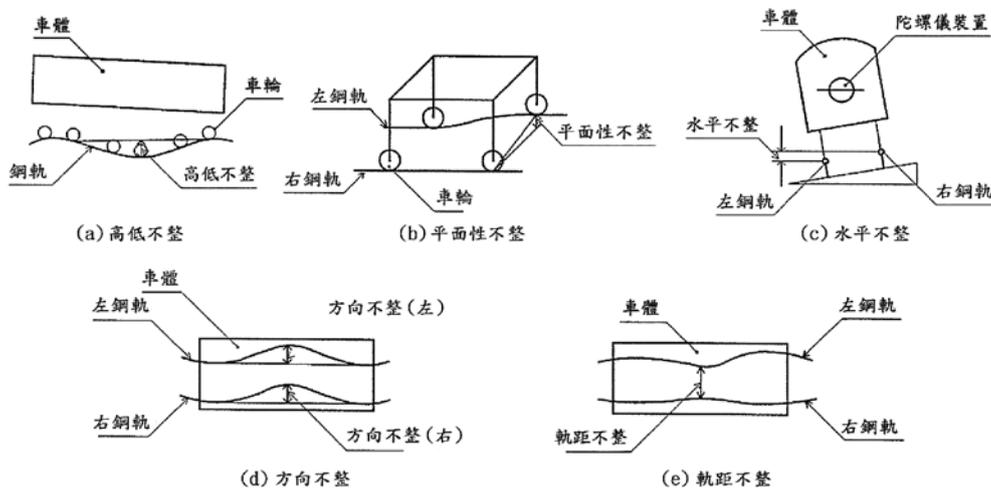


圖 4 軌道路線五大線形（資料來源：交通部鐵道局 FB 專頁）



圖 5 臺鐵台中高架路段

資料來源：Newtalk，鐵路高架噪音擾民／台中市府限期台鐵局提改善計畫

軌道線形與結構之探討

軌道路線考量五大線形，分別是軌距、高低、水平、方向以及平面性不整量如圖 4，這五種的不整量，都會直接影響到列車營運的安全，所以鐵路營運單位對於軌道的養護皆以此五種線形作為養護目標，由於路線長度很長無法每一個地方都使用人工進行確認，因此營運單位會有軌道檢測車，透過其動態式的檢測，來確保路線的線形。

列車沿著軌道路線前進，除了土堤段外，會經過高架路段以及隧道段，部分高架路段會穿過市區中心如圖 5，台中段之高架路段已造成附近居民的抗議，主要式列車通過時會產生振動與噪音，影響到沿線居民之生活，若是提速後可想而知噪音與振動勢必會有加劇的趨勢。

臺鐵許多隧道都相當老舊，受到經年累月的地震以及其他自然作用下，使得隧道壁體不再安全如圖 6，而列車以較高的速度通過時，所產生之振動可能會間接的干擾道隧道結構。

臺鐵列車種類相當多，從臺鐵的統計資料在 111 年 2 月的月報^[1]，統計電力機車有 83 輛，推拉式電力機車有 62 輛，電聯車有 1,279 輛，柴油機車有 16 輛，柴電機車有 90 輛；且車種的特性差異也不少，目前最新的自強號為 EMU 3000 型採用固定 12 編組，最新的電聯車為 EMU 900 型採用固定 10 編組，此兩種皆為新款車種且營運車速都採用每小時 130 公里，而目前長距離的主力車種為 PP 自強號、太魯閣號以及普悠瑪號，這三輛除了 PP 自強號以外，另外兩輛都是傾斜式列車且都採用 8 編組，編組數量的差異直接影響到載客

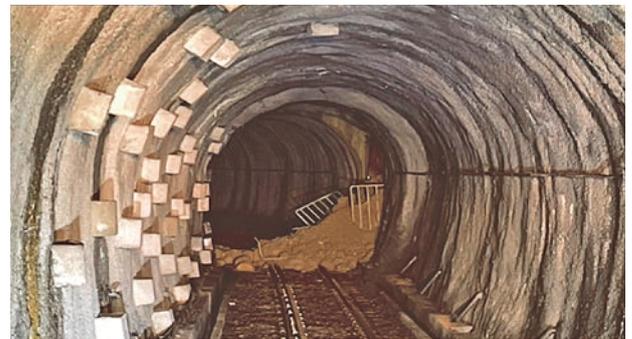


圖 6 臺鐵集集支線隧道路段

資料來源：自由時報，集集線土石入侵／台鐵局：集集一車埋估 8/20 恢復通車

量；由上述可知車輛種類多，對於軌道的需求也有所不同，從列車提速考量路線性能可能考慮的因素如下：

1. 車輛加減速性能差異、
2. 列車誤點率、
3. 快速通過月台問題。

由於各種列車的加減速性能有差異，但皆運行在相同之路線上，會使得路線容量降低，直接導致運輸量無法提升；再加上各列車的編組數量不同，車門數與位置皆不相同，列車在靠站等待旅客上下車的時間也有差異，這些都反應到誤點率。

當列車過彎時由於離心力之作用，會使得列車往軌道外側偏移，因此在彎道段是較為危險的，而傾斜式列車可降低此偏移，提高一些安全餘裕，相對的可以較高的速度過彎；由於臺鐵路線上會經過月台，由於臺鐵的月台形式常見有兩種，分別是島式月台以及岸壁式月台如圖 7，在月台會分為通過線以及側線，側線亦可稱之為待避線，其功能為當通過線有列車要追越時，待避車可暫時停靠之路線；通過線主要是當快

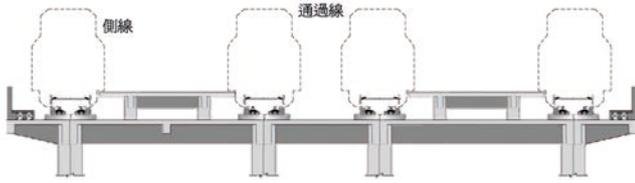


圖 7 島式月台一般配置

車不停靠此站時，會以高速通過月台，此時也是較為危險的狀態，尤其是當通過線之月台位於彎道段時如圖 8 所示，依現有的規定在通過這樣的路線時，需要降低車速，然而以高鐵為例，其通過線是完全不靠月台，這樣可以確保列車在高速狀態下穩定的通過。

軌道性能提升

為了列車能夠提高速度，軌道性能須提升，由先前可知道會面對於軌道上的課題如下：

1. 路線上勁度變化
2. 路線之高架段與隧道段結構安全
3. 路線上月台之顧慮
4. 車速提升後對於軌道所產生之振動與噪音問題
5. 列車過彎時的安全疑慮
6. 列車與軌道本養護成本提高

首先對於臺鐵之路線，其基本考量軌距、線形、路線土建形式、車輛構件 … 等，這些條件若是要配合列車車速提升，其改善之成本都是相當高的，然而對



圖 8 彎道月台

於達成營運後之效益恐怕不高；對於路線上的勁度變化、高架段之振動噪音、隧道段之結構安全，皆可採用工程補強的手法，並配合監測來確保列車營運時的安全，常見的工程補強如下：

1. 橋墩擴柱。
2. 橋板或危險處以鋼板包覆。
3. 增設防落托座。
4. 高架路段增加隔音罩或新音材，降低噪音影響。
5. 隧道壁湧水，可採排水工法和止水工法，常見止水工法如灌漿工法、冷凍工法 … 等。
6. 隧道口邊坡滑動，可做邊坡穩定工程，並加長隧道口之結構。

上述的一些方式皆可提高列車提速通過時的安全性，對於彎道段則須進一步探討；由先前論述可知，若列車提速其軌道性能提升之關鍵在於彎道段，依據曲線限速理論^[2]其公式如下：

$$V = \sqrt{127R \left(\frac{G}{2fH} + \frac{C}{G} \right)}$$

式中 V 為車速、 R 為曲線半徑、 G 為軌距、 C 為超高、 H 為車體重心高度、 f 為安全係數，若考慮軌距為 1,067 公厘，超高為臺鐵最大超高 105 公厘，車體重心高度採一般高度為 1,700 公厘，而安全係數則是代表了列車是否在彎道上容易傾倒的關鍵，當安全係數等於 1 時，其表示列車在過彎時，其重心方向剛好位於內軌上方，此狀態可以說是最危險的，也就是列車剛剛好平衡在內軌上，只要有稍微一點點的外力作用，列車隨即脫離軌道造成翻覆，因此安全係數若是越高，則表示列車在過彎時的重心越接近內外軌的中間，也就是軌道中心線的位置，此時列車越穩定，一般考量安全係數以重心壓在內軌與軌道中心線三分之一處為安全界線，此時安全係數值為 3。考慮列車提速至每小時 160 公里，並考量安全係數為 1 和 3，以及臺鐵所規定曲線限速其公式如下，而三者的比較如圖 9 所示。

$$V = 4.16\sqrt{R}$$

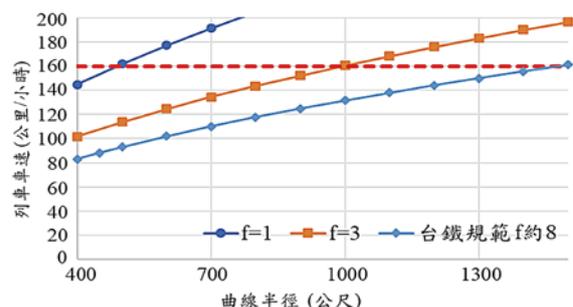


圖 9 曲線限速比較

比較曲線限速理論與臺鐵規定之曲線限速公式，可推估後者的安全係數考慮大約為 8，由圖上可知當對應時速 160 公里（圖上紅色虛線）可發現規定之限速相當嚴格，若將低安全係數來到 3，可用快速通過曲線半徑為 1,000 公尺的彎道，但理論忽略了很多路線上可能有的其他狀況，如先前所述的噴泥、五大線形不整量... 等等，由此可知若是路線使用既有的線形設計，即使列車速度得提升，考慮安全的角度並無法在彎道上取得較高的通過速度，由理論可知若是不改變路線的狀態，只能從車輛的角度來改變車體重心高度，以獲得更高的過彎速度；倘若路線得以修正，能夠截彎取直即加大曲線半徑，則列車過彎速度可獲得提升，若是需要在既有的路權上加以修正，則需要考量加大超高度，假設超高度由原本的 105 公厘提高至 120 公厘，可計算出整體車速在各曲線下皆可提升 4.98%。因此若列車提速需要針對軌道路線、高架段、隧道段、月台... 等，作整體性的考量。

結語

軌道運輸是在台灣生活中是不可或缺的，軌道運輸的可靠度也間接地影響著經濟發展，因此如何在安全的

條件下，提升列車車速，軌道路線扮演著重要但又低調的角色。軌道路線會面臨到不同的地形條件，也發展出不同的軌道結構形式，一般路段上採用土堤，遇到山谷則採用高架，遇到高山則採用隧道，考慮提速時都會產生額外的振動噪音問題；當列車提升速度通過月台，其列車的晃動會比原有的預期還更大，對於列車的動態行為需要再確實掌握，避免接觸到月台，倘若是會接觸到月台，卻又無法修改月台，則需降速通過對於曲線段也有此降速問題，最終即使列車可以在直線段提速至時速 160 公里，卻因路線上遇到彎道和月台降必須降速，對於整體旅程時間的降低是相當有限的。列車提速會對軌道產生更大的衝擊力，而路線上的有碴軌道是需要仔細審視其是否能承受，若需要加強道碴軌道之承載力，期望可透過國內相關學術機構、財團法人研究單位進行研發，並連結產業帶動國內軌道產業發展，期望可達到列車提速的目標。

參考文獻

1. 交通部臺灣鐵路管理局，臺灣鐵路統計月報（2月），2022。
2. 黃民仁、張欽亮，「新世紀鐵路工程學（基礎篇）」，文笙書局，2017。

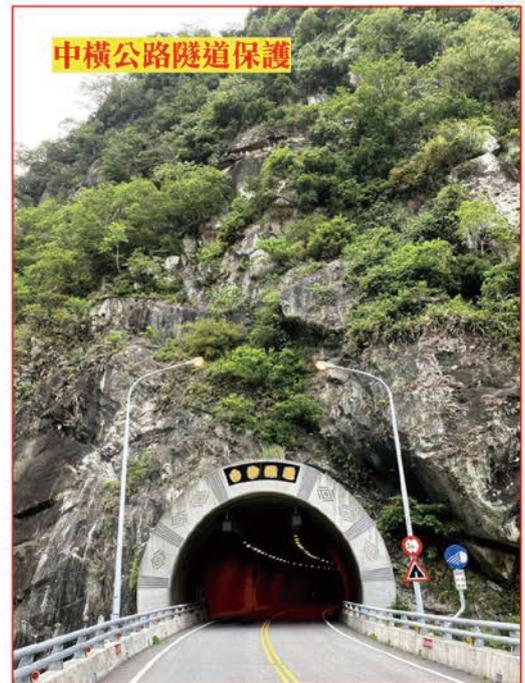


裕鼎工程科技有限公司 Yudee Eng. Science Co., Ltd.

新北市板橋區文化路二段88號18樓 Tel:(02)2257-3939 Fax:(02)8252-1243

E-mail:yudee53416941@gmail.com

掛網岩栓護坡



高強度性能設計•克服險峻破碎岩坡•耐候抗蝕塗裝•原生植被復原•工序簡單快速

落石邊坡整治 - 近自然工法