

出國報告（出國類別：進修）

**參加「鐵路出軌調查及預防
(Derailment Investigation and
Prevention Seminar)」出國報告**

服務機關：國家運輸安全調查委員會

姓名職稱：陳建州 / 鐵道調查組調查官

后振宇 / 鐵道調查組調查官

劉晉宏 / 鐵道調查組副調查官

派赴國家/地區：美國 / 喬治亞州

出國期間：民國 112 年 11 月 06 日至 11 月 12 日

報告日期：民國 113 年 01 月 26 日

公務出國報告提要 系統識別號

出國報告名稱：鐵路出軌調查及預防（Derailment Investigation and Prevention Seminar）」

頁數：27 頁 含附件：否

出國計畫主辦機關：國家運輸安全調查委員會

聯絡人：郭芷桢

電話：(02) 7727-6228

出國人員姓名：陳建州、后振宇、劉晉宏

服務機關：國家運輸安全調查委員會

單位：鐵道調查組

職稱：調查官、副調查官

電話：02-7727-6262

出國類別： 考察 ■進修 研究 實習 視察 訪問 開會 談判 其他__

出國期間：民國 112 年 11 月 06 日至 11 月 12 日

出國地區：美國喬治亞州

報告日期：民國 113 年 01 月 26 日

分類號/目

關鍵詞：列車出軌、現場調查、出軌基本理論、證據紀錄及保存、軌道結構

內容摘要：

國家運輸安全調查委員會派員至美國，參加 Wolf Railway Consulting 所舉辦為期 2 天之「鐵路出軌調查及預防研討會（Derailment Investigation and Prevention Seminar）」，學習鐵道出軌事故調查知識與技術，研討會地點位於喬治亞州（Georgia State）之亞特蘭大（Atlanta），學員來各國營運機構及調查單位。課程內容所涉及的層面極廣，從最初的基本出軌理論、進入調查現場前之準備、建議出軌調查之 12 準則，至最後提出適當之改善建議等，以循序漸進的方式，提升與會同仁之調查能量。

目次

目的.....	1
課程簡介：.....	2
課程摘要與心得.....	4
一、 基本出軌理論（L/V、B/H Ratio、L/V Threshold）	4
二、 進入調查現場前之準備.....	12
三、 出軌調查 12 準則.....	12
授課方式.....	23
建議.....	23

圖目錄

圖 1. 列車運行於不同線形路段之 L/V 比值示意圖.....	4
圖 2. Nadal's Formula.....	5
圖 3. 輪軌摩擦係數量表	6
圖 4. L/V 爬上出軌臨界值範例一	6
圖 5. L/V 爬上出軌臨界值範例二	7
圖 6. 列車行駛於彎道中之作用力示意圖	9
圖 7. 列車於彎道中之側向力位置示意圖	9
圖 8. 落下出軌臨界值 (B/H Ratio) 範例.....	10
圖 9. 軌道挫曲型態	11
圖 10. 夏日每小時軌道溫度圖	11
圖 11. 尋找 POD 示意圖.....	13
圖 12. 爬上出軌輪軌接觸痕跡	14
圖 13. 落下出軌輪軌接觸痕跡	15
圖 14. 事故現場全貌圖	16
圖 15. 量測及檢視軌道幾何結構範圍	17
圖 16. 貨車車廂基準點表示方式	18
圖 17. 牽引機車基準點表示方式	18
圖 18. 金屬疲勞說明	20

目的

國家運輸安全調查委員會（以下簡稱本會）主要職責為調查國內重大運輸事故外，同時也針對不同運具所衍生出之事故提出後續改善及追蹤建議，最主要之目的為避免類似事故再發生，建立更安全的運輸環境。為進一步瞭解出軌機制及可能肇因，鐵道調查組派員赴美國亞特蘭大參加 Wolf Railway Consulting 所舉辦之「鐵路出軌調查及預防」（Derailment Investigation and Prevention Seminar）。

出軌事故調查之主要目的：

1. 了解事故發生的起因及降低重複事故之風險。
2. 提升出軌調查能量與經驗。
3. 參考國外法規制定。

如未來發生事故時，依據現場蒐集之資訊及證據進行系統性分析，以釐清事故肇因，並提出適切的改善建議，建立更安全的運輸環境。

課程簡介：

本次訓練由 Wolf Railway Consulting 主辦，除本會成員外，其他學員來自各國監理及營運單位，其課程內容包含出軌基本理論、事故現場採證、車輛及軌道量測等，研討會議程如下：

2-Day Derailment Investigation Seminar Agenda

- A. Derailment investigation philosophy and case study
- B. The L/V ratio and why wheels derail
- C. Derailment Site Investigation and Management including 12 step “Derailment Dozen”
 - 1. Identify POD
 - 2. Identify Derailment Mechanism
 - 3. Identify First wheel and car to derail
 - 4. Determine where lead unit and derailed equipment came to final rest
 - 5. Photo document wheel marks, track conditions, equipment conditions
 - 6. Collect and preserve critical evidence (statements, ER data, consist, etc.)
 - 7. Measure Track geometry and inspect track structure
 - 8. Measure first truck and car to derail; inspect car
 - 9. Analyze for Human failure, train handling
 - 10. Determine exceptions/violations to track standards, vehicle standards, operating rules.
 - 11. Develop consensus primary and secondary cause
 - 12. Implement and monitor corrective actions
- D. Explain in detail the evidence, symptoms and causes of the following derailment categories
 - 1. Wheel Climb due to:
 - i. Track twist; track conditions including elevation
 - ii. Mechanical conditions
 - iii. In-train forces, train handling
 - iv. Harmonic rocking
 - 2. Rail Rollover; gage widening
 - i. Track issues
 - ii. Mechanical causes
 - iii. Train Operations

3. Turnout Derailments

- i. Switch points
- ii. Frog
- iii. Human failures at switches

4. Catastrophic failures

- i. Broken rail (inc. Joint Bar)
- ii. Broken mechanical components
- iii. Broken wheel
- iv. Broken axle
- v. Wheel slip on axle
- vi. Roller bearing failure

5. Human Factor Caused Derailments

- i. The nature of human failure
 - a. Overview of top human factor causes
 - b. Statistical review of where we are in the rail industry with human failure
- ii. The old way vs. new way of dealing with human failure
- iii. Looking at the organization as a source of human failure
- iv. Root Cause Analysis of Human Factor Accidents
 - a. Detailed walk through for conducting investigation of human failure incidents.

課程摘要與心得

一、基本出軌理論 (L/V、B/H Ratio、L/V Threshold)

列車於鋼軌上運行時，車輪踏面應與鋼軌頭持續保持接觸，故接觸點會產生一正向力 (Vertical force) 及一側向力 (Lateral force)。理論上，當列車運行於平直線時，由於車重及地心引力之關係，導致正向力會大於側向力，且此正向力與車重成正比；反之運行於彎道時，因彎道離心力之關係，導致側向力大於正向力，且此側向力與曲率半徑成正比，並與行經此曲線段之車速成平方正比，其列車運行於不同線形路段之 L/V Ratio 示意圖，如圖 1 所示。

於現實面，列車運轉時，常會因多種因素導致車輪踏面與鋼軌頭接觸位置點改變，例如列車載重失衡、鋼軌過度磨耗、車輪失圓或彎道設計超高不足等因素，均會增加列車出軌的風險。列車出軌大致可分為下列 3 大項：

- 爬上出軌 (Wheel Climb)
- 落下出軌 (Wheel Drop)
- 列車或軌道設備失效 (Catastrophic Failure)

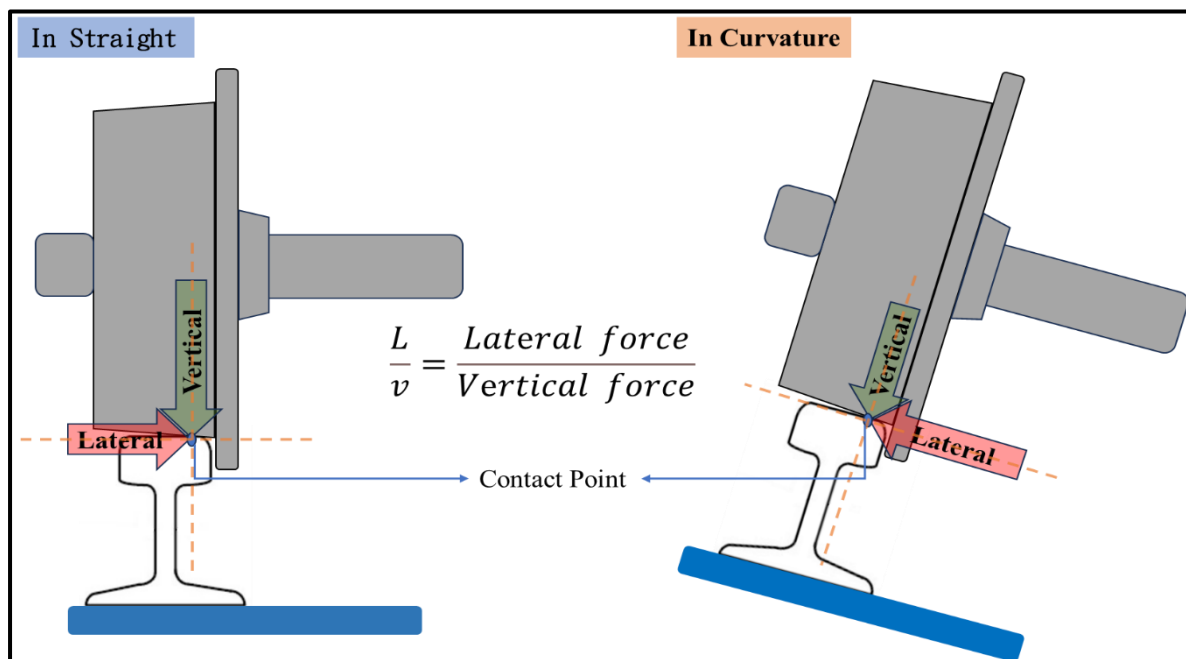


圖 1. 列車運行於不同線形路段之 L/V 比值示意圖

1. 爬上出軌 (Wheel Climb Derailment)：

爬上出軌為列車運行中，因鋼軌或鋼輪缺陷，導致鋼輪由鋼軌內側越過鋼軌頭，並落至鋼軌外側，稱爬上出軌。而爬上出軌可利用 Nadal's Formula 公式可代入輪軌接觸點之切線角度 (Θ) 及摩擦係數 (μ)，計算出爬上出軌臨界數值 (L/V Threshold)，藉此來判定列車運轉時，發生爬上出軌的風險，其 Nadal's Formula 及輪軌摩擦係數量表，分別顯示於圖 2 及圖 3。

以輪軌摩擦係數 (μ) 固定於 0.4 為例，車輪與鋼軌頭接觸點之切線角度 (Θ) 由 50 度逐步上升至 85 度，如圖 4¹所示。在此狀況下列車運行所產生之爬上出軌臨界值由原來的 0.8 上升至 2.0，意味著車輪與鋼軌接觸點之切線角度越大，所能承受的爬上出軌臨界值也越大。

以輪軌接觸點之切線角度 (Θ) 固定於 50 度為例，改變輪軌摩擦係數 (μ) 所產生之爬上出軌臨界值如圖 5²所示。由圖中可以發現，當輪軌摩擦係數 (μ) 為 0.1 時，對應之爬上出軌臨界值則為 1.0；隨摩擦係數增加，爬上出軌臨界值則逐步降低。

文中表示，當爬上出軌臨界值達 0.8 時，極有可能增加爬上出軌之風險，此情況常發生於全新或剛旋削完之鋼輪，運行於具磨損鋼軌之曲線段，因此軌道的維護極為重要。

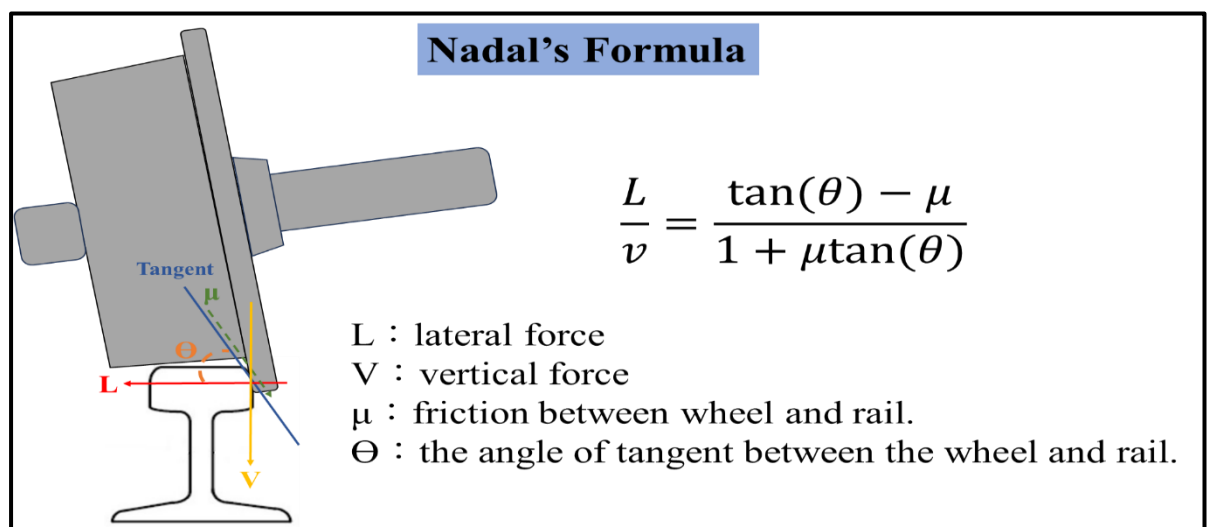


圖 2. Nadal's Formula

¹ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

² 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

Wheel Rail Lubrication – Typical Values of μ

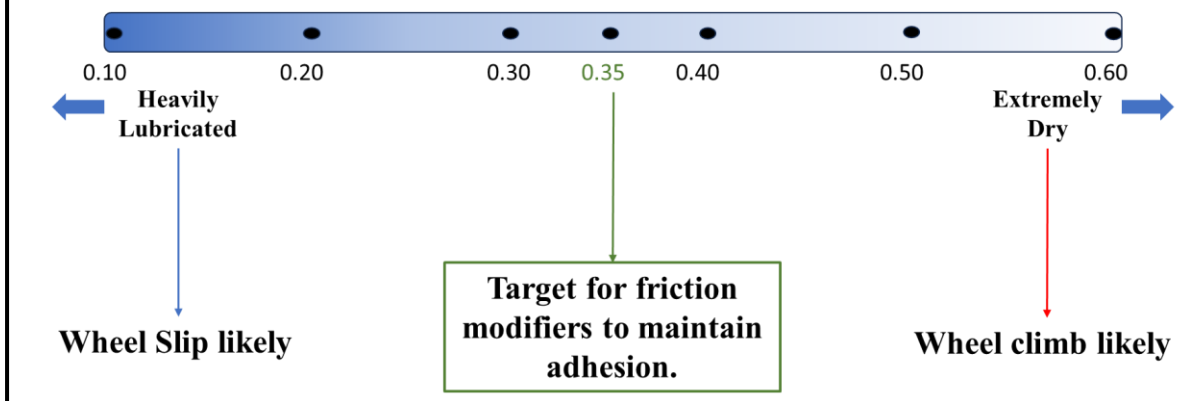


圖 3.輪軌摩擦係數量表

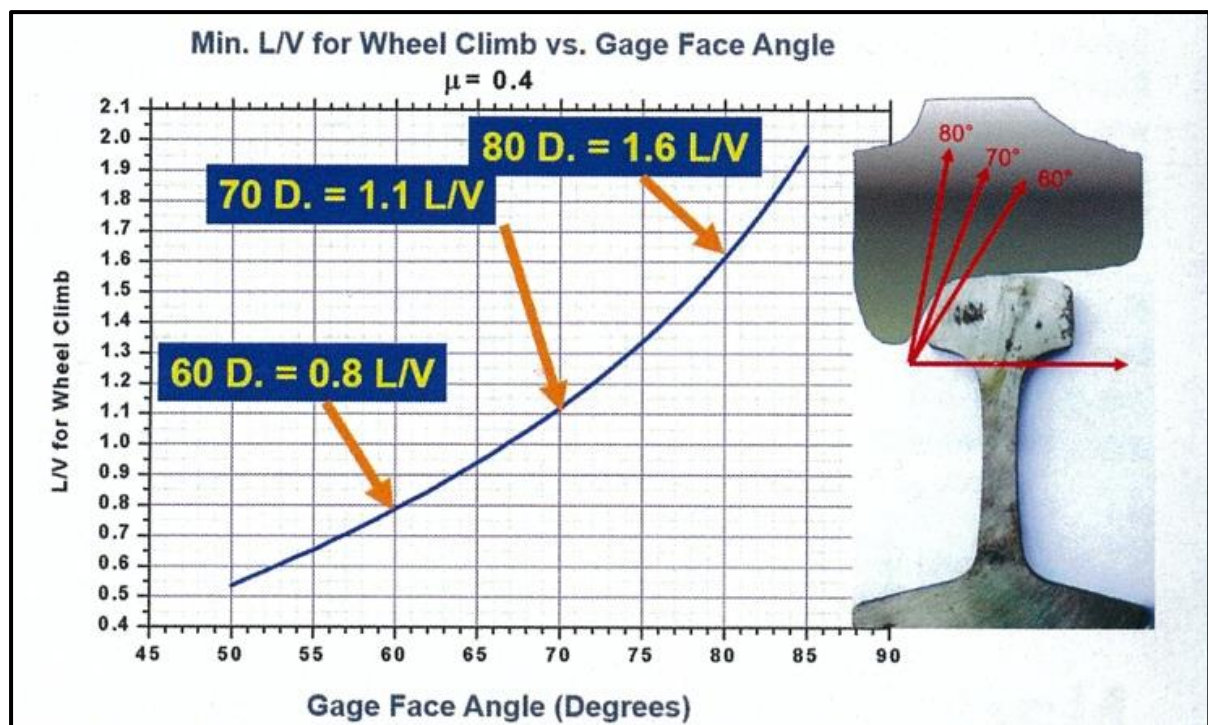


圖 4. L/V 爬上出軌臨界值範例一

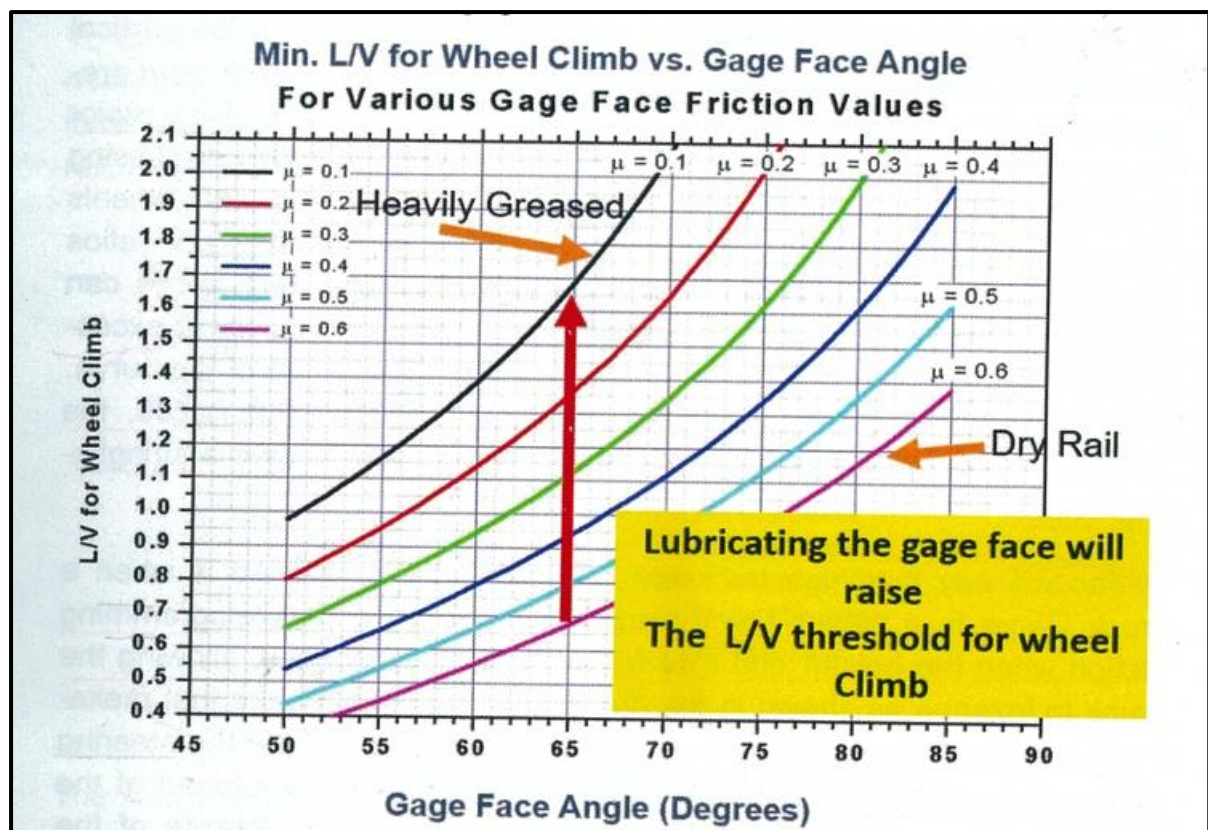


圖 5. L/V 爬上出軌臨界值範例二

2. 落下出軌 (Wheel Drop Derailment) :

落下出軌為列車運行中，因鋼軌、鋼輪缺陷，導致鋼輪由鋼軌內側落下，稱落下出軌。落下出軌大都發生於軌距擴張處所，而造成軌距擴張的因素可能為軌道養護或強度欠佳，也可能為列車行駛於彎道中，列車外力所造成。

落下出軌常發生於彎道處所，其行駛條件可由如圖 6 所示。列車行駛於具超高之順時針彎道中，內軌 (Low rail) 之側向力 (L) 於輪軌接觸點以順時針方向將鋼軌向軌道外側 (Field side) 推擠；而正向力 (V) 則以逆時針方向將鋼軌向下壓。此時如正向力低於側向力時，兩力之合力 (F) 位置可能落在軌足 (Rail Base) 外側，因此可能造成軌距擴張，進而增加落下出軌的機率；反之，如正向力高於或等於側向力時，兩力之合力 (F) 位置可能落在軌足內側，發生落下出軌的機率則較低。

另列車行駛於彎道中，增加側向力之原因為，列車瞬間過大之牽引力，易使彎道內側鋼輪擠壓內軌；或列車轉向架旋轉，使外側鋼輪擠壓外軌，內側鋼輪擠壓內軌。上述兩情況均會增加輪軌接觸面之側向力，此時如鋼軌結構不佳，易使軌距擴張，增加落下出軌的機率，輪軌作用力之示意圖，如圖 7³所示。

落下出軌臨界值之計算，較少使用輪軌接觸點之切線方式進行分析，而是利用鋼輪與鋼軌頭接觸點為起點，分別量測水平軌足寬度 (B) 及向下垂直量測至軌足高度 (H) 之比值來判斷，此方式稱為 B/H Ratio，範例如圖 8⁴所示。圖中 Zone1 為全新鋼輪運轉於新鋼軌上所產生之 B/H Ratio 為 0.64。隨著時間增加，在鋼軌逐漸磨損的條件下，鋼輪與鋼軌頭接觸點之軌足寬度由 4.5" 降至 3.4"，且接觸點逐步向軌道外側靠近，此時所產生之 B/H Ratio 則降至 0.48，較 Zone1 之 B/H Ratio 降低約 25%，如 Zone2 所示。Zone3、Zone4 為全新鋼輪分別運轉於具超高順時針彎道之正常與磨損內軌上，其 B/H Ratio 由 0.44 降至 0.38。

由上述得知鋼軌的磨損會減少車輪與鋼軌頭接觸點之軌足寬度，使正向力降低，此時側向力如為定值，則增加落下出軌之風險。文中表示，B/H Ratio 低於 0.3~0.4 間時，即達落下出軌臨界值。因此如發生落下出軌情況，可量測出軌點之軌距外，亦需檢視該

³ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

⁴ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

區軌道幾何狀況及列車車重等數據，找出出軌肇因。

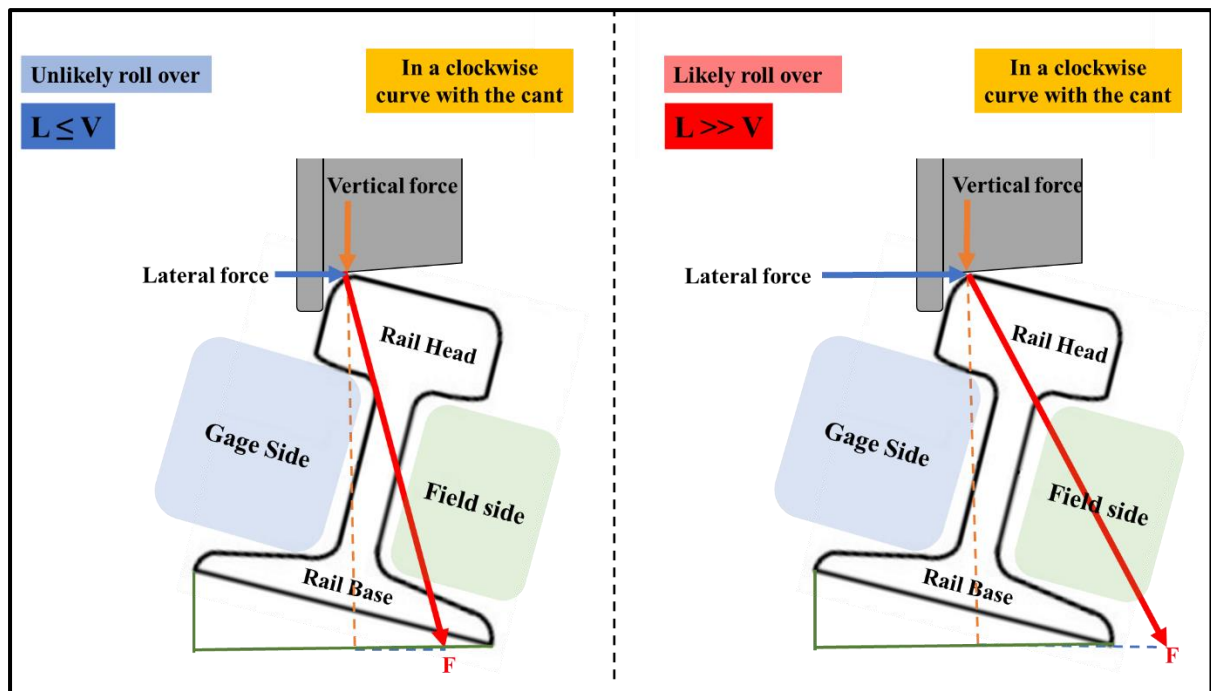


圖 6. 列車行駛於彎道中之作用力示意圖

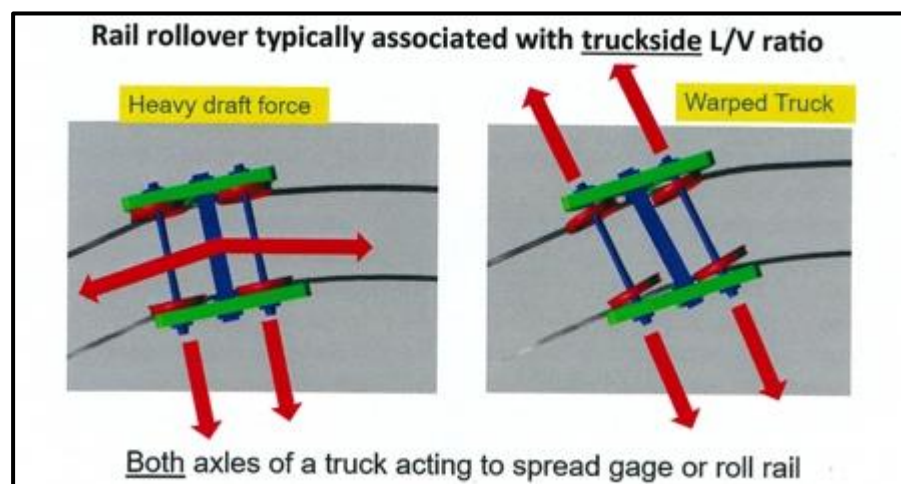


圖 7. 列車於彎道中之側向力位置示意圖

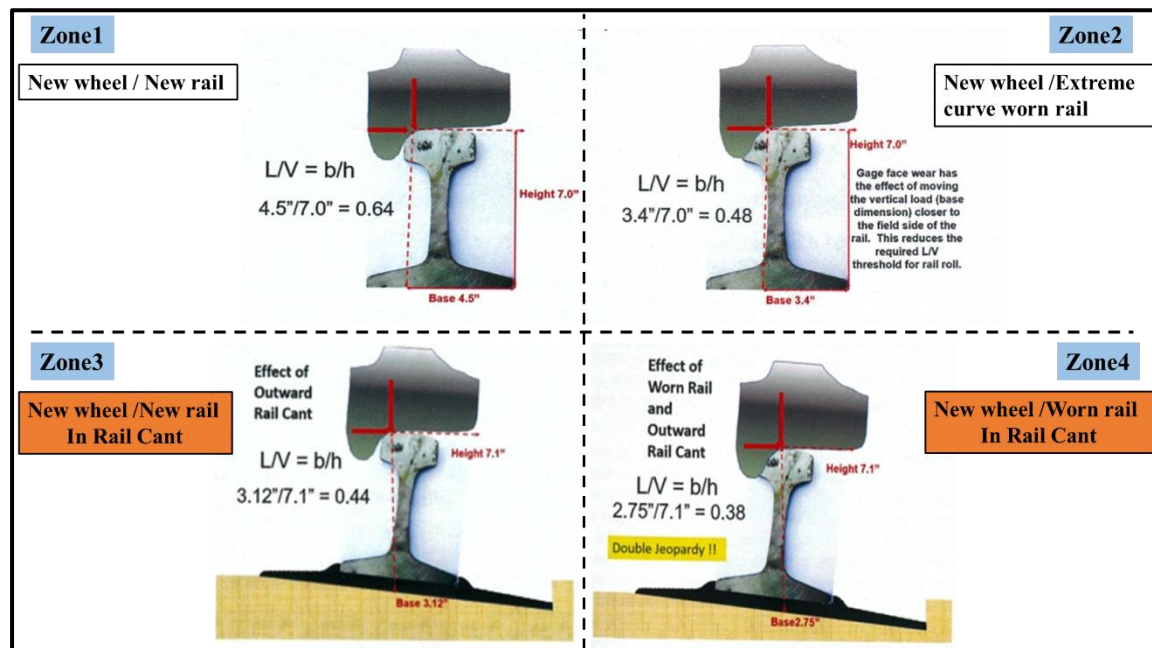


圖 8. 落下出軌臨界值（B/H Ratio）範例

3. 列車或軌道設備失效（Catastrophic Failure）

列車運行中如遭遇鋼軌斷裂、挫曲、車軸咬死、斷軸或其他異物入侵軌道淨空遭撞擊等狀況，可能造成鋼輪與鋼軌產生不連續接觸，增加列車出軌的機率。依本會鐵道事故通報統計，以軌道挫曲及道岔區出軌事故頻率較高，故以上述兩案例進行簡述：

- 軌道挫曲（Track Buckling）

軌道挫曲通常呈現兩種模式，第一種"C"型挫曲，常發生在曲線段，另一種"S"型挫曲，通常發生在直線軌道，如圖 9⁵。依美國 FRA 統計，80%軌道挫曲發生在夏日下午 2-6 點，如圖 10⁶，因此軌道養護品質及環境變數為關鍵調查跡證。

- 道岔區出軌（Derailment In Turnout）

如出軌點於道岔區，調查員應檢視與量測道岔尖軌間隙、橫桿裝置、幾何及各構件運作等，另應檢視列車及人為操控因素，包括列車缺陷及人員操作

⁵ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

⁶ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

道岔情形。

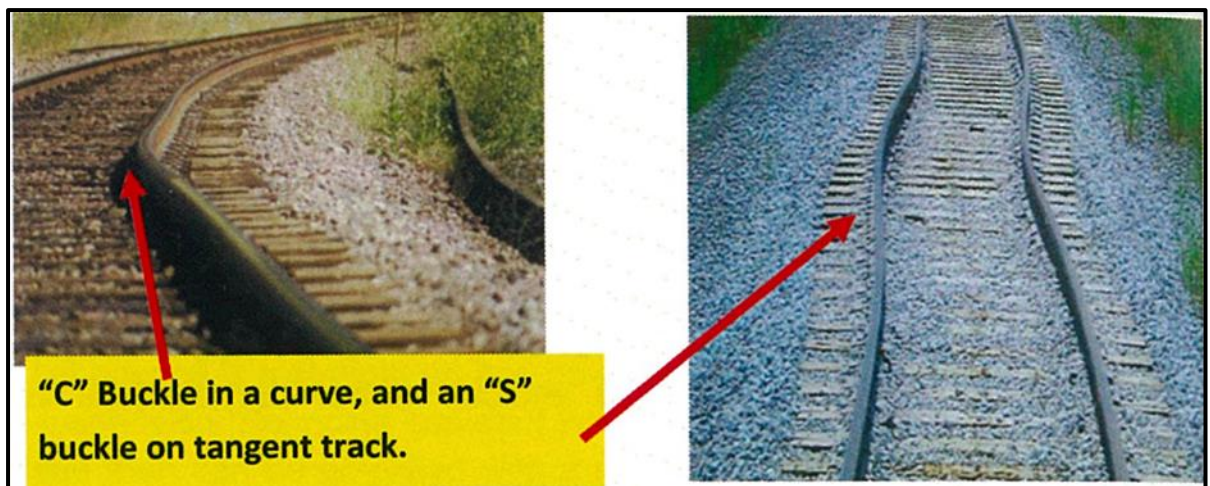


圖 9. 軌道挫曲型態

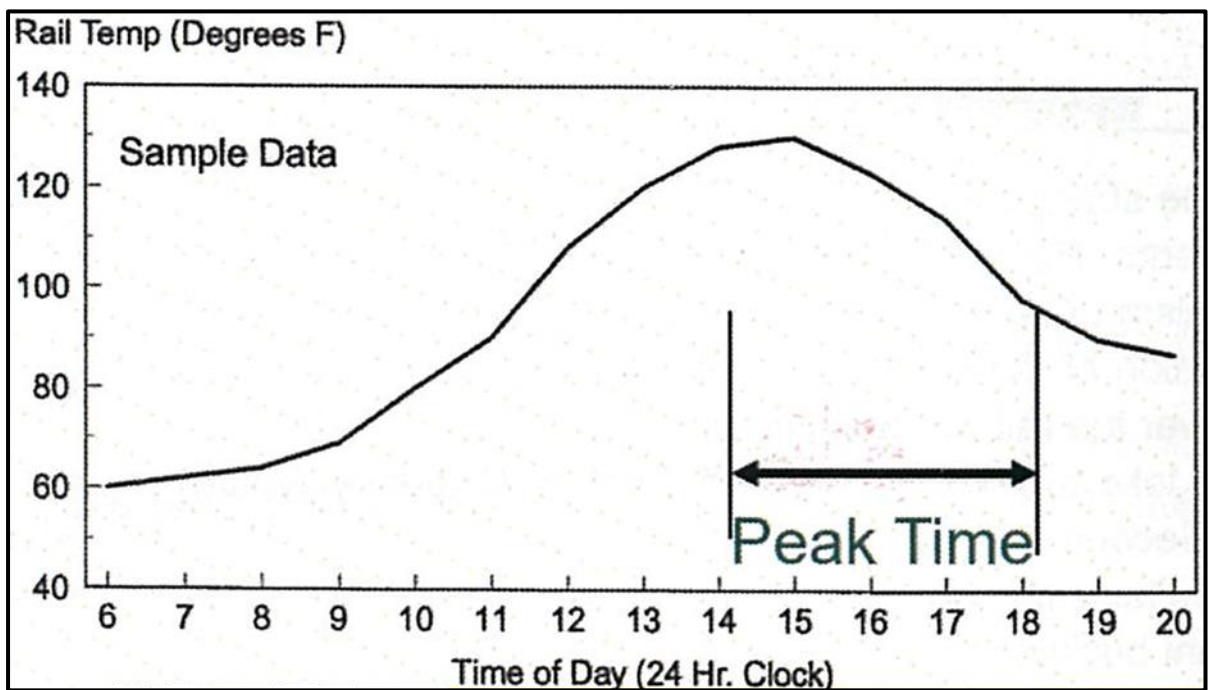


圖 10. 夏日每小時軌道溫度圖

二、 進入調查現場前之準備

由於事故現場樣態多樣化，在列車出軌或傾覆的過程中，可能造成大量傷亡、車體形變及列車火災，因此為保護調查人員免於傷害或感染，進入不同樣態之調查現場時，除遠離危險洩露及爆裂物外，建議配戴下列裝備：

- 防護衣
- 硬式安全帽
- 護目鏡
- 通訊無線電
- 防毒面具或供氧氣瓶（視情況調整）
- 反光背心
- 防穿刺手套
- 安全鞋

並建議現場主任調查官依調查人員之專業，分區分為運轉、軌道及車輛三個分組，進行現場勘查及證物蒐集。

三、 出軌調查 12 準則

列車正常運行於軌道上時，應是全列車車輪踏面與鋼軌表面持續保持面接觸之型態，如因列車、鋼軌結構之缺陷或人員操作失誤、異物侵入及違反運轉閉塞原則等條件，易使列車車輪踏面及鋼軌表面發生永久性之分離，形成列車出軌。

由前述可得知列車出軌型態大致上可區分為 3 類，為找出列車出軌事故之肇因，此課程訂定了「出軌調查 12 項準則」，遵循此準則之步驟，可明確找出出軌的肇因，並提出更具體及完整的改善建議。出軌調查 12 項準則，表示如下：

Step1. 確認出軌點之位置（POD）

Step2. 確認出軌形態

Step3. 找出第一輛（輪）出軌之車輛

- Step4. 繪製與量測事故現場全貌圖
- Step5. 拍攝鋼軌結構及車輛損傷狀況
- Step6. 提取關鍵紀錄器資料
- Step7. 量測及檢視軌道幾何結構
- Step8. 量測及檢視第一輛（輪）出軌車輛
- Step9. 檢視法規訂定之軌道及車輛運行標準
- Step10. 測試與模擬
- Step11. 確認主要及次要出軌肇因
- Step12. 實施並監督改善措施

1. 確認出軌點之位置（POD）：

當出軌事故發生後，首要得找出出軌點之位置（The Point Of Derailment, POD），其定義為，車輪與鋼軌結構發生不正常接觸之初始點，以下簡稱 POD。要順利找出 POD 位置，須先確定列車之行駛方向，並沿著列車行駛之反方向觀察鋼軌、枕木及其他軌道結構是否有異常的撞擊點或金屬摩擦痕跡，並沿著異常軌跡找出初始點，此點即為 POD。至於觀察之距離，與當時之車速成正比，速度越高則距離越遠，且因慣性之關係，通常 POD 不會出現在第一輛出軌車輛或連續翻車之區域，其尋找 POD 之示意圖如圖 11。

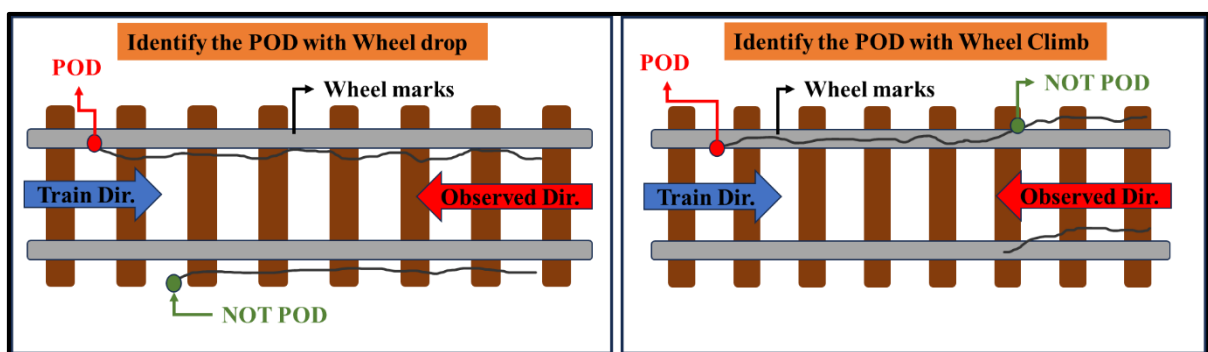


圖 11. 尋找 POD 示意圖

2. 確認出軌機制：

依出軌現場列車車輪及軌道結構之受損狀況，可以判定列車是爬上、落下或

其他因素導致之出軌形態。如是爬上出軌，可由 POD 點發現列車車輪會經由輪緣角爬上鋼軌頭再，再落下於軌道外側，如圖 12⁷所示。此出軌機制大都以輪軌接觸點之側向力大於正向力及輪軌接觸產生較大摩擦力造成，可由前節 Nadal's formula 進行驗證。

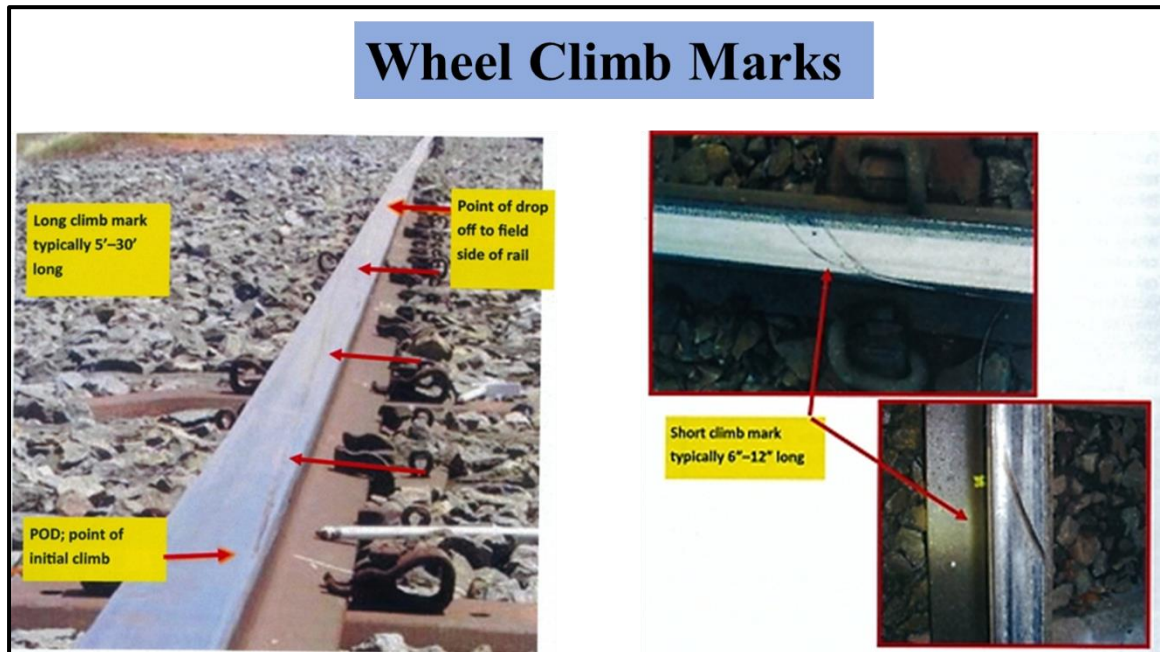


圖 12. 爬上出軌輪軌接觸痕跡

落下出軌則是可由 POD 點發現車輪落下撞擊之痕跡，以軌身、枕木或鋼軌扣件較為常見。落下出軌大都是因為輪軌接觸時，過高的側向力或較低的正向力之組合產生，使倆合力之位置落於軌足區外方，造成鋼軌外翻，致軌距擴張。此出軌現象大都發生於彎道內軌處，可由前節 B/H Ratio 值進行驗證，也可以量測 POD 點附近之軌距寬度及軌道幾何來確認出軌形態，其落下出軌之輪軌接觸痕跡如圖 13⁸所示。

⁷ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

⁸ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

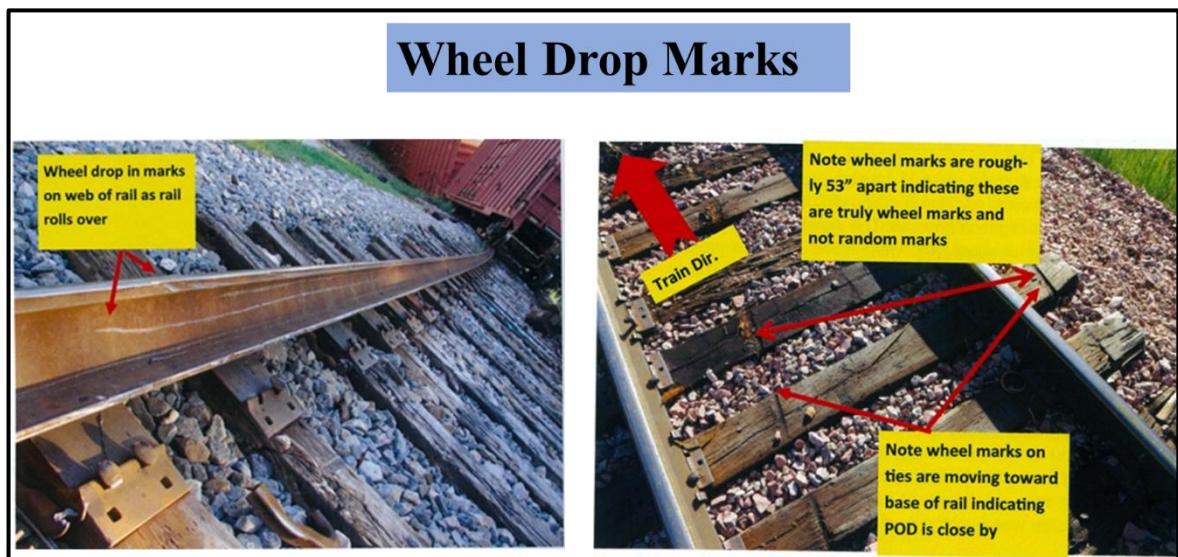


圖 13. 落下出軌輪軌接觸痕跡

某些出軌形態，不一定會在鋼軌上留下痕跡，而是直接出現在枕木或鋼軌扣件等位置，如車輪抬升出軌。此出軌現象常因為列車突然加減速，使車與車間之連結器相互拉伸或擠壓，導致車輪浮起後，落於非輪軌接觸區，此現象常出現於空車或進入彎道的瞬間。其他出軌形態如鋼軌斷裂、斷軸或撞擊異物則較易判別，因此不再此贅述。

3. 找出第一輛出軌之車輛：

第一輛出軌之車輛定義為發生輪軌不正常接觸之第一輛車。通常出軌車輛大都為運行方向第一輛第一軸，且車輪、車軸、轉向架及連結器大都具有明顯損傷，並依各部受損情形與步驟 2 所預判之出軌機制進行比對是否符合。

4. 繪製與量測事故現場全貌圖：

於事故現場取一參考點，對所有事故車輛分佈之相對位置進行描繪與量測，亦可使用無人機進行空拍取證。其內容可包括車廂編號、POD 位置及各車廂之相對距離等，如圖 14⁹所示。

⁹ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

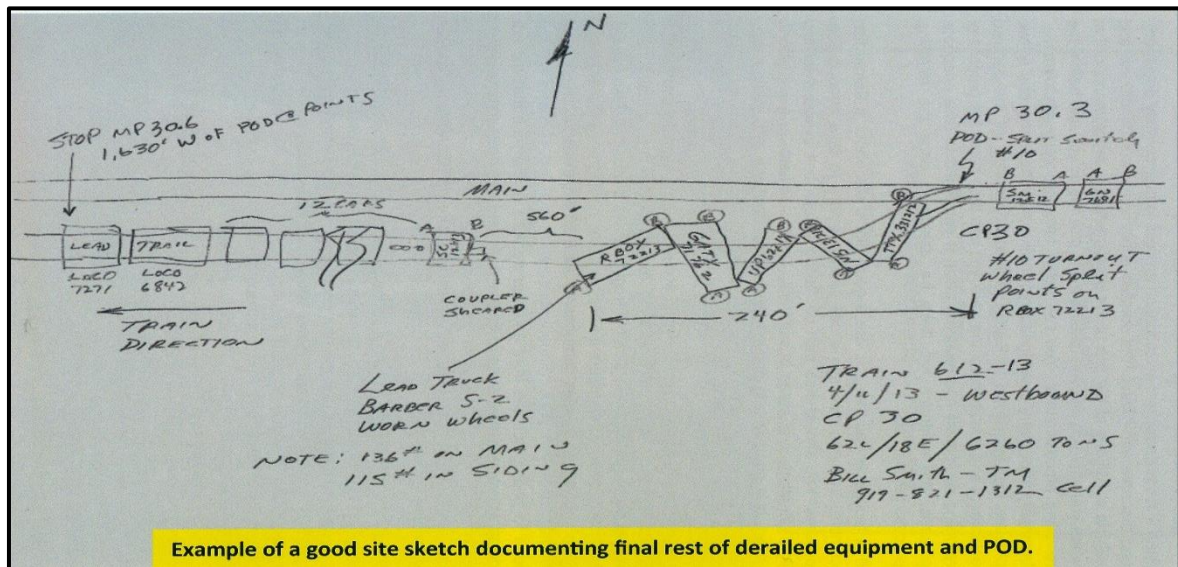


圖 14. 事故現場全貌圖

5. 拍攝鋼軌結構及車輛損傷狀況：

拍攝 POD 位置、第一輪（軸）或其他設備因出軌導致損傷之狀況，拍攝前建議先標註記號，再分別以遠、中、近之取鏡方式拍攝，拍攝過程中避免陰影，亦可由錄影之方式取證。

6. 提取關鍵紀錄器及相關文件資料：

提取事故列車影像、駕駛語音、號誌回放紀錄器、列車及軌道維修保養、人員訓練等關鍵資料，如為易流失跡證，則不在此步驟順序規範內，應盡早提取。

7. 量測及檢視軌道幾何結構：

為檢視及量測事故現場軌道結構完整性，其檢視與量測範圍包括枕木、道床、鎖固扣件、兩軌之軌距、軌道水平及垂直變動量、彎道曲率、超高等數值。

其量測方式，以 FRA 貨物列車發生出軌建議為例，總量測距離可分為兩部份，第一部分以 POD 為終點，向列車行進方向反推 232.5 ft，將該距離平分為 15 等分，並每 5 等分約 77.5 ft 標記為一單位；另一部分，如 POD 後之軌道結構未被嚴重破壞，則以 POD 為起點，順列車出軌方向前進 77.5 ft 之距離，為軌道幾何量測及檢視之範圍。其總量測範圍如圖 15¹⁰所示。具 FRA 表示，大部分北美列車，最長之

¹⁰ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

中心距離為 66 ft，因此設定 77.5 ft 為一單位，如出軌車速超過 79MPH(約 126KPH)，則需增加至 30~40 等分之量測距離。

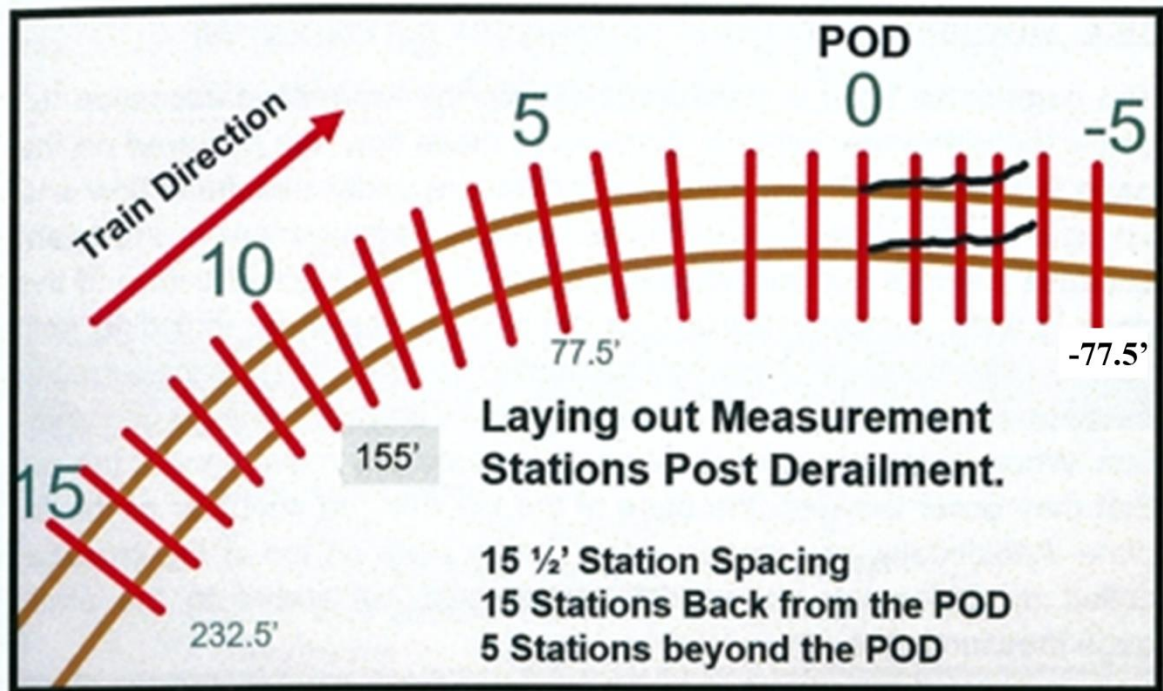


圖 15. 量測及檢視軌道幾何結構範圍

8. 量測及檢視第一輛（輪）出軌車輛：

欲量測及檢視車輛時，第一步要先建立基準點，文中車輛則以貨物車輛為例，大部分貨物車輛均會配置手剎機，因此建議以面對手剎機（Handbrake）之方向為基準。位於基準點左側標記為 L，右側則為 R，離基準點越遠之車軸則編號遞增，轉向架標記方式則為遞減，並將此車輛分為 AL、AR、BL 及 BR 四個部分，此方法利於統一標記各部列車部件之相對位置，如圖 16¹¹所示。如未配置手剎機，則以剎車泵活塞作動方向標記為 B 端。

牽引機車之設計略有些微差異，但大部分機車於前部均會標記字母 F，因此機車之標記方式為由車尾面對 F 方向為基準點，位於基準點左側標記為 L，右側則為 R，離基準點越遠之車軸則編號遞增，依此規則來標記各部機件之相對位置，如圖 17¹²所示。

¹¹ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

¹² 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

其量測及檢視範圍包含車軸、車輪、牽引剎車系統、減震裝置及轉向架結構等，如車廂與轉向架分離，可藉由車廂、轉向架及各部零件編號重新配對。各國列車設計與配置不同，上述內容僅提供參考，調查人員可依不同車種建立統一基準點，以利事證之收集。

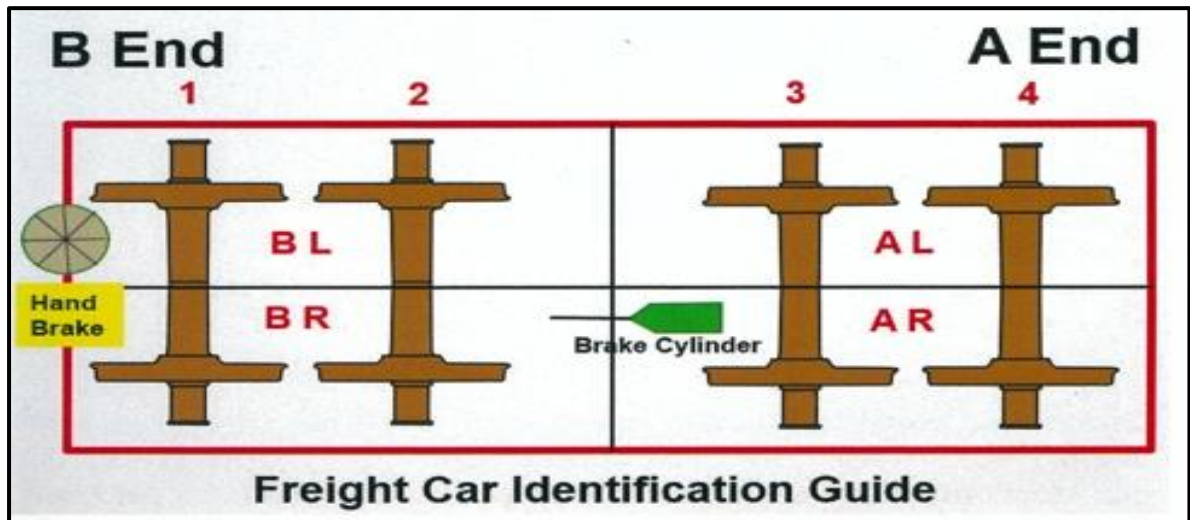


圖 16. 貨車車廂基準點表示方式

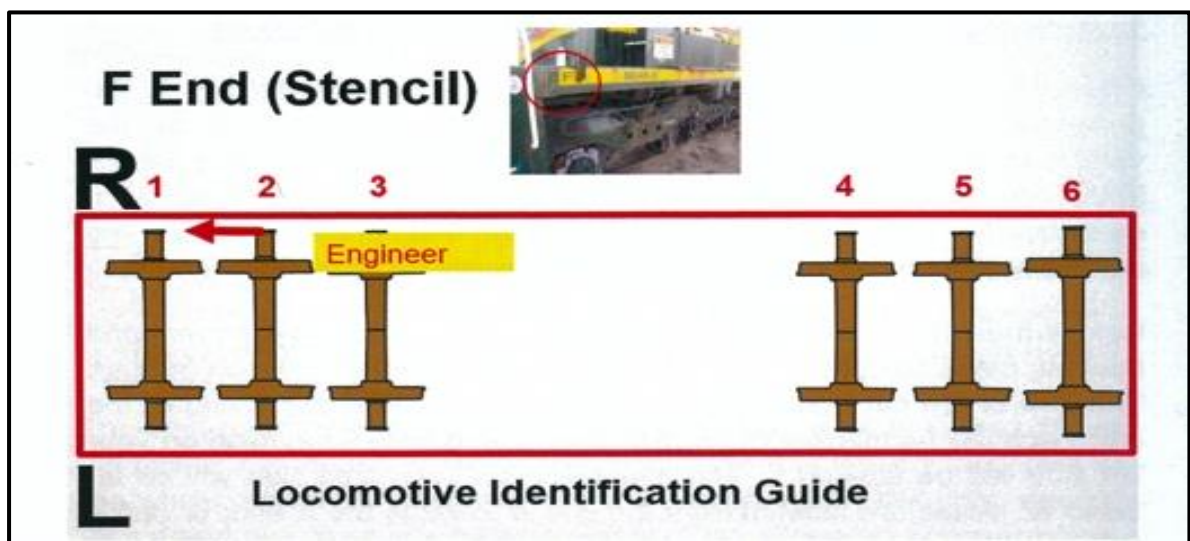


圖 17. 牽引機車基準點表示方式

9. 檢視法規訂定之軌道及車輛運行標準：

比較事故資料和軌道、車輛及人員操作的標準，判斷是否有不合規定之處，從所有證據中建構出根本肇因。根本肇因或主要肇因是消除了就不會發生脫軌的條件，其他就是不會造成出軌的次要肇因。在這階段可能發現一些軌道、車輛及人員操作上的

缺陷，然而，要進一步確認這些和標準的差異可能與和事故有因果關係。要注意別一味認定這些差異就是出軌成因，要找到它們和出軌機制的直接關係。

另一方面，都符合規章不代表可將之排除在外。規章不可能包含所有的狀況，再健全的規章都有不足之處。檢視規章後，可能需要對新情境發展新規章。而且，規章不會考量多個標準的綜合效應。例如，軌道或車輛的缺失都未超出規章要求，但多個因素合併後可能生成爬軌或車輛翻覆的高度風險。對此，必須對最有可能影響的因素進行探討。例如，車輛某條件差 1 公厘到達缺陷界限，軌道某條件差 3 公厘到達缺陷界限，這樣可將車輛狀態視為導致出軌的可能肇因，此時進行電腦模擬是將各因素影響力排序的最佳方法。

在調查過程中，可能會發現不在規章要求的缺陷。因鐵道環境會有新狀況，這就是為什麼須時常檢視及更新規章。違反規章不代表會導致出軌，其必須和出軌機制有直接關聯。

10. 測試與模擬：

- 金相分析：

在此階段，重要的證據已蒐集完成，但仍有些事情仍無法確認。例如，鋼軌或零件的斷裂導致出軌，或是在碰撞後斷裂？透過金相分析，我們可知零件故障是因過去長時間的金屬疲勞或是在出軌過程中承受過大的應力所造成的。為什麼會有長時間的金屬疲勞？為什麼在以往的檢查中沒有被檢出？它是從何處開始且如何擴展？是否有誤用零件的情況？金屬疲勞是否因製造過程中的瑕疵所造成的？金屬疲勞是否因材料瑕疵所造成的？有些的金屬疲勞是因水或化學物質對表面的侵蝕而開始，有些是因在製造過程中所生之微量化學物質所引發。透過實驗室分析，可得知為何該裂縫未在日常的各種檢查中被發現，及如何預防裂縫在類似環境中產生。

調查人員可透過目視檢查辨識出可能的金屬疲勞，在舊有的缺陷上可見由初始位置發展出的海灘環（Beach Ring）或環形紋，另一缺陷生成的特徵是表面有生鏽、油漬或塵土。特別是潮濕的氣候中，新缺陷會很快的生成鐵鏽，因此，必須找尋是否有海灘環，不可僅以表面鐵鏽來判斷生成時間。如果斷裂處表面無鏽、海灘環及撞擊痕，可能是出軌過程中受力所造成的。

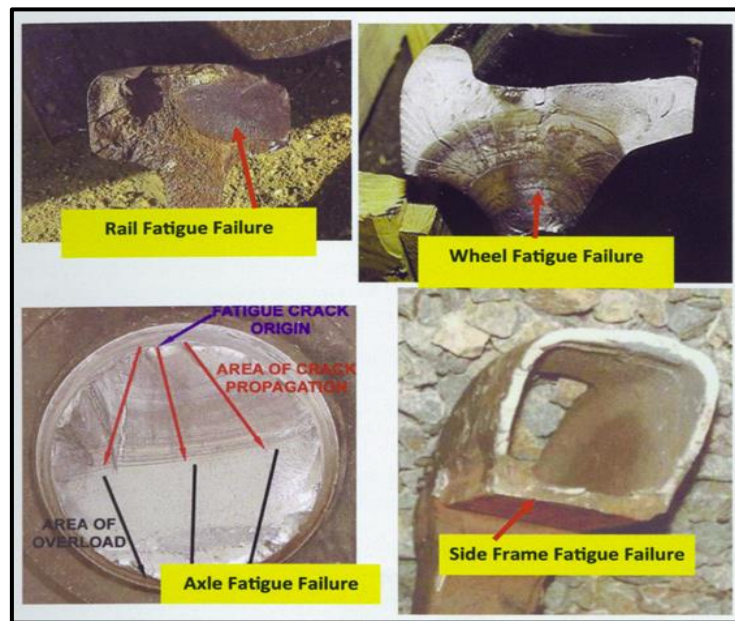


圖 18¹³. 金屬疲勞說明

- 模擬分析：

約自 1970 年代中期，鐵道業開始利用模擬分析來預測聯結器及輪軌之受力。以過去的經驗，Train Operation Simulator (TOS) 及 Train Operations and Energy Simulator (TOES) 模形較適用於出軌分析。了解出軌時在列車端點所受何種之力是重要的，聯結器上過度的力可造成列車出軌。一般而言，設備、軌道及列車組成能在伸拉或推擠時承受約 200 千磅的力而不出軌，超出會有出軌的風險。

另外，還要注意穩定狀態或自然的動態力。如果列車上有鬆弛動作 (Slack Action)，且出軌列車聯結器受力在 200-300 千磅，可假設這力是引發出軌的主要因素。然而，調查人員須確認無其它如車輛或軌道因素的存在。透過分析車上紀錄器資料，並比較駕駛行為和規章的差異，可發現駕駛行為是否和出軌相關。

列車編組錯誤是產生過度車上力的可能原因。大部分的鐵道業者有列車編組規定及程序，其規範列車總重、載運大型物品車輛的位置及長/短編組後方可拖拉的重量，調查人員要確認鐵道業者是否有遵循規定。坡度及曲率通常不是出軌主因。以長編組通過的連續上下起伏短路段是有難度的，多數鐵

¹³ 圖片來源：Gary P. Wolf, The Complete Field Guide to Modern Derailment Investigation

道業者會規定在通過此路段時降速，以免產生過度的車上力。利用列車操作、速度及編組的模擬，是分析是否為這些因素造成列車出軌的最好方法。

- 列車動態模擬：

此法可模擬單一車輛通過特定路段的表現，及分析其出軌的樣態。列車動態模擬可準確預測特定車輛每一車輪的水平力、垂直力及 L/V 比例。亦可模擬如車輪失圓、阻尼失效或車內負荷位移等。軌道檢查所得如軌道線形及軌距等資料，可直接輸入於模擬模型。

常用的模型 (Model) 有 VAMPIRE、NUCARS、SIMPACK 及 Universal Mechanism。這些模型相當昂貴，但可在筆記型電腦上使用。使用者需有足夠的車輛動態知識及模擬經驗。在 Manchester Benchmark Study 以類似車輛及軌道條件來比較上述各模擬模型，在計算車輪橫向及垂直力之結果是相同的。在購買前要清楚詢問各模型的支援項目及時數。

- FEA 模擬模型：

有限元素分析 (Finite Element Analysis, FEA) 可用在出軌及碰撞調查，LS-DYNA 及 Abaqus 皆可用以模擬軌道設備間碰撞動態。這模型非常昂貴、複雜，且使用者需高度專業知識。

- 模擬分析的優點：

可以模擬現實中不可能出現如大規模出軌之情境，想要情境都可在電腦中模擬，且可以重複多次，不會有任何安全疑慮。以實車測試相當耗時、成本高且可設定的情境有限。使用軟體模擬成本較低，且可測試多種情境，或比較不同情境的測試結果。

在一般的測試過程中，會一次調整或消除一個車輛或軌道的參數，來看哪一項的改變對車輪組的力產生最顯著的影響。例如，列車通過水平高差不整的曲線段時，旁承 (Side Bearing) 高度會持續接近其上限。問題是：哪些因素會直接導致車輪爬上。先在曲線段設定無水平高差，看列車通過情形；再消除旁承高度，看列車通過水平高差不整的曲線段之情形。各模型都是依牛頓運動定

律寫成，列車受力後的運動情況都是科學事實，使用模擬分析可消除調查時的偏見。

模擬可提供一致的出軌分析方法，但是有正確的資料才會有正確的模擬結果。因此，在調查先期所得的紀錄器資料、軌道量測資料及設備檢視結果的正確與否，會影響模擬結果。模擬者有時會輸入不正確的參數或資料，而產生不正確的結果。如有存疑，請模擬者再次確認所有輸入的參數或資料皆為正確。別讓模擬結果取代已知車輛會如何表現的常識、經驗及知識。

11. 確認主要及次要出軌肇因：

調查至此，已取得許多車輛與軌道量測資料、和出軌有關的資料、模擬結果及金相分析結果，接下來要探討出軌主要、次要及可能肇因。可以檢視違反各規定的項目，確認違反項目和出軌有直接關聯。如果無違反項目，可從已發掘的因素中找出最有可能的因素。例如，有些偏差非常接近缺陷程度，可利用模擬分析找到最有可能導致出軌的因素。

再者，可比較各量測結果，從中找到最接近缺陷值的因素，它就是出軌的最可能肇因。如果有調查小組成員對出軌主因有異議，可將不同的意見陳列出來，交由獨立方做最後判斷。所有不同意見都必須是有事實根據，而非單純意見之陳述。

12. 實施並監督改善措施：

給予改善建議的目的是防止出軌的再發生，必須合於成本效益及可被執行的。改善建議可以是進行維修、發展規章、建立新標準、進行人員訓練或落實工作紀律。另一個重要的觀點，須考量執行這些改善建議會產生的不利因素。過往有些例子，為預防出軌而改變規章或車輛，反而使情況更糟。發展改善建議時以小組進行，個別意見皆要列入考量，確保無不利因素存於改善建議中。

再者，觀察改善建議執行 6-12 個月後之成效，確保能防止類似事故再發生且未產生不利因素。亦可評估是否能將這些改善建議應用到其它部門或其它的鐵路機構。

授課方式

此研討會以講師現場授課之方式進行，課程中學員可隨時提出相關問題，並進行意見交換，藉此吸取不同的事故調查經驗及分析方式，提供本會不同的思考及調查方向，拓展彼此的視野。經過此次研討會，對列車出軌調查的專業知識及技巧有更深的認識，在日後面對類似調查案時，能參考課程內容進行調查及分析事故肇因，提出適切的改善建議，提昇國內的鐵道運輸安全。

建議

- 運安會雖調查過數起鐵道出軌事故，但自認經驗尚淺，且國內尚無機構或團體針對出軌調查進行訓練及分析，因此建議可以與各國鐵道或調查機構進行多方交流，彼此相互研析及探討，吸取各方調查經驗及技巧，提升本會調查能量與經驗。
- 本次訓練課程均以課堂講授與討論為主，建議未來可搭配現場演練課程，以增加實務調查經驗。

赴美國亞特蘭大參加鐵路出軌調查及預防課程

服 務 機 關：國家運輸安全調查委員會

出 國 人 職 稱：鐵道組調查官、副調查官

姓 名：陳建州、后振宇、劉晉宏

出 國 地 區：美國

出 國 期 間：民國 112 年 11 月 6 日至 11 月 12 日

報 告 日 期：民國 113 年 1 月 26 日

建議事項：

	建議項目	處理
1	建議日後可持續派員參加國外鐵道調查事故課程，藉此提升本會調查能量與經驗。	☐ 已採行 ☒ 研議中 ☐ 未採行
2	建議未來訓練課程除課堂講授外，增加實務課程，藉此提升本會調查經驗。	☐ 已採行 ☒ 研議中 ☐ 未採行