



軌 道 工 程

朱 旭

2010年5月

備註：本資料乃為學術研習所作之初步稿件，謹供學生以PDF學習，以求教學相長



課程大綱

第十章 漫談軌道力學

第一節 軌道負荷

第二節 軌道力學發展經過

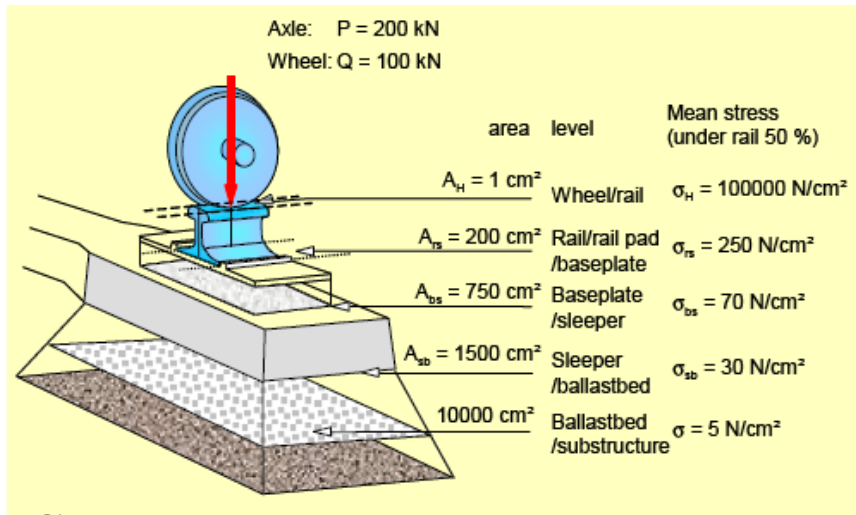
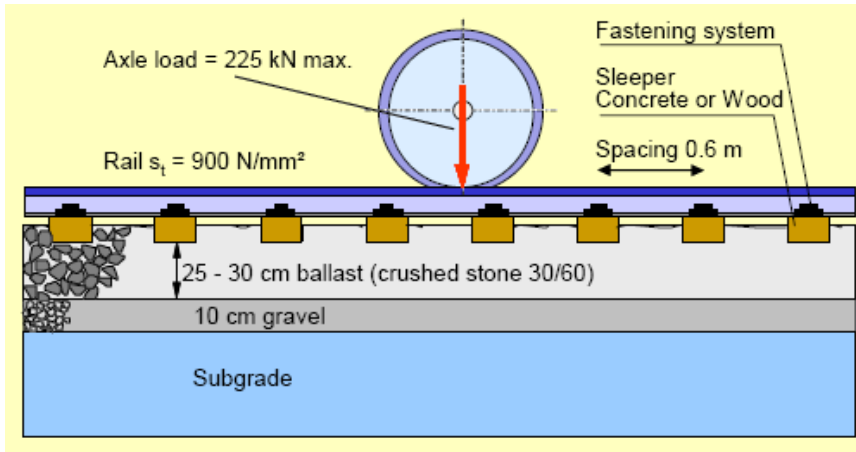
第三節 軌道力學分析

第四節 軌道挫屈行為

第五節 橋樑軌道互制行為



軌道結構的特色



Coenraad Esveld

- 長度遠大於寬度或厚度，視同無限長結構。
- 無限長的軌道由扣件系統或道床阻力提供一定程度的垂向支撐與縱向／側向束制行為，以承受由數組鋼輪集中負荷及溫度負荷等的作用。
- 輪負荷範圍及其鄰近軌道受力變形，遠離負荷軌道不受其影響。
- 軌道係呈細長狀，溫度變化將衍生挫屈行為。



前言 (1/5)

■ 英國 Stockton 至 Darlington 之間的鐵路為第一條客運路線，是由 George Stephenson 在 1825 年 9 月 27 日開通，George Stephenson 並未受過任何正式教育，卻建造了全世界第一條客運用的軌道，此多少意味者軌道工程發展之初並無任何理論基礎。





前言 (2/5)

- 1867年德籍 E. Winkler 提出縱枕軌道理論，開啟了軌道力學領域，惟已落後了實務面至少40年之久，往後軌道工程的發展，一直是以實務經驗為主導，而理論基礎與力學分析往往只是扮演著事後驗證的角色，此種現象在其它學門上是少見的，這也造成了軌道工程一直停留在以實務經驗作傳承。



前言 (3/5)

- 雖然偶爾有理論走在實務之前，但由於軌道工作人員的排斥或不信任而阻礙其發展，例如德籍Meier教授在1934年提出長鉚鋼軌理論，惟德國國鐵至1952年才開始在正線上試鋪長鉚鋼軌，迄今長鉚鋼軌雖已普遍用在各式軌道上，但各系統對長鉚鋼軌多少仍未完全釋疑，主要原因是長期累積的實務經驗無法完全接納連續長鉚鋼軌的緣故。



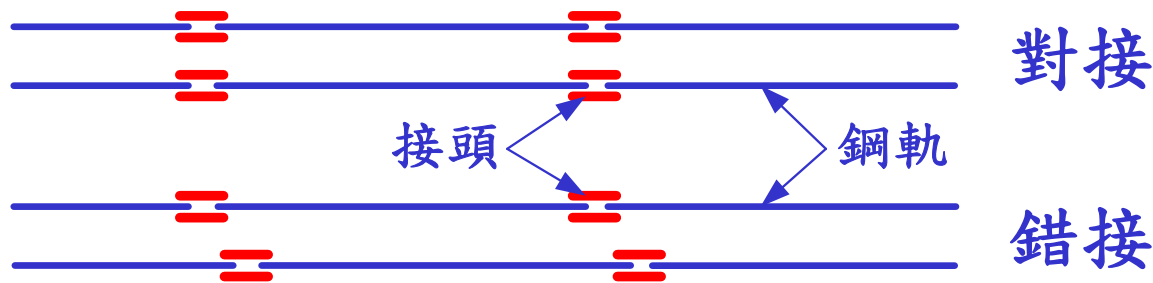
前言 (4/5)

- 軌道工程以實務經驗為導向已是不爭的事實，但經驗具有相當主觀性與變異性，同一件事情，因不同人的感受程度，其留下的經驗也不同，這也造成軌道工程領域內常存有對問題的看法互異的情況。



■ 魚尾鈹接頭配置採對接或錯接案例（1/2）

□ 魚尾鈹接頭可分成普通接頭與絕緣接頭，早期CWR設置不普遍，魚尾鈹接頭對軌道使用壽年、乘車舒適性及環境衝擊影響很大，因而有同股軌道之接頭係採對接或錯接之爭議，相互所持論點完全相佐，惟隨著CWR之推廣，此項議題已逐漸沈寂。





■ 魚尾鉸接頭配置採對接或錯接案例 (2/2)

□ 臺鐵

- 日據時代：對接
- 光復後：錯接（美援）
- 鐵路電氣化：對接（德、日技術）
- 鋪設鋼軌應採用對接式，但情形特殊或半徑小的曲線得採用錯接式。

□ 臺北捷運

- 初期規範：錯接（美國捷運總顧問）
- 目前規範：無對接或錯接之限制



接頭配置採對接或錯接理由彙整

項目	對接	錯接
適宜鋪設位置	直線或大半徑曲線	曲線
適宜鋪設路段	新鋪或路基不佳	路基堅固
接頭受力	較大	較小
左右擺動	較小	較大
接頭下沈	同時	錯開
乘客上下舒適性	較差	較佳
乘客水平舒適性	較佳	較差
接頭維修	較省	較費工
道碴維護	較費工	較省
枕木數量	較少	較多
採用國家	日本、歐洲	美國



前言 (5/5)

- 利用軌道力學分析噪音振動問題是目前熱門研究項目。
- 以下謹就軌道工程的理論基礎與力學分析作初淺介紹，希望不久的將來，軌道結構亦可像鋼筋混凝土結構、預力混凝土結構、鋼結構等，有一完整的分析程序與設計準則可供依循，屆時軌道工程才可能真正獨立成為一個學門。



課程大綱

第十章 漫談軌道力學

第一節 軌道負荷

第二節 軌道力學發展經過

第三節 軌道力學分析

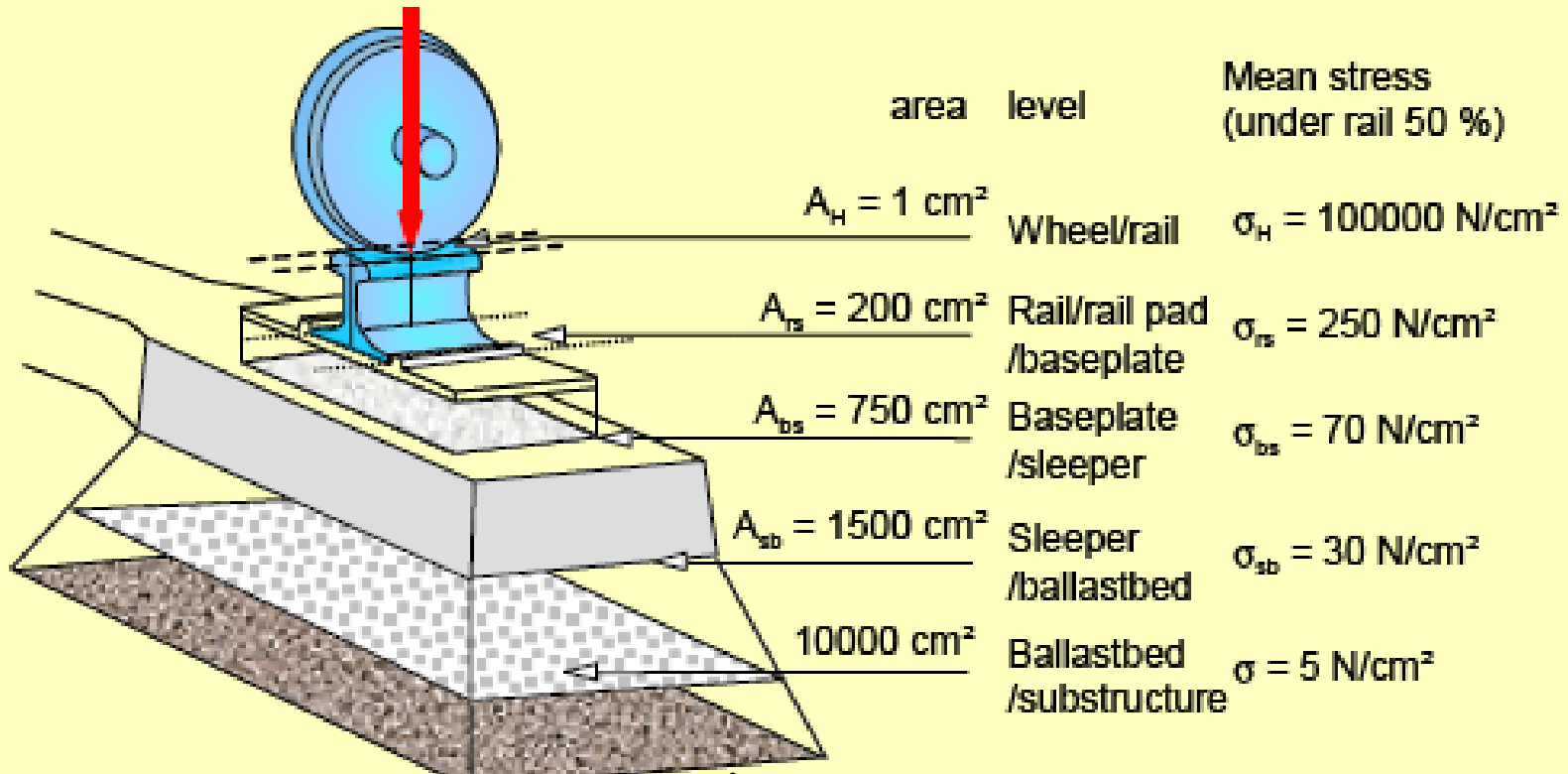
第四節 軌道挫屈行為

第五節 橋樑軌道互制行為



Axle: $P = 200 \text{ kN}$

Wheel: $Q = 100 \text{ kN}$



■ 輪軌負荷層層傳遞的目的地是將輪軌高接觸應力，經由承載面積不斷的擴大，以逐步降低應力值。



軌道負荷

- 依來源分類可分成：
 - 電聯車與軌道之靜態負荷
 - 電聯車行駛衍生之動態負荷
 - 軌溫變化衍生之負荷



臺北捷運電聯車靜態負荷

- 設計軸重為162KN
- 電聯車的設計重量

設計重量	三車組
W1—空重(皮重)	113.0t
W2—座位滿載(每車60人)	123.8t
W3—座位滿載+每平方公尺站6人(每車319人)	170.4t
W4—座位滿載+每平方公尺站7人(每車370人)	179.6t
W5—結構容許之最大載重(每車約461人)	196.1t

附註：表中每人以60公斤計。



臺北捷運軌道靜態負荷

- 鋼軌重量為每公尺**60.34**公斤。
- 標準型彈性基鈹可假設每塊**10**公斤。
- 淡水線預力混凝土枕每根重量約**283**公斤



電聯車行駛衍生之動態負荷

- 電聯車正常運行之衝擊、搖擺、蛇行等行為衍生之負荷。
- 電聯車加速、減速、煞車等行為衍生之縱向負荷。
- 曲線段有無超高對軌道所承受之側向負荷影響至巨，此亦將影響垂向負荷之大小。
- 電聯車懸吊系統異常衍生垂向負荷降低。
- 鋼輪或鋼軌局部缺陷或不連續對動態負荷的加成作用。



電聯車行駛衍生之動態負荷

- 目前數值分析及套裝軟體的發展現況，其足以模擬前揭動態負荷，惟除專業研究之目的外，軌道在規劃或設計階段是少有系統會如此分析，一般係引用動態衝擊係數（**Dynamic Impact Factor, I_d** ），將動態問題以擬靜態（**Quasi-static**）方式處理。
- 動態衝擊係數 = 動態負荷 / 靜態負荷



動態衝擊係數 (1/7)

- 美國 AAR (Association of American Railroads) : 為美國軌道設計通用的動態衝擊係數。

$$I_d = 1 + 5.2V / D_w$$

其中

V : 行車速率, km/hr

D_w : 鋼輪直徑, 760~850 mm



動態衝擊係數 (2/7)

- 美國 AREA (1992) : 適用於 PC 枕設計， I_d 與行車速率或鋼輪直徑無涉。

$$I_d = 1 + 2 = 3$$

- Talbot (1918)

$$I_d = 1 + 0.0062 (V - 8)$$

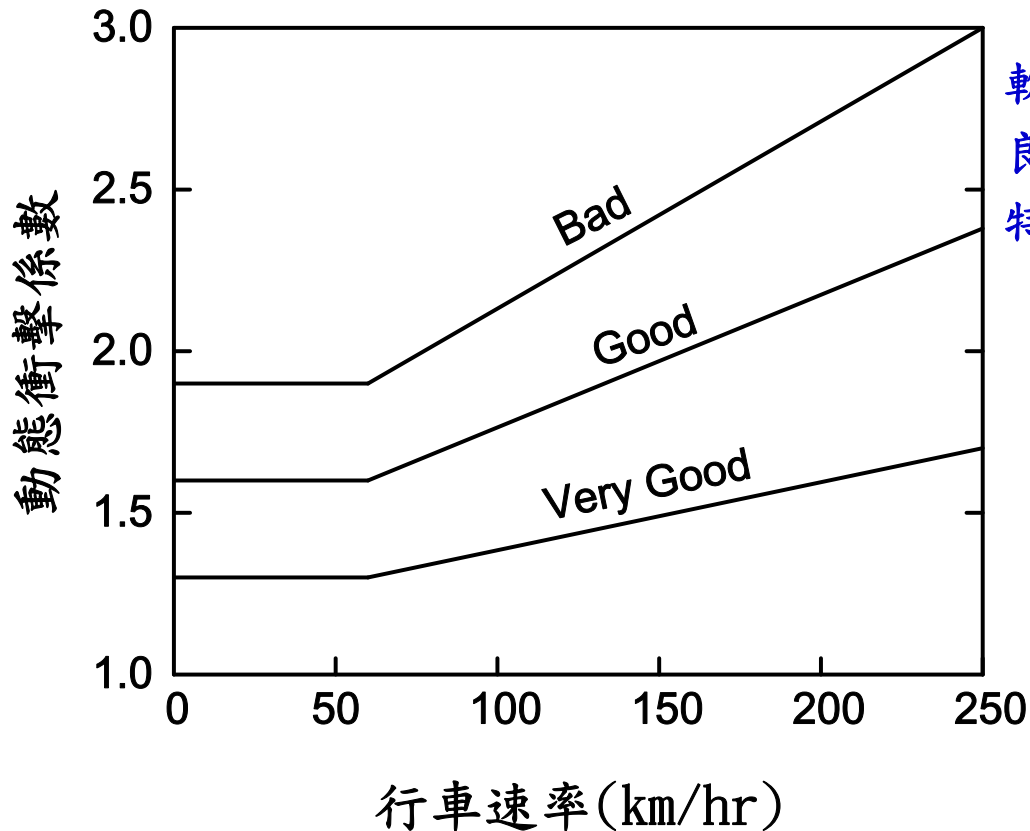
其中

V : 行車速率，km/hr



動態衝擊係數 (3/7)

■ 德國鐵路 (Eisenmann, 1972)



軟弱道床 (Bad) : $k=14\text{MPa}$

良好道床 (Good) : $k=28\text{MPa}$

特優道床 (Very Good) : $k=42\text{MPa}$



動態衝擊係數 (4/7)

■ 日本鐵路：（須田征男，1997）

$I_d = 1 + 0.3V / 100$ ，連續長銲鋼軌

$I_d = 1 + 0.5V / 100$ ，普通接頭鋼軌

其中

V ：行車速率，km/hr。



動態衝擊係數 (5/7)

■ 中國大陸

$$I_d = 1 + 0.60V / 100 \quad (\text{鋼軌應力分析})$$

$$I_d = 1 + 0.45V / 100 \quad (\text{鋼軌以下諸元應}$$

力或沈陷分析)

其中

V : 行車速率, km/hr



動態衝擊係數 (6/7)

■ 英國鐵路：(Cope, 1993)

$$I_d = 1 + \beta V (KM_u)^{1/2} / P_s$$

其中

V ：行車速率，m/sec

K ：整體軌道勁度，KN/m

M_u ：簧下質量，kg

P_s ：靜態負荷，KN

β ：軌道垂向不整衍生之相對傾角，rad



動態衝擊係數 (7/7)

- 前述動態衝擊係數公式，除英國鐵路是由理論推導外，其餘都是經驗公式或是實驗量測結合經驗公式，其間差異頗大，以捷運一般最高行駛速率80km/hr為例，動態衝擊係數的變化由1.3至3.0不等，故引用時需特別注意。



軌溫變化衍生之負荷 (1/3)

- 軌溫變化衍生之負荷主要為鋼軌因溫度變化且伸縮行為受限而產生的縱向壓力或張力，此縱向壓力或張力的大小亦受扣件系統與軌道承托系統互制行為的影響。
- 以近代軌道結構強度，靜態負荷與動態負荷只會影響軌道元件的使用壽年，但軌溫變化衍生之負荷，則可能破壞軌道結構，造成軌道挫屈或斷軌，直接威脅到行車安全。



軌溫變化衍生之負荷 (2/3)

- 以鋼軌鋪定溫度為零應力溫度，則隨著周遭溫度的改變，鋼軌溫度也會隨之變動：
 - 當氣溫越高時，鋼軌溫度會比氣溫更高
 - 當氣溫越低時，鋼軌溫度則比氣溫更低這是由於高溫日曬與低溫輻射的緣故
- $\Delta T = \text{鋼軌溫度} - \text{零應力溫度}$
 - $\Delta T > 0$ ，鋼軌受壓，軌道有潛在挫屈行為
 - $\Delta T < 0$ ，鋼軌受拉，鋼軌有潛在拉斷行為



軌溫變化衍生之負荷 (3/3)

- 鋼軌可承受的拉力強度遠大於挫屈強度，且經由彈性扣夾的設計，可適當地控制斷軌間隙，不致衍生斷軌造成電聯車出軌行為，故一般系統設定的零應力溫度會比鋼軌平均溫度高出5至10°C。



各國或各系統CWR鋪定溫度

名稱	零應力溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	鋼軌溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
臺北捷運淡水線 (平面及高架段)	30 \pm 3	0 ~ 60	\pm 33
臺北捷運初期路網 (地下段)	20 \pm 3	0 ~ 60	-23 ~ 43
臺北捷運其它路線 (平面及高架段)	40 \pm 3	0 ~ 60	-43 ~ 23
臺北捷運後續路網 (地下段)	22 \pm 3	0 ~ 60	-25 ~ 41
臺鐵	35~40	0 ~ 60	-40 ~ 25
美國亞特蘭大捷運	27	—	\pm 39
美國舊金山捷運	16~27	—	\pm 28
香港機場快線	32 \pm 3	—	—
英國鐵路	21 ~ 27	-20 ~ 50	-47 ~ 29
德國鐵路	17 ~ 23	-30 ~ 60	-53 ~ 43
日本鐵路	25 ~ 30	-10 ~ 60	-40 ~ 35



課程大綱

第十章

漫談軌道力學

第一節 軌道負荷

第二節 軌道力學發展經過

第三節 軌道力學分析

第四節 軌道挫屈行為

第五節 橋樑軌道互制行為



概述 (1/2)

- 電聯車行駛在無限長度的鋼軌，而鋼軌由不連續扣件固定在軌道承托系統，軌道承托系統則座落在路基、橋樑或隧道上，其中鋼軌、扣件與軌道承托系統構成軌道工程的領域。
- 軌道力學包括模擬軌道受力狀況、計算軌道變形、分析軌道諸元之應力與應變、噪音振動之分析與模擬等，其目的除確保行車安全外，提升軌道元件的使用壽年及減振抑噪等，一直是軌道界努力的方向。



概述 (2/2)

- 初期軌道主要是以道碴道床為主，故軌道力學的發展亦一直圍繞在道碴道床軌道，因道碴道床軌道係由鋼軌、枕木、扣件與道碴等組合而成，各諸元及諸元間之結合模擬複雜而常採理想化處理。
- 後續無道碴道床的發展及配合數值分析的應用，其分析模式相較於道碴道床軌道不僅簡易且更趨於現況。



軌道力學發展經過 (1/6)

■ 縱枕軌道 (Longitudinal Tie Track)

- 1867年 Winkler, E. 首先提出軌道視同無限長的彈性樑，彈性樑則座落在連續彈性支承上之道床模態，用以模擬縱枕軌道行，並解析無限長的樑承受等距且等大小之集中負荷案例。
- 1882年 Schwedler, J. W. 利用 Winkler 道床模態，將問題擴大至單一集中負荷上。
- 1888年 Zimmerman, H. 專書探討縱枕軌道與橫枕軌道的力學理論，其除針對一些有興趣之問題作分析外，並將 Winkler 道床模態的解析解與實驗值進行比較，結果相當接近。



軌道力學發展經過 (2/6)

■ 橫枕軌道 (Cross Tie Track)

- 1871年 Winkler, E. 以無限長之彈性樑，座落在不連續 (Discrete) 的剛性支承上，以模擬橫枕軌道的行為，也就是將每根枕木視同剛性支承點來分析。
- 1882年 Schwedler, J. W.、1888年 Zimmerman, H. 則將 Winkler 的剛性支承改成彈性支承，惟仍維持不連續支承狀態。



軌道力學發展經過 (3/6)

■ 橫枕軌道 (Cross Tie Track)

□ 1915年Timoshenko提出若枕木間距足夠小時，其可視為連續彈性支承。1917年ASCE-AREA採用此觀念，以連續彈性支承來模擬橫枕軌道，所發展的分析程序為美國鐵路界所廣為採用，稱為AREA程序，由於此程序是由A. N. Talbot所發展的，故又稱為Talbot程序。



軌道力學發展經過 (4/6)

■ 橫枕軌道 (Cross Tie Track)

- 1970年 Howard Meacham 以彈簧、質量、阻尼建立多自由度的軌道模態。
- 同年 (1970) Lundgren, J. R. 等以有限元素法或稱有限單元法 (Finite Element Method) 利用電腦分析二維模態的軌道結構。
- 1976年 Thompson, M. R. 等將模態延伸至三維。



軌道力學發展經過 (5/6)

■ 橫枕軌道 (Cross Tie Track)

- 目前發展的模態 (Model)，已不再將問題限制在線彈性 (Linear Elastic) 問題，諸如非線性 (Nonlinear)、多層結構系統 (Multi-layered System)、不同材料間的界面行為處理等等。
- 模態的複雜化，主要是針對道碴道床軌道的結構性，但對於無道碴道床軌道，因扣夾與彈性材的材料特性，有時在分析時亦會引進雙線性 (Bilinear)、非線性，甚至粘彈性 (Visoelastic) 的力學行為。



軌道力學發展經過 (6/6)

- 軌道為線狀展開，單獨模擬軌道時，一維的精度已足夠，惟若將支承結構、土層等納入考量，二維與三維模態是有其必要性。
- 輪軌負荷如何模擬是另一重點
 - 擬靜態 (Quasi-static) 負荷
 - 動態負荷 (負荷隨時間而變)
 - 移動負荷 (負荷隨位置、時間而變)



課程大綱

第十章

漫談軌道力學

第一節 軌道負荷

第二節 軌道力學發展經過

第三節 軌道力學分析

第四節 軌道挫屈行為

第五節 橋樑軌道互制行為



軌道力學分析

- 解析解 (Analytical Solution)
 - 彈性支承樑 (Beam on Elastic Foundation)
- 數值解 (Numerical Solution)
 - 有限元數法、邊界元素法等 (本課程不予討論)
- 輪鋼接觸應力與動態行為



軌道垂向特性

- 道床係數 (Foundation Coefficient) c
 - 軌道單位面積產生單位變位所需之負荷值或軌道單位面積的彈性係數
- 道床模數 (Foundation Modulus or Track Modulus) k
 - 軌道單位長度之彈性係數
- 軌道勁度 (Track Stiffness) K
 - 軌道視同單自由度彈簧時之彈性係數



軌道垂向特性

- 假設枕木與道碴之間的有效接觸面積為 A_e ，或有效接觸長度為 l 、寬度為 b ，枕木間距為 a ，則

$$k = A_e \times c / a = l \times b \times c / a$$

- $w_0 = PL^3 / 8EI = P / K$ ，則

$$K = 8EI / L^3 = (64EI k^3)^{1/4}$$

- 鋼軌為 UIC 60，鋼軌剖面之二次力矩為 3055cm^4 ，假設鋼軌的楊氏係數為 $2 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ ，PC枕的長度為 2600mm 、寬度為 225mm 、枕木間距為 750mm 、假設枕木 $2/3$ 全長為有效接觸。



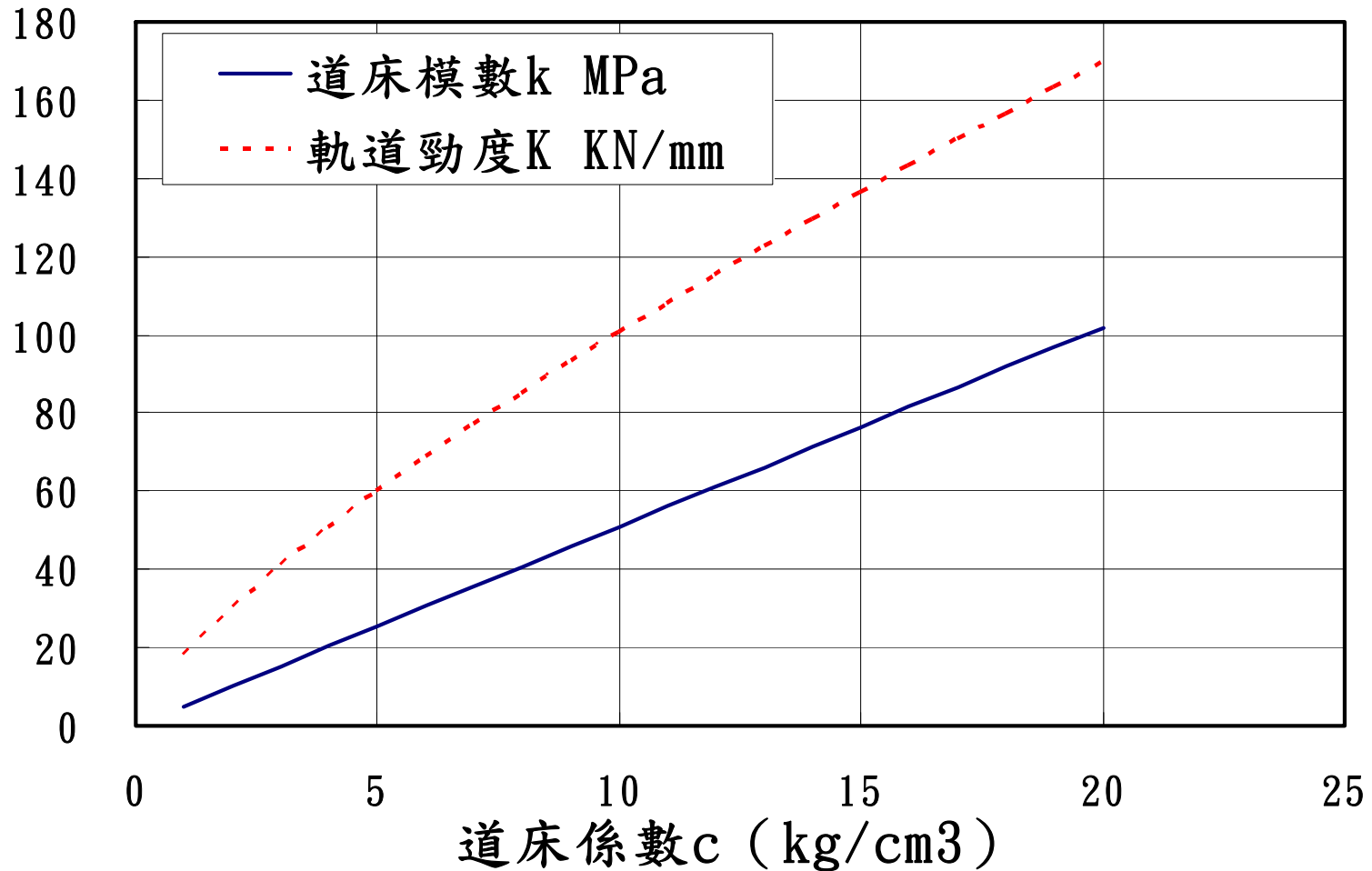
軌道垂向特性

資料來源	道床係數 c (kg/cm ³)	道床模數 k (MPa)	軌道勁度 K (KN/mm)	備註
Coenraad Esveld "Modern Railway Track"	2	10	30	道床很差
	5	25	60	道床差
	10	50	100	良好道床
美國鐵路	3~5	15~25	40~60	普通道床
	9	45	92	良好道床
	15	75	135	特優道床
日本鐵路	5	25	60	軟弱道床
	9	45	92	良好道床
	15	75	135	特優道床

以臺北捷運道碴道床軌道特性為例



軌道垂向特性





AREA鋼軌容許彎曲應力

- AREA普通鋼軌的抗拉強度為 963N/mm^2 、降伏強度為 482N/mm^2 。對CWR再考量溫度效應的影響，額外減少量為 138N/mm^2 。
- 依據AREA建議，其它應考量的安全係數有：
 - 側向彎曲：20%
 - 鋼軌磨耗與之腐蝕：15%
 - 不平衡超高：15%
 - 軌道狀況：25%合成後的安全係數=1.98
- AREA鋼軌容許彎曲應力 σ_b
$$\sigma_b = (482-138) / 1.98 = 174\text{N/mm}^2$$



德國鋼軌容許彎曲應力

軌道等級	容許彎曲應力	
	kg/cm ²	N/mm ²
I 級軌道 II 級軌道	1,500	147
II 級軌道，採用 重型或中型鋼軌	1,600	157
III 級軌道，採用 輕型鋼軌	1,800	176
IV 級軌道及工業 軌道	2,000	204



UIC鋼軌容許彎曲應力

- UIC規範並無規定鋼軌容許彎曲應力，惟UIC 60級數900A鋼軌的抗拉強度880~1030 N/mm²、最小伸長率10%，皆與AREA普通鋼軌相近，故其降伏強度與容許彎曲應力可參照AREA的規定。

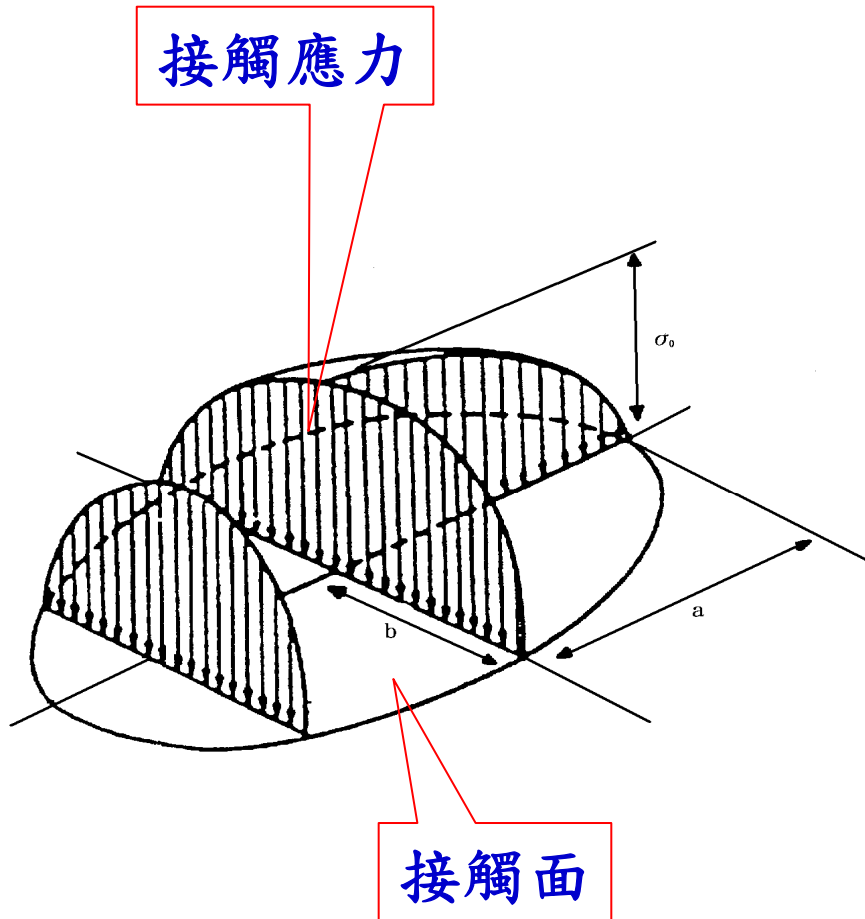


輪鋼接觸應力與動態行為

- 鋼軌除承受垂向、側向與縱向負荷外，尚有輪軌接觸應力（**Contact Stress**），由於鋼軌受力面積小，壓應力呈現高度集中現象，其往往超出鋼材的降伏強度，此種局部高應力係引起鋼軌頭部壓潰及波狀磨耗的主因。
- 若鋼材內部存有瑕疵，此高壓應力衍生的剪切應力有可能造成鋼軌劈裂，直接威脅行車安全。
- 輪軌接觸的蠕滑（**Creepage**）與回旋（**Spin**）現象係屬電聯車動態行駛範圍，惟其關係到輪軌噪音源，故提供有興趣者在這方面的指引與參考。
- 最後介紹輪軌動態衝擊。



靜態接觸

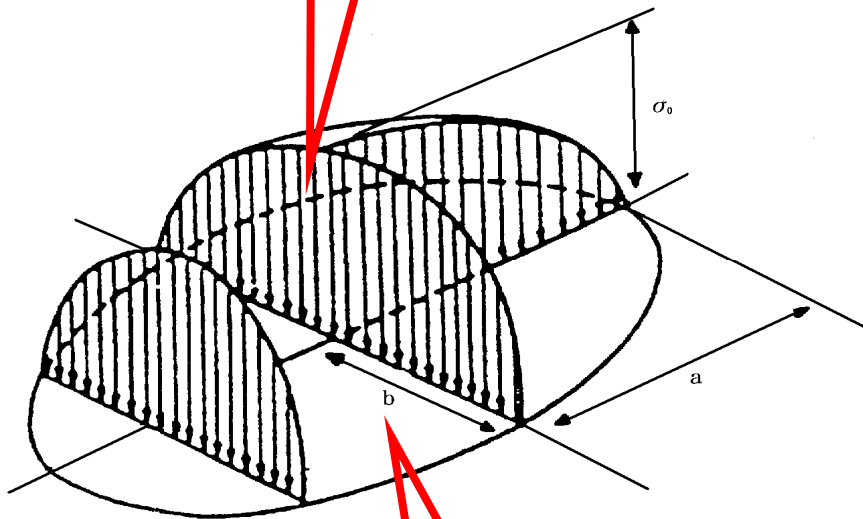


- 兩線彈性體間的接觸問題，最早是由Hertz, H. 在1881年提出探討，其假設接觸面間無磨擦力存在。
- 依據Hertz理論，而推導出接觸面呈橢圓形分佈，且接觸應力在橢圓形的接觸面上亦呈半橢圓形分佈，橢圓形的圓心位置，其接觸應力最大，且為平均應力的1.5倍。



$$\left(\sigma / \sigma_0\right)^2 + \left(x / a\right)^2 + \left(y / b\right)^2 = 1$$

接觸應力



接觸面

- a及b分別為橢圓形接觸面的長、短軸半徑；
- σ 為接觸面內位在座標(x,y)的接觸應力；
- σ_0 為橢圓形圓心位置的接觸應力。

$$\sigma_0 = 1.5Q / A_0$$

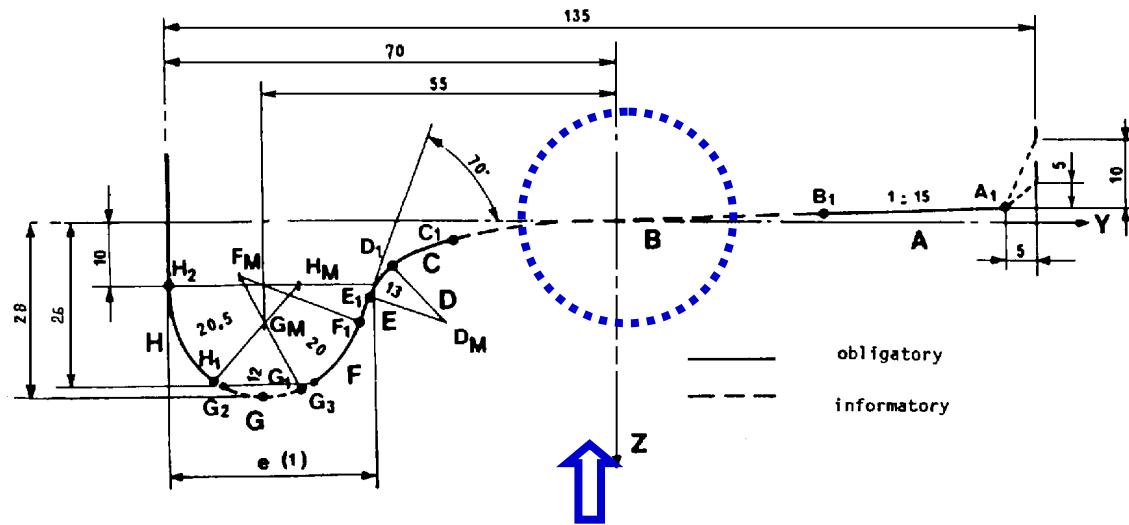
□ Q 為作用於兩接觸面的垂直負荷；

□ A_0 為橢圓形接觸面的面積， $A_0 = \pi ab$

如何計算橢圓形接觸面的長、短軸半徑?? (請參考相關文獻)⁵⁰

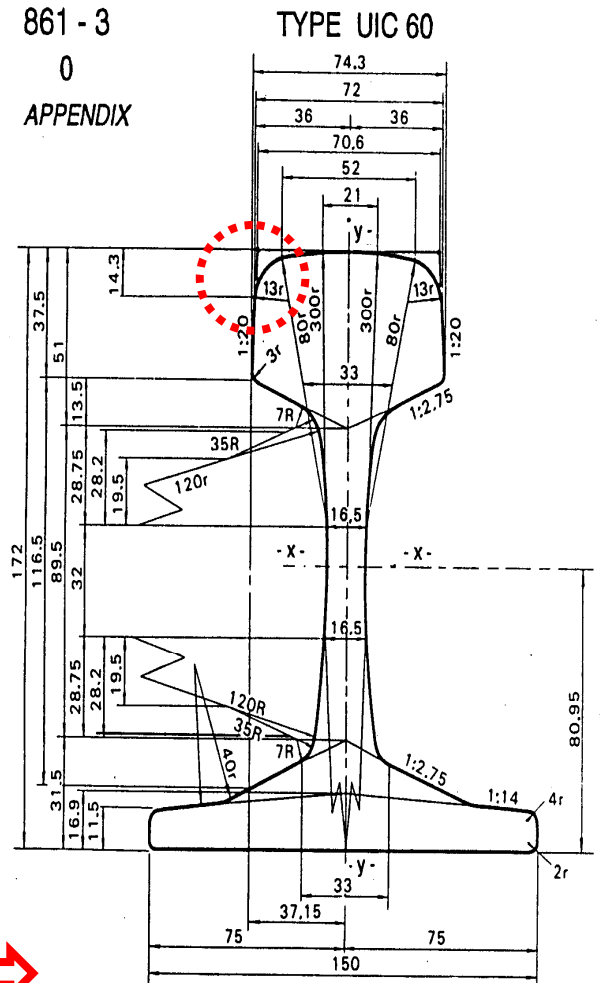


UIC S1002鋼輪剖面與UIC 60鋼軌 剖面之接觸應力



鋼輪：接觸位置主要在B區，為多項式函數，曲率半徑約由52mm漸增至直線，再由直線變化至半徑約為258mm；鋼輪另一方向的曲率半徑為380~425mm。

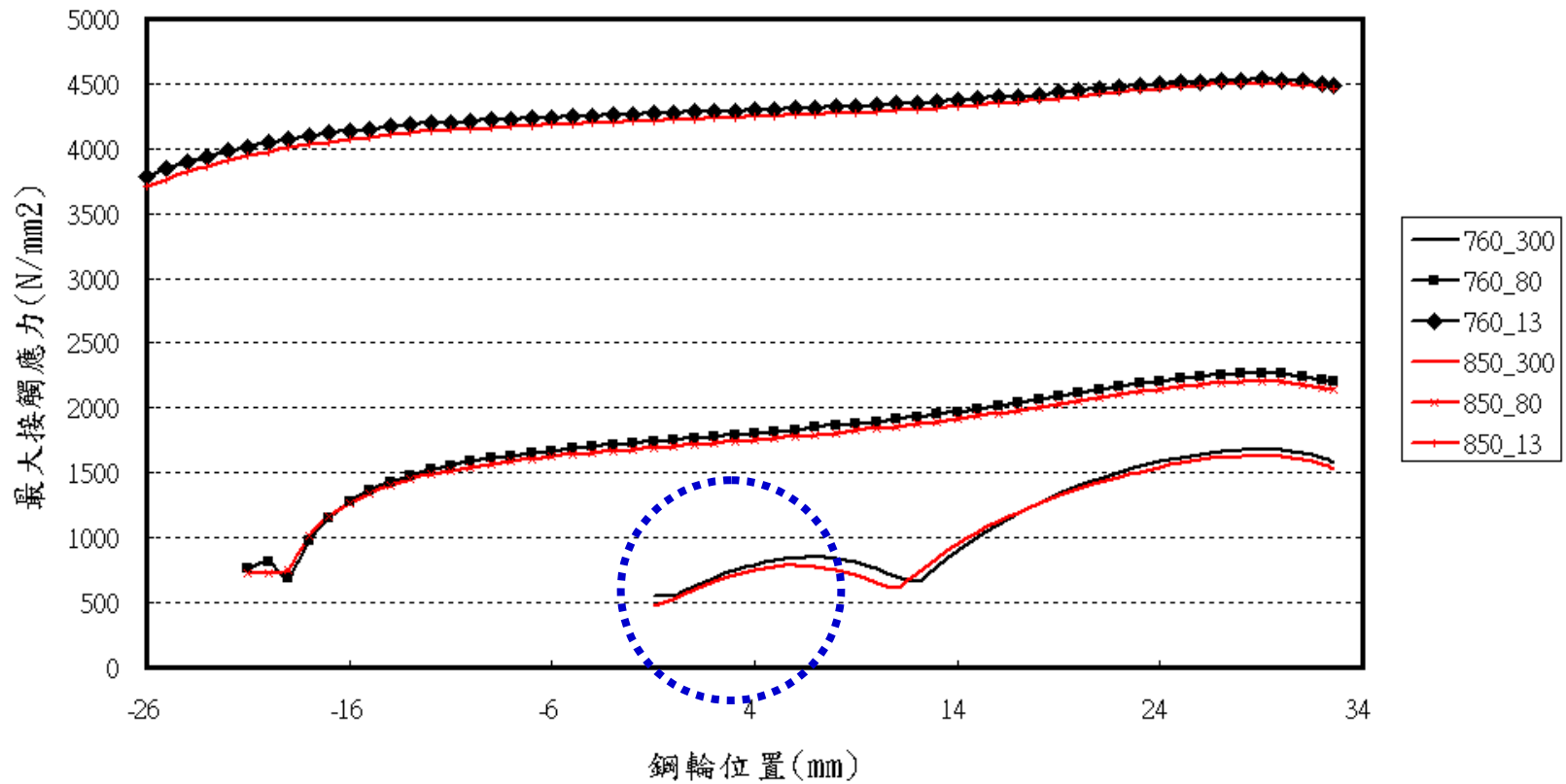
鋼軌：由半徑13mm、80mm與300mm構成；另一方向係沿鋼軌縱軸，半徑視同無限大。





鋼輪直徑760~850mm

UIC S1002鋼輪與UIC 60鋼軌之接觸應力





動態接觸

- 實際輪軌接觸是隨時間與位置而變動，基本上為動態接觸行為。若不考慮磨擦力的作用，則輪軌作用力除前述靜態輪負荷外，尚需考慮動態所造成的負荷增加量。
- 動態負荷增加量不僅隨靜態負荷大小而變，且與輪軌表面的幾何不平順、輪軌瞬間接觸點的鋼軌與鋼軌動態位移量差值有關，此問題亦歸類為Hertz接觸問題，惟已屬非線性彈性接觸問題。



蠕滑與回旋（1/4）

- 鋼輪沿鋼軌踏面滾動的接觸問題，屬動態行為，其藉由輪軌接觸面間的磨擦力，使鋼輪得以向前運行。
- 當外界施予鋼輪扭力而在鋼軌上滾動時，接觸面上的鋼軌亦同時提供鋼輪牽引力（**Traction Force**）而使鋼輪向前運行。
- 當牽引力小於動磨擦力時，鋼輪以純滾動（**Pure Rolling**）方式運行，此時鋼輪行走的距離與其滾動的長度相同。



蠕滑與回旋 (2/4)

- 一旦扭力增加而使鋼輪滾動的長度超過鋼輪行走的距離時，輪軌間就會出現微量滑行 (Slip) 與繞著接觸面的法線方向轉動的現象，此微量滑行現象稱為蠕滑 (Creepage)、繞著接觸面的法線方向轉動的現象稱為回旋 (Spin)，其中蠕滑又可分成平行鋼軌縱軸之縱向蠕滑 (Longitudinal Creepage) 與垂直鋼軌縱軸之側向蠕滑 (Lateral Creepage)。一旦扭力再加大時，鋼輪與鋼軌將產生全面滑行 (Full Slip)。



蠕滑與回旋 (3/4)

- 最早探討滾動接觸問題的是 Carter, F. C. (1926)，其假設鋼輪為柱體，鋼軌是相當厚的版，則兩者滾動接觸行為只有縱向蠕滑納入考量。
- 1967年Kalter, J. J. 將側向蠕滑一併納入考量，並提出簡單的近似解 (Simple Approximate Solution)。
- 1979年Kalter, J. J. 提出Kalter線性理論 (Linear Theory)，其同時考量縱向、側向蠕滑及回旋行為，並提出完整解析解。



蠕滑與回旋 (4/4)

- 滾動接觸問題係屬電聯車動態行駛範圍，惟其關係到輪軌噪音源，故提供有興趣者在這方面的指引與參考。



輪軌動態衝擊 (1/3)

- 1970年代英國鐵路Derby技術中心Lyon, D.以彈性支承的Euler樑模擬接頭處的輪軌衝擊力，並指出該處之輪軌衝擊力隨時間而變化，並存在有兩個峰值。
- 當鋼輪通過接頭後0.25~0.5 ms (10^{-3} sec) 時出現第一個峰值，稱為 P_1 力，屬高頻範圍，相當於轉向架簧下質量與鋼軌質量結合Hertz接觸勁度的自然頻率。
- 當鋼輪通過接頭後7ms左右出現第二個峰值，稱為 P_2 力，屬中低頻範圍，為轉向架簧下質量與軌道質量結合軌道勁度的自然頻率。



輪軌動態衝擊 (2/3)

- P_1 力是輪軌接觸達最大壓縮量時的高頻負荷，其作用很快被鋼軌、枕木的慣性行為所吸收，故只會對鋼軌頭部造成破壞，其作用力不致再向下傳遞。
- P_2 力是轉向架簧下質量作用下之鋼軌達到最大位移時的中、低頻負荷，一般係以擬靜態處理，其對鋼軌、枕木、道床、路基或土建結構體均會有影響。
- 由於鋼軌具有相當的勁度，當輪軌接觸量達最大時，鋼軌尚未達到最大位移，故 P_2 力發生的時間會落後於 P_1 。



輪軌動態衝擊 (3/3)

- 輪軌衝擊是由接觸面上的兩物體（鋼輪與鋼軌）因表面不平順所衍生的現象
- 鋼輪部分：輪面的擦傷、幾何不平順、鋼輪偏心
- 軌道部分
 - 軌道幾何不平順：包括高低、水平、方向等不平順及鋼軌踏面的磨耗，尤其是波狀磨耗（Corrugation）。
 - 鋼軌接頭狀態不良：包括錯牙接頭、接頭下陷（Dip）或稱低接頭等。
 - 道床或路基沈陷。