

## Lecture #5

### 5.6 軌縫

一般鐵路軌道結構中，鋼軌藉扣件固定於枕木，枕木又藉道碴固定於路線上，因此，鋼軌的伸縮受到某種程度的拘限。若此種拘限力不足以抑制鋼軌的伸縮，則鋼軌與鋼軌間須預留適當的間隙，以吸收鋼軌的伸縮，防止鋼軌內部產生不正常的軸力，破壞軌道結構，危及行車安全。此種鋼軌與鋼軌間預留的間隙即為軌縫。

軌縫太大，易於冬季軌溫下降時，因鋼軌軸拉力太大而拉斷鋼軌接頭魚尾鉸或魚尾螺栓等；反之，軌縫太小，則夏季軌溫升高時，將因鋼軌內部累積太大的軸壓力，而將軌道向側方推擠，造成軌道挫屈。

#### 5.6.1 軌縫理論

如前述，軌縫兩項功用分別為：

- (1) 避免軌溫上昇時的軌道挫屈。
- (2) 避免軌溫下降時的軌道斷裂。

下面由此兩方面來探討適當的軌縫寬度。

##### 1. 防止軌道挫屈所需的軌縫寬度

軌道為一種細長結構，受到相當大的軸向壓力後，可能產生側向位移，稱之為軌道挫屈。若鋼軌鋪設時預留的軌縫（設定軌縫）為  $e$ ，鋼軌鋪設溫度為  $t$ ，則軌溫上昇時的軌溫與軌縫關係示如圖 5-20(1)，說明如下：

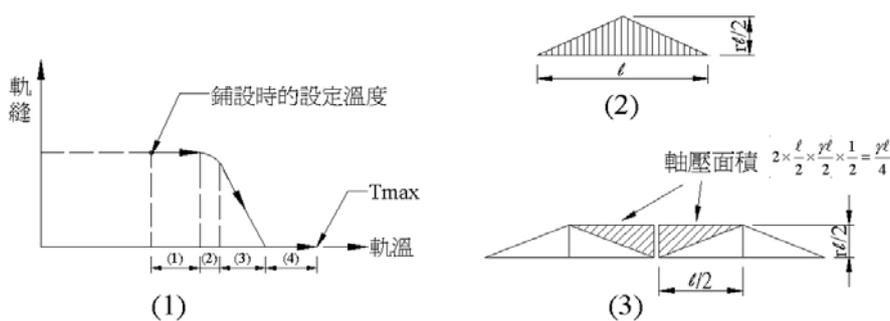


圖 5-20 軌溫上昇時軌縫、軸壓及軌縫減小量

- (1) 為魚尾鉸拘束力  $R_f$  的溫度換算值，等於  $R_f / EA\beta$ 。
- (2) 為鋼軌受道床縱向抵抗力  $\gamma$  拘限，產生軸向壓力，如圖 5-20(2)，其忍受限度的溫度變化量，等於  $\gamma l / 2EA\beta$ 。此溫度變化量造成的軌縫減小量為  $\gamma l^2 / 4EA$ ，示如圖 5-20 (3)。
- (3) 為軌縫自（預留軌縫  $e$ ）－（②項軌縫減小量）縮小至軌縫 0 時的溫度變化量，

$$\text{其值爲：} \left( e - \frac{\gamma \ell^2}{4EA} \right) \times \frac{1}{\beta \ell} = \frac{e}{\beta \ell} - \frac{\gamma \ell}{4EA\beta}$$

(4) 爲  $t_{\max} - (t + \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3})$ 。上列式中

式中  $R_f$ ：魚尾鉸拘束力 [F]

$E$ ：鋼軌鋼楊氏彈性係數 [FL<sup>-2</sup>]

$A$ ：鋼軌斷面積 [L<sup>2</sup>]

$\beta$ ：鋼軌線脹係數 [T<sup>-1</sup>]

$\gamma$ ：道床縱向抵抗力 [FL<sup>-1</sup>]

$\ell$ ：鋼軌長度 [L]

$t_{\max}$ ：最高軌溫，超過此溫度即發生軌道挫屈。

若軌道的最低挫屈強度爲  $P_t$ ，則爲防止軌道挫屈的極限式爲：

$$P_t = EA\beta \left\{ t_{\max} - (t + \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3}) \right\} + R_f + \frac{\gamma \ell}{2}$$

即

$$P_t = \frac{\gamma \ell}{4} + EA\beta \left( t_{\max} - t - \frac{e}{\beta \ell} \right) \dots\dots\dots \text{(式 5-1)}$$

由上式可知防止軌道挫屈所需的軌縫與軌道挫屈強度  $P_t$ 、鋼軌特性  $EA\beta$ 、最高軌溫  $t_{\max}$ 、鋪設軌溫  $t$ 、道床縱向抵抗力  $\gamma$  及鋼軌長度  $\ell$  有關。

## 2. 防止軌道斷裂所需的軌縫寬度

軌道受到相當巨大的軸向拉力時，鋼軌接頭可能首先受拉斷裂；而鋼軌接頭斷裂又由魚尾螺栓的彎折變形開始。

設設定軌縫爲  $e$ ，鋼軌鋪設溫度爲  $t$ ，則軌溫下降時的軌縫與軌溫關係示如圖 5-22 (1)，圖中：

(1) 爲魚尾鉸拘束力  $R_f$  的溫度換算值  $R_f / EA\beta$ 。

(2) 爲鋼軌因受道床縱向抵抗力  $\gamma$  拘限，所能承受的軸向拉力，見圖 5-22(2)其溫度變化量  $\gamma \ell / 2EA\beta$ 。此溫度變化量造成的軌縫增大量爲  $\gamma \ell^2 / 4EA$ ，示如圖 5-22 (3)。

(3) 爲軌縫自（預留軌縫  $e$ ）+（②造成的軌縫變化）增大至  $e_{\max}$  的溫度變化量，

$$\text{其值爲：} \left\{ e_{\max} - \left( e + \frac{\gamma \ell^2}{4EA} \right) \right\} \times 1 / \beta \ell$$

(4) 爲魚尾螺栓抵抗彎折變形抗力  $R_b$  的溫度換算值  $R_b / EA\beta$ 。

由圖 5-22(1)知，防止軌道斷裂的極限式爲：

$$t - t_{\min} = \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4}$$

$$e_{\max} = e + \left( t - t_{\min} - \frac{R_f}{EA\beta} - \frac{R_b}{EA\beta} - \frac{\gamma \ell}{4EA\beta} \right) \cdot \beta \ell \dots\dots\dots \text{(式 5-2)}$$

式中  $t_{\min}$ ：最低軌溫，軌溫再低即發生軌道斷裂現象。

$e_{\max}$ ：鋼軌接頭的容許最大裂縫寬度。

由上式知防止軌道斷裂所需的軌縫與容許最大軌縫寬度  $e_{\max}$ 、鋪設溫度  $t$ 、最低軌溫  $t_{\min}$ 、魚尾鉸拘束力  $R_f$ 、魚尾螺栓抵抗力  $R_b$ 、鋼軌特性  $E\alpha\beta$ 、道床縱向阻力  $\gamma$  及鋼軌長度等有關。

鋪設鋼軌時，預留軌縫若在(式 5-1)及(式 5-2)之間，則軌道可不因鋼軌溫度上昇而挫屈，也不致因鋼軌溫度下降而斷裂，故應屬安全。

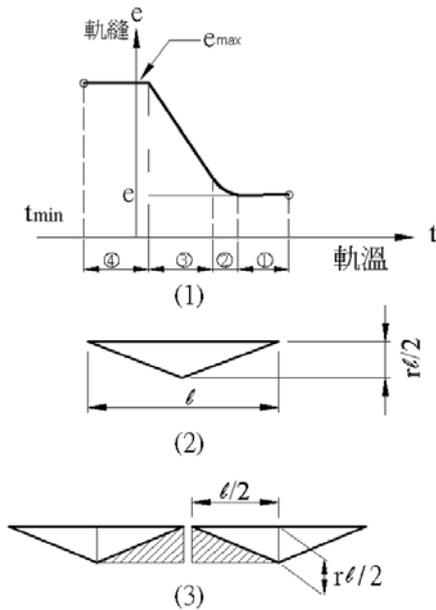


圖 5-22 軌溫下降時的軌縫、軸壓及軌縫增大量

### 3. 理論公式應用例

一般採用 50N 型鋼軌及雙重彈性扣件的軌道，當曲線半徑  $R$  等於 600 公尺，道床橫向抵抗力  $g = 400 \text{ kg/m}$ ，縱向抵抗力  $\gamma = 1.5 \times g = 600 \text{ kg/m}$  時，軌道挫屈強度加 20% 餘裕  $P_t$  約為  $61t$ 。鋼軌接頭的最大軌縫  $e_{\max} = 15.3 \text{ mm}$ 。當魚尾螺栓以  $5,000 \text{ kg-cm}$  的扭力扭緊後，魚尾鉸的拘束力  $R_f$  約為  $19.3t$ ，而魚尾螺栓的抗彎力  $R_b$  為  $3.6t$ 。50N 鋼軌的  $E\alpha\beta = 1.54 \text{ t/}^\circ\text{C}$ ， $\beta = 11.4 \times 10^{-6}$ 。若最高軌溫  $t_{\max} = 60^\circ\text{C}$ ，最低軌溫  $t_{\min} = -10^\circ\text{C}$ ，每一根鋼軌長度  $l$  為 50m，則由(式 5-1)得防止軌道挫屈的極限式為：

$$e = -0.57t + 14.4 \quad \dots\dots\dots \text{(式 5-3)}$$

由(式 5-2)得防止軌道斷裂的極限式為：

$$e = -0.57t + 20.8 \quad \dots\dots\dots \text{(式 5-4)}$$

日本自 1960 年 5 月起採用的設定軌縫公式為：

$$e = -0.57t + 18.8 \quad \dots\dots\dots \text{(式 5-5)}$$

比較(式 5-3)、(式 5-4)、及(式 5-5)知日本採用的設定軌縫在(式 5-3)、及(式 5-4)所示的上下兩極限間，如圖 5-23 所示。對軌道挫屈及斷裂各有  $4.4 \text{ mm}$  及  $2 \text{ mm}$  餘裕，換算為溫度分別為：

$$\frac{4.4}{0.57} = 7.7^\circ\text{C} \quad \text{及} \quad \frac{2}{0.57} = 3.5^\circ\text{C}$$

以台灣鐵路的鋼軌長度  $l = 25\text{ m}$ ，最低軌溫  $= 0^\circ\text{C}$  言。預留軌縫應在(式 5-6)、及(式 5-7)之間，若  $l = 50\text{ m}$ ，則(式 5-6)、及(式 5-7)之係數值分別為括號內數字。比較  $l = 25\text{ m}$  及  $50\text{ m}$  之情形知道兩者之極限值差異甚大，因此；軌縫標準亦應不同。

$$(-0.57) \quad (14.4)$$

$$e = -0.285t + 6.5 \quad \dots\dots\dots (式 5-6)$$

$$e = -0.285t + 20.2 \quad \dots\dots\dots (式 5-7)$$

$$(-0.57) \quad (26.5)$$

### 5.6.2 軌縫變化

隨著軌溫的昇降，軌縫大小變化如圖 5-24 所示，呈一迴圈狀，迴圈上各點的軸壓、溫度變化及軌縫變化如表 5-3 所示(請參閱課本)。

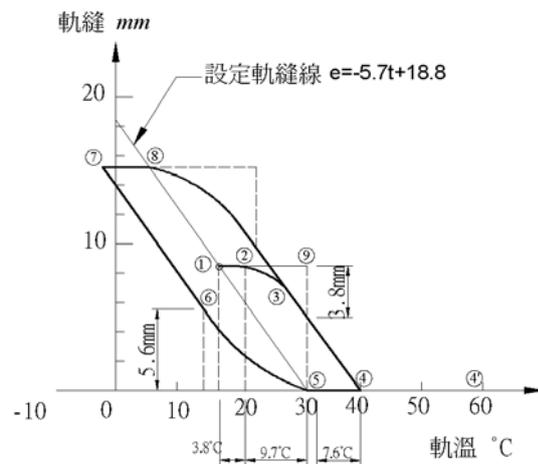


圖 5-24 軌縫變化迴圈

## 5.7 長軌

### 5.7.1 長軌總論

由於鋼軌製造、搬運、裝卸、養路作業等需要，鋼軌出廠的標準長度多在10~40公尺間。因此，軌道每隔10~40公尺即有一鋼軌接頭。但鋼軌接頭為軌道結構的最大弱點，受高速行駛列車的巨大衝擊，極易下沉、鬆動而變形弱化。為強化軌道結構，有取消鋼軌接頭的必要。往昔咸認為鋼軌溫度伸縮與其本身長度成比例；鋼軌長度太長，必增大伸縮量，須靠鋼軌接頭的軌縫來吸收此種伸縮量。但軌縫太寬，將嚴重影響行車安全及乘車舒適感，因此，無法取消鋼軌接頭。

近年研究及實證發現：將道碴、枕木、鋼軌、鋼軌扣件視為軌道整體結構，利用軌枕及道碴阻力控制其伸縮，則鋼軌伸縮僅發生於兩端各約 100 公尺範圍內，中間部份則為不動區間；鋼軌長度超過 200 公尺，即無論超過多少，其伸縮量並無變化，於是而有焊接鋼軌的出現。

焊接鋼軌長度超過在最大溫度昇降變化下，其中央部份有不動區間者，稱為連續焊接鋼軌（continuous welded rail）簡稱長軌（long rail），一般以 CWR 表示。

### 5.7.2 長軌理論

#### 1. 鋼軌溫度伸縮

鋼軌長度會隨軌溫昇降而增減。鋼軌溫度與大氣溫度有關。夏季鋼軌因受太陽輻射熱的關係，通常軌溫較大氣溫度約高 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 。冬季低溫時大氣溫度與軌溫大約相同。

鋼軌溫度變化，以一天溫度變化為小週期，隨季節遷移為大週期。由測定可知鋼軌溫度約與大氣溫度成比例，但也受當時的晴曇、時刻、季節、風速及地形所支配。

一般出廠長度鋼軌受溫度變化，將其魚尾鉸解開，其自由伸縮量幾近理論數值，即鋼軌長度變化與鋼軌鋼（rail steel）的線脹係數 $\beta (=1.4 \times 10^{-6})$ 成比例，但受軌道連結裝置、道床抵抗力大小影響。

鋪設鋼軌長度超過 50m 以上時，其伸縮受鋼軌與墊鉸間之摩擦力及枕木在道床中移動時的道床阻力拘束，難以自由伸縮。因此較長的鋼軌，其隨溫度變化伸縮僅發生在兩端 50~100m 範圍內。為扼要說明長軌的伸縮情形，請參考下述實驗：

- (1) 用枕木尺寸 15 分之 1 的木片以間距 5cm 排列，將橡膠帶釘牢於上，構成一軌框模型，木片代表枕木，橡膠帶代表鋼軌。圖 5-28 示在空中由兩端拉開的狀況，此時橡膠帶因無伸縮阻力，木片間距等距延伸。

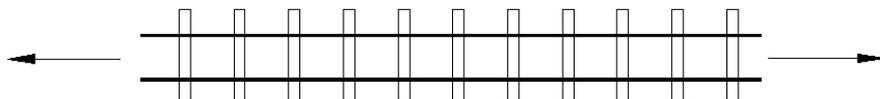


圖 5-28 長軌理論模型（自由伸縮）

- (2) 圖 5-29 係將軌框模型擺在粗糙桌子上，由兩端拉開的情形。此時枕木底面與桌面的摩擦力相當於道床阻力，可阻止橡膠的延伸，致兩端延伸較大，中央部份則保持未受張力前之間距而全無延伸，形成了所謂不動區間。

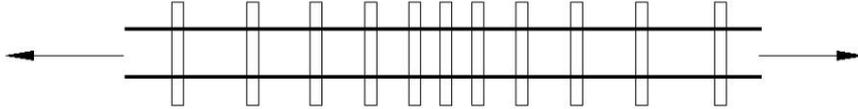


圖 5-29 長軌理論模型（受道床抵抗而延伸）

- (3) 於空中拉開軌框模型，再置於粗糙桌面後任其收縮，則如圖 5-30 所示，中央仍形成不動區間，只有兩端收縮。

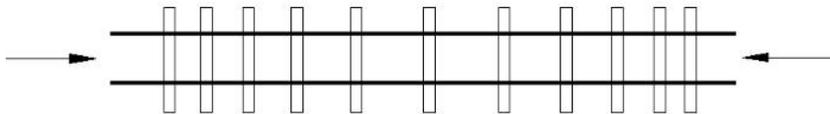


圖 5-30 長軌理論模型（受道床抵抗收縮）

## 2. 長軌不動區間

鋼軌中央部份不受軌溫變化影響，全年無伸縮的區間稱為長軌不動區間。不動區間之長度，隨道床阻力與溫度變化大小而異。一般鋼軌長度至少需在  $200\text{ m}$  以上，才有不動區間存在，如圖 5-31 所示。

## 3. 長軌兩端伸縮量

超過  $200\text{ m}$  以上的長軌，其伸縮部份仍限於兩端  $50\sim 100\text{ m}$  範圍內，其伸縮量與鋼軌長度無關，乃依溫度變化及縱向道床阻力而決定。日本星野博士曾分析長軌伸縮理論值並經 1941 年以  $200\text{ m}$  長的軌道試驗證實。依其理論公式，長軌兩端伸縮量如圖 5-32 示。可見  $200\text{ m}$  以上長軌，其兩端的伸縮量與無限長的長軌之情形幾乎相等。長軌兩端的伸縮量雖然不大，但標準軌的接頭最大軌縫僅有  $15\text{ mm}$ ，難於容納伸縮量，有使用伸縮接頭或緩衝軌的必要。

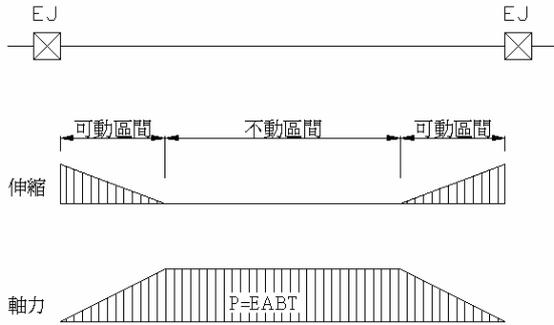


圖 5-31 長軌不動區間

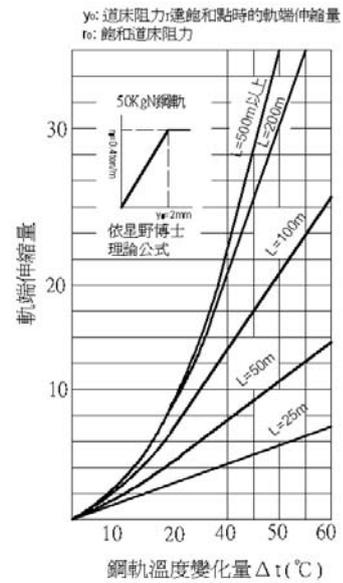


圖 5-32 溫度變化與軌端伸縮關係

#### 4. 軌溫變化與軸力

溫度變化時，鋼軌如不受特殊阻礙，則由線膨脹係數支配其伸縮；然在縱向道床阻力阻止下，其受阻伸縮量則成爲壓力或張力，蘊藏在鋼軌內形成爲軸力。鋼軌自由伸縮量可依下式計算：

$$l = L \cdot \beta \cdot \Delta t \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 } 5-9)$$

- 式中  $l$ ：伸縮量  
 $L$ ：鋼軌長度  
 $\beta$ ：線膨脹係數( $11.4 \times 10^{-6}$ )  
 $\Delta t$ ：溫度變化量

再由前述軌框模型說明溫度變化與軸力及伸縮的關係：先將軌框模型懸空拉開後，擺在桌上緩慢放手。枕木底面及桌面間之摩擦力可阻止橡膠縮短，使中央部份完全沒有縮短並蓄有當初在空中時所受張力。兩端附近枕木則向中央移動，兩端枕木的移動量最大。此因靠近端部橡膠拉力遞減，兩端之拉力最小。此和長軌溫度下降至低於鋪設溫度時之情形相似，溫度及伸縮量與鋼軌軸力之關係如圖 5-33。

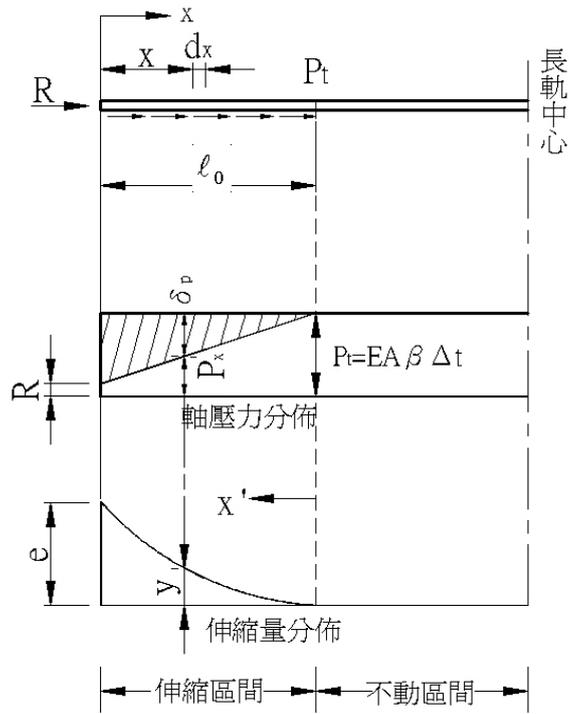


圖 5-33 鋼軌軸力與伸縮量分佈圖

## 5.8 鋼軌爬行 (rail creepage)

鋼軌受壓即陷下，車輪前方則稍為浮起。因此隨著列車的前進，軌道發生波狀運動。若鋼軌與枕木的扣緊不良，則鋼軌將向車行方向爬行；若鋼軌扣緊於枕木，則鋼軌連同枕木一起爬行。同時煞車與接頭之衝擊等亦會把鋼軌向前推。反之，上坡地段，動輪與鋼軌的摩擦力，將使鋼軌向後（向下）爬行。

爬行的主要原因是軌道的波狀運動，路基不良地段及列車進站煞車地段最易發生。

爬行影響鋼軌接縫的均勻分佈，擾亂枕木配列。欲防止爬行，須阻止鋼軌對枕木的相對移動及鋼軌與枕木的同時移動。前者可用防爬器 (anticreeper)；後者可埋設短枕木截。為確保枕木間隔可以角鋼將數根枕木連結。兩軌中間無法埋設短枕木截時，亦可於路肩打樁，再以支材將枕木支住。

彈性扣件因扣緊力強，可充分防止爬行，故使用彈性扣件路線無需再加設防爬器等，但須改良道碴並加強砸道。