

## 考慮軋延參數與尾板外型的鋼帶精軋數值分析

敖仲寧<sup>1</sup>, 許涵劉<sup>2</sup>, 康書維<sup>3</sup>

國立中正大學

### 摘要

在熱軋裡的精軋製程中，尾板撞擊一直是熱軋線關注的問題之一。由於鋼帶在精軋區厚度較粗軋區薄且軋延速度快，若有不對稱的鋼帶外型或軋機參數設定不良，就容易增加精軋機的軋延不穩定性而導致發生尾板撞擊的情況，當尾板撞擊的情況發生不僅會損壞鋼帶表面也會導致軋輓表面受損進而影響生產品質。熱軋現場若透過實驗方法於熱軋線上進行數據累積來歸納發生尾板撞擊的機制，不僅耗費時間成本加上暫停產線的成本，對生產而言是相當不經濟的作法；因此，本研究利用有限元素軟體建立軋機模型，對鋼帶尾端側偏量進行模擬，並探討相異軋延參數對鋼帶不對稱外型與尾板側偏之影響，藉由模擬結果建立出鋼帶尾端側偏的數學函數模型，再與模擬結果進行準確性驗證，進而建立出能有效防治尾板撞擊的系統應用於熱軋線，利用此系統讓現場熱軋線的操作員可以更快擬定精軋機的操作，以降低尾板撞擊發生率，增加鋼帶產品的生產效率。

**關鍵字：**精軋製程、尾板撞擊、輓縫差、縱向彎曲、軋延力差、鋼帶尾端側偏、有限元素分析。

### ABSTRACT

In the finish mill during hot rolling, tail pinch phenomenon is a serious problem under highly concern. Since the strip thickness is thin and the rolling speed is high in finish mill, if there is any asymmetrical strip profile or any wrong setting of mill parameters, it is easily to cause milling instability finish mill and to increase the probability of tail pinch. Tail pinch phenomenon not only damages the steel strip but also the surface of the rolls. This research mainly analyzes the effect of rolling parameter on the asymmetrical strip profile and the strip end deformation during finish milling and try to find an effective mechanism to reduce the tail pinch probability. Finite element analysis was applied deformation to establish a finish mill and strip model to simulate the possible strip end deformation which was affected by rolling parameters. A regression form the result of simulation could deduce a mathematical model to applied to the correction of strip deformation. The accuracy of the mathematical models will be verified by comparing with simulation results, A verified mathematical model can be then used for the finish mill line.

**Keywords:** Finishing mill, tail pinch phenomenon, level, camber, differential force, strip end deformation, finite element analysis.

### 一、緒論

熱軋製程(Hot rolling)為材料加熱到再結晶溫度以上，以高溫的情況下藉由多組轉向相反的輓輪導入軋延的材料進行厚度或寬度方向之裁減導致材料變形的加工方法，因加工時所需溫度高且較耗能源，所以軋延的穩定性為熱軋線相當關注的議題，而探討鋼帶的尾板撞擊(Tail pinch)的現象常為熱軋線所觀察的問題之一，本研究主要探討造

成尾板撞擊之成因與解決方法。

### 二、穩定軋延的影響因素介紹

#### 2.1 鋼帶中心線偏差

在精軋區的鋼帶，因為有縱向彎曲的情況下，而產生鋼帶的頭端與尾端的連線與鋼帶的中心線具有偏差，進而導致鋼帶的中心線與軋機的中心線產生偏差，而此偏差稱為鋼帶中心線偏移現象(Sidewalk)如圖 1；在產

生鋼帶的中心線偏移時，鋼帶中心線偏離軋機中心線導致軋輥兩側的軋延力不同，軋延力的不同會導致在軋輥軋延的不穩定性可能會發生尾板撞擊現象。粗軋區也有鋼帶中心線偏移，但粗軋區的邊導器會將鋼帶中心線偏移修正至軋機中心，因此較少討論粗軋的中心線偏移。

## 2.2 軋機軋縫差

在精軋區因鋼帶較薄較無法使用邊軋軋矯正鋼帶縱向彎曲，而精軋機本身有矯正鋼帶的縱向彎曲與中心線偏移的方法。精軋區藉由調整上軋輥的兩側高度差以矯正鋼帶的縱向彎曲的外型與鋼帶與軋機中心線偏移，上軋輥的高度差稱為軋機軋縫差(Level)，其定義為軋輥的 OS 側上下軋輥間距減去 DS 側上下軋輥的間距的值。因為 level 設定而傾斜的軋輪會在軋延過程中產生側向力推移鋼帶往軋縫較大側移動，而兩側的裁減量差亦會使鋼帶彎向裁減量較小側(軋縫較大側)如圖 2。因此，熱軋線的精軋製程常用調整軋縫差的方式來控制鋼帶的側偏運動。

## 2.3 軋延區形狀參數

軋延區形狀參數( $L_d/h_m$ )是由軋延時軋輥與鋼帶接觸的弧長 $L_d$ 與鋼帶的出入口厚度的平均值 $h_m$ 相除所得一個無因次值。在不考慮軋輥彈性變形情形下，由圖 3 中可看到在軋延過程中鋼帶與軋輥的幾何關係。

## 三、文獻回顧

在精軋區製程中對於降低尾板撞擊的主要研究大多皆以建立軋延力學模型並分析軋輥與鋼帶受力情形並建立出控制系統矯正鋼帶側偏情況，由 Hol 等人(2013)[1]提出由考慮鋼帶縱向彎曲、軋輥變形、鋼帶因軋縫差產生的不對稱變形、軋機兩側軋延力差等軋延參數建立之二維數學模型並建立新的控制 MPC 控制系統與傳統的 PID 控制系統進行比較，MPC 控制系統能更有效的控制軋輥兩側之軋延力差(Differential Force);Kwon 等人(2015)[2]提出軋輥轉向控制鋼帶技術透過寫入新的 ADRC 控制系統取代傳統的 PID 控制系統進行比較，結果顯示具有兩個負迴授控制的 ADRC 能更有效的使鋼帶修正至軋輥中心。但大多數研究沒有直接敘述軋縫差與鋼帶側偏的關係，故

難以藉由這些文獻幫助現場熱軋線校正鋼帶側偏並有效降低發生尾板撞擊現象。

## 四、有限元素模型

本研究以熱軋場的經驗為基礎並利用有限元素 ABAQUS 軟體建立出與現場相同的精軋機模型，精軋模型為減少電腦運算時間並以簡化模型方式建立上下水平軋輥、輸送板、鋼帶等物件，依據現場熱軋線經驗將各零件根據產線位置擺置並給予與現場相符之邊界條件如圖 4。

### 4.1 鋼帶模型

本研究依照熱軋線實際的量測值建立鋼帶模型，其中鋼帶模型選用元素為 C3D8I，由於精軋過程鋼帶長度長達 100m 以上，不可能以全尺寸進行有限元素分析，因此，本研究只取鋼帶尾端 2 公尺進行建模與模擬。鋼帶寬度為 1.2m，厚度則依照熱軋線各精軋站進行設定。除此之外，為了研究鋼帶縱向彎曲量對鋼帶尾端縱向彎曲(Hook)變化量的影響，本研究根據現場統計之 2000 筆軋延數據得知，絕大部分的鋼帶縱向彎曲量數據都集中在 20mm 以下，而鋼帶縱向彎曲量高於 70mm 的數據的數量則相當稀少，如圖 5，故本研究於模擬鋼帶尾端縱向彎曲量的大小選擇 10mm 及 70mm 分別代表鋼帶縱向彎曲量中的極大極小值。鋼帶的材料選用 SAE1016，其材料參數如表 1，應力應變曲線如圖 6。

### 4.2 軋輥模型

軋輥外形為圓柱狀，長度為 2.03m、直徑 0.726m，使用元素為 Discrete rigid 剛體元素，其功能為裁減鋼帶厚度與矯正鋼帶外型。其中給予 0.05mm 的軋縫差作為模擬中軋縫差極小值，而 0.4mm 作為極大值進行模擬。

### 4.3 輸送板模型

輸送板長度 18m、寬度 2m、厚度 0.004m，使用 Discrete rigid 剛體元素，其功用純粹為支撐鋼帶。

## 五、模擬結果與分析

### 5.1 軋延參數對鋼帶尾端縱向彎曲變化量影響

由軋延情形受軋延參數影響較為顯著的精軋第三站為例，如圖 7 所示，當 $L_d/h_m$

增加時，會導致鋼帶的尾端縱向彎曲量變小，而整體鋼帶的尾端縱向彎曲變化量變大；且圖 7 和圖 8 皆可得  $L_d/h_m$  與輥縫差的增加對鋼帶尾端縱向彎曲變化量皆呈正比效應的結論。再比較圖 7 之鋼帶尾端縱向彎曲 10mm 與圖 8 之鋼帶尾端縱向彎曲 70mm 比較得知鋼帶縱向彎曲量為 70mm 受到各項軋延參數影響量較大，首先關注兩圖中同為橘色虛線，且輥縫差條件皆為 0.4mm，可以得出在相異的鋼帶尾端縱向彎曲量中，故較大的尾端縱向彎曲量經軋延後鋼帶尾端縱向彎曲變化量亦較大；於軋延過程中，由於輥縫差的存在，軋輥於兩側的開度不同，當尾端縱向彎曲量為 70mm 的鋼帶在軋延時，其鋼帶尾端偏離軋機中心的程度遠大於鋼帶尾端縱向彎曲量為 10mm 之鋼帶，即愈靠近軋輥開度較小的 DS 側，導致鋼帶兩側之裁減量差異較大，尾端縱向彎曲變化量也隨之變大。再透過圖 9 整理探討精軋第一站至第三站，搭配鋼帶尾端縱向彎曲量為 10mm 且輥縫差為 0.4mm 時， $L_d/h_m$  於各站之影響比較，由圖 9 看出當輥縫差相同，第三站的  $L_d/h_m$  影響較第一站大，由鋼帶的厚度分析出軋延機理得知鋼帶在第一站入口厚度較厚的情況下，因輥縫差所導致的兩側裁減量差異影響較少，鋼帶在第三站的入口厚度較薄，輥縫差會導致鋼帶兩側裁減量差異較大所以鋼帶的變形較大，由此軋延的機理得知這樣會造成鋼帶尾端的縱向彎曲量變化第三站會比第二站與第一站大。

## 5.2 軋延參數對軋延後鋼帶尾端側偏影響

由圖 10 與圖 11 分析鋼帶尾端縱向彎曲為 10mm 與鋼帶尾端縱向彎曲為 70mm 時，當軋輥固定輥縫差時其尾端的側偏量會隨著  $L_d/h_m$  大小而尾端側偏量增加；圖 11 與圖 12 結果分析第二站在固定  $L_d/h_m$  下的輥縫差影響量較第一站的大，造成此影響為第二站的入口厚度較第一站的入口厚度薄，當第一站時入口厚度為 36mm，第二站入口厚度為 27mm，若第二站的厚度較薄，輥縫差所導致的兩側裁減量差異會增加，進而影響鋼帶側偏的大小。

## 5.3 建立軋延參數對鋼帶尾端側偏數學模型

建立精軋矯正鋼帶尾端側偏之迴歸模

型所考慮到的因子為輥縫差、 $L_d/h_m$ 、鋼帶長度、鋼帶厚度等，利用這些因子建立出鋼帶尾端側偏速度關係，由此關係可依照積分的關係建立出鋼帶脫離軋機時的尾端側偏。圖 13 為精軋第二站鋼帶尾端側偏數學迴歸模型計算值與有限元素模型模擬結果的鋼帶尾端側偏量的數值比較，當  $L_d/h_m$  為 1.41 時，輥縫差為 0.4mm 時，有限元素法所計算鋼帶尾端側偏量為 14.96mm，數學迴歸模型所計算的值为 15.69mm，誤差值为 0.73mm；當  $L_d/h_m$  為 5.87 時輥縫差為 0.4mm 時，有限元素法所計算的值为 49.9mm，數學迴歸模型算的值为 52mm，誤差值为 2.1mm，造成此誤差的原因為數學迴歸模型計算時需使用積分法，而使用積分法的準確性基於微小的時間 dt，若 dt 的值不夠細會導致數學迴歸模型計算在鋼帶脫離軋機時的鋼帶尾端側偏量與有限元素法所計算的有所誤差。

## 六、精軋結合有限元素法與現場程控的矯正鋼帶側偏技術

由於發生鋼帶尾板撞擊的主要原因為鋼帶的尾端側偏，本研究使用有限元素模擬軟體分析軋輥軋延不對稱鋼帶外型所造成的變形，與鋼帶尾端側偏的機理，並探討如何有效降低鋼帶尾板撞擊發生的機率。

因為目前現場熱軋線調控輥縫差矯正鋼帶側偏需要調控時間，而發生尾板撞擊的情況下都是極短暫的時間，對於鋼帶尾板撞擊現場沒有特殊徵兆可以有效預測會發生的情況，若要克服熱軋產線輥縫差控制邏輯做動時間過長問題，需要建立出鋼帶外型變形與鋼帶尾端側偏的數學迴歸模型。

利用數學迴歸模型可預先知道鋼帶經軋延後的尾端縱向彎曲變化量與鋼帶尾端側偏，並計算出精軋理想輥縫差調控值，當鋼帶完成粗軋的製程後，將粗軋後鋼帶的外形與軋延參數條件作為精軋區的初始軋延條件，如：輸入粗軋後的縱向彎曲的資訊至精軋區，再配合精軋的起始設定，又如：輸入起始輥縫差調控值、出入口厚度等軋延條件給數學迴歸模型作為所需條件，並利用精軋六站的數學迴歸模型給予不同的輥縫差調控值，組合出最佳且可有效修正鋼帶側偏的六站輥縫差調控值並取代原來的輥縫差，利用此方法可以解決輥縫差調控的做動時

間過長的問題，並有效針對鋼帶尾板側偏的問題，降低鋼帶尾板撞擊發機率，如圖 14。

與現場計算值進行比對，透過現場作為尾板撞擊發生的主要參考依據，利用程式計算之軋延力差值作為 x 軸與現場實際數值作為 y 軸進行比對，統計圖 15 為精軋第四站之隨機抽樣比較結果，若程式計算值與現場數值越接近，則代表該卷鋼帶的圓點將落點在靠近 45° 之斜對角線上，反之則遠離。

### 七、結論與未來展望

(1) 建立精軋第一站至第六站數值模型，模型包含上下水平軋輥、輸送板、具有不同尾端縱向彎曲量鋼帶，並分別完成不同軋輥縫差、 $L_d/h_m$  對鋼帶尾端側偏與鋼帶尾端縱向彎曲變化之影響。

(2) 由數值模擬分析透過調整軋輥縫差的方式矯正鋼帶尾端側偏與鋼帶尾端縱向彎曲，改善鋼帶中心線側偏減少鋼帶尾板撞擊發生的可能性。

(3) 精軋各站的鋼帶的厚薄不同，由數值模擬結果分析軋輥縫差在鋼帶厚度薄的對於鋼帶尾端側偏與鋼帶尾端縱向彎曲變化之影響量較大。

(4) 將數學模型與力學模型結合理論計算出理想軋輥縫差調控值與軋延力差陡升值，結果顯示鋼帶的各站的軋延力差陡升值隨著軋輥縫差矯正鋼帶中心線側偏逐漸下降，利用此程式可有效矯正鋼帶側偏降低尾板撞擊發生機率。

精軋軋輥縫差矯正鋼帶技術整體程式已建立完成，未來需測試程式計算兩萬筆資料尋找是否有找不到最佳解的問題，未來須將數學模型與最佳化程式於現場熱軋線進行合作，並將程式應用於現場熱軋線調控軋輥縫差以達到可預先計算各站軋輥縫差調控值，並且優化原本的軋輥縫差調控系統(TLC)以達到鋼帶穩定軋延，可有效抑制軋延力差的陡升漸少尾板撞擊機率，在未來順利上線測試可望提高熱軋線現場的生產效率。

### 八、參考文獻

[1] Hol, C.W.J., Roo, J., Kampmeijer, L., Dirkson, T., Schipper, G., Maire, M., Lugt, L. J., Model Predictive Controller for Strip-Tracking during Tail-Out of the Finishing Mill, International Federation of Automatic

Control, Vol. 46, No. 16, 397-402, 2013.  
 [2] Kwon, Woogyong., Kim, Sungbin., Won, Sangchul., Active disturbance rejection control for strip steering control in hot strip finishing mill, International Federation of Automatic Control, Vol. 48, No. 17, 42-47, 2015

### 九、表格

鋼帶材料(SAE1016)	
密度( $\rho$ )	7850 kg/m <sup>3</sup>
傳導性	29.7 J/m-s-K
膨脹係數	1.02×10 <sup>-5</sup> 1/°C
彈性模數(E)	68.9 GPa
波松比( $\nu$ )	0.3

表 1 鋼帶之材料參數

### 十、圖片

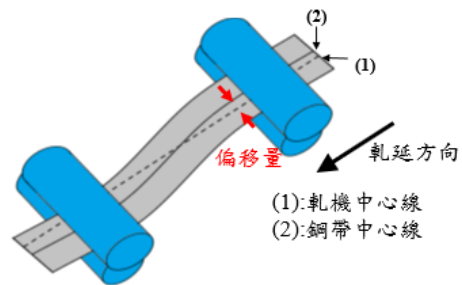


圖 1 鋼帶中心線偏移

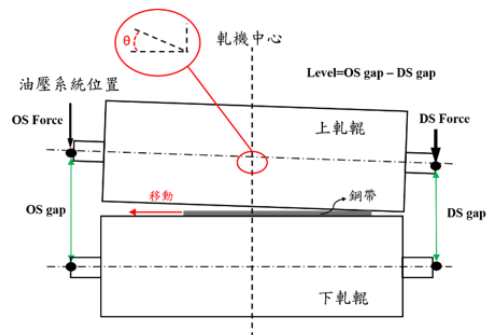


圖 2 軋機軋輥縫差

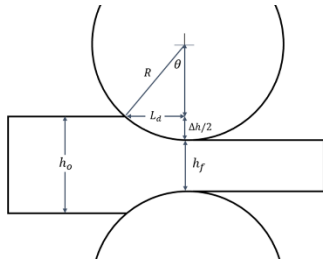


圖 3 軋延區形狀參數

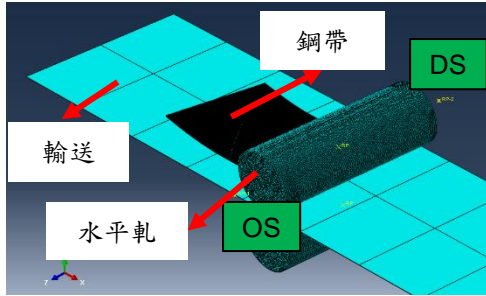


圖 4 精軋機有限元素模型

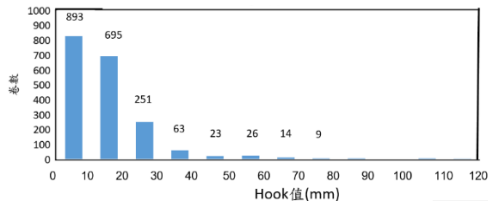


圖 5 熱軋線現場 2000 卷鋼帶尾端縱向彎曲大小之數據分布圖

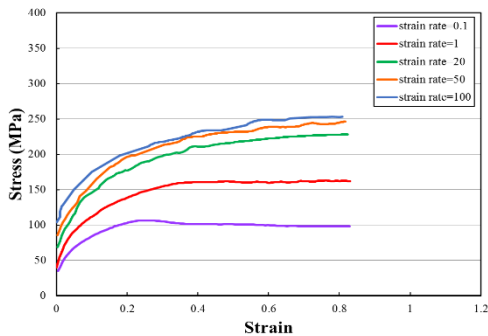


圖 6 SAE1016 於 900 ° C 流變應力曲線

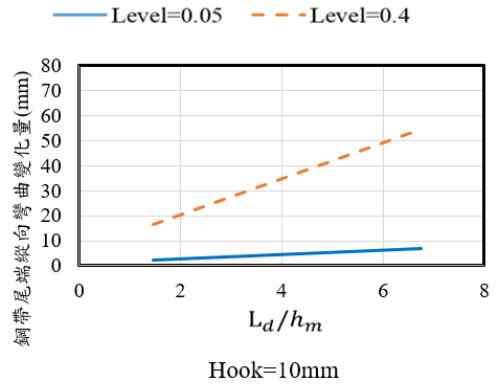


圖 7 精軋第三站之軋延參數對鋼帶尾端縱向彎曲變化量之影響(Hook = 10mm)

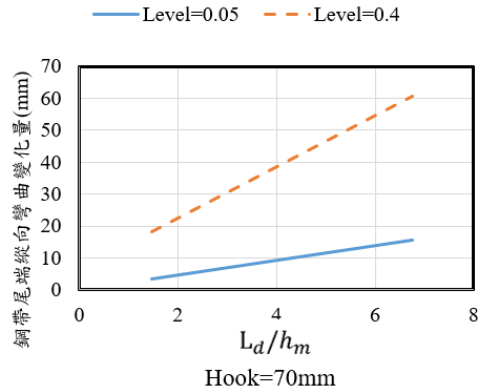


圖 8 精軋第三站之軋延參數對鋼帶尾端縱向彎曲變化量之影響(Hook = 70mm)

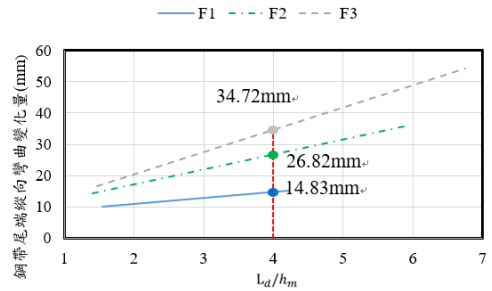


圖 9 精軋第一至第三站之  $L_d/h_m$  對鋼帶尾端縱向彎曲變化量之影響(Hook = 10mm)

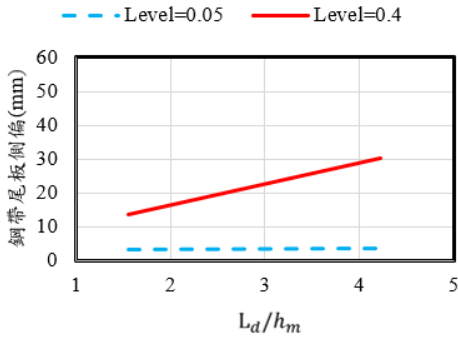


圖 10 精軋第一站之軋延參數對軋延後鋼帶尾端側偏之影響(Hook = 10mm)

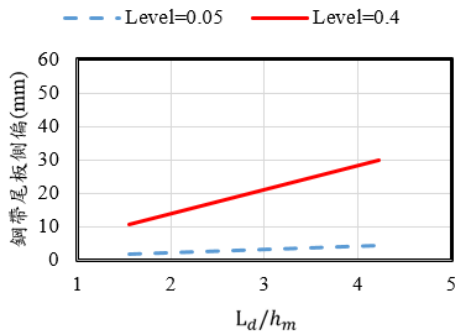


圖 11 精軋第一站之軋延參數對軋延後鋼帶尾端側偏之影響(Hook = 70mm)

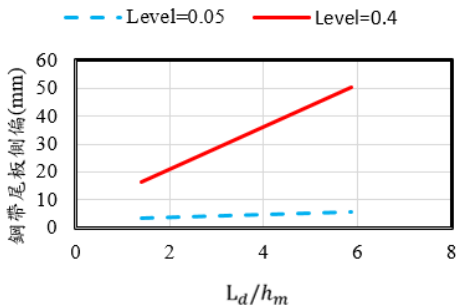


圖 12 精軋第二站之軋延參數對軋延後鋼帶尾端側偏之影響(Hook = 70mm)

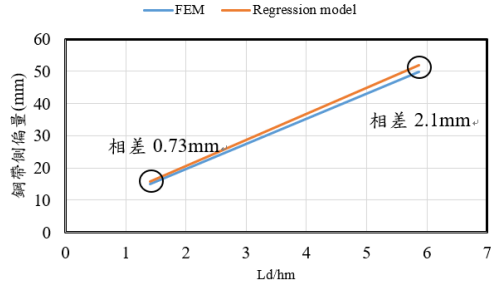


圖 13 精軋第二站數學迴歸模型與有限元素法的計算值比較

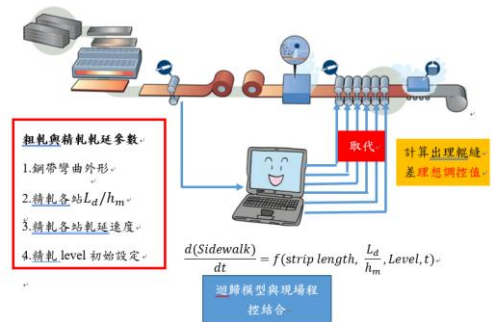


圖 14 精軋軋縫差矯正鋼帶技術示意圖

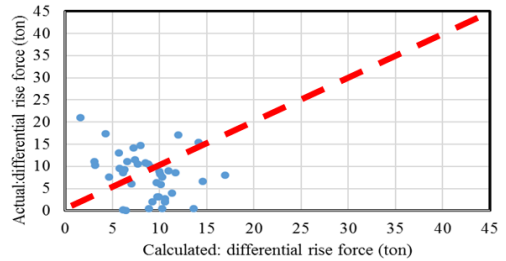


圖 15 精軋第四站之程式計算與現場的軋延力差值驗證