

# 軋機組裝間隙對鋼帶於精軋過程之運動影響分析 Assembly Tolerance Effect Analysis on finishing Mill during Hot Strip Rolling

敖仲寧<sup>1</sup>, 許涵劄<sup>2</sup>, 陳明發<sup>3</sup>, 蔡旭程<sup>4</sup>

服務單位

<sup>1</sup> 中正大學機械學系教授

<sup>2</sup> 中正大學機械學系博士生

<sup>3</sup> 中國鋼鐵股份有限公司鋼鋁研發處研究員

<sup>4</sup> 士盟科技股份有限公司協理

## 摘要

軋機組裝間隙造成的邊界條件不對稱會影響軋延過程鋼帶之運動，嚴重更可能造成鋼帶尾板撞擊。本研究分析軋機組裝間隙對鋼帶運動之影響，利用有限元素分析軟體 ABAQUS 建立含工軋、背軋、Looper 以及側導板之完整精軋雙座機模型，並分別分析三種軋機間組裝間隙不對稱對鋼帶精軋過程之影響。模擬結果發現，軋機組裝間隙不對稱狀況下會使工軋與背軋之接觸應力產生不對稱，且隨著間隙大小加劇，其兩軋接觸面應力不均狀況也會加劇。此外針對軋延過程組裝間隙對軋輪與鋼帶之運動影響分析結果顯示，軋輪於穿帶之暫態過程中，移動的方向會與軋延方向相反。而當組裝間隙之不對稱邊界條件情況嚴重時，其鋼帶尾板脫離軋機的瞬間會有明顯的翻板行為出現，證明軋機組裝間隙是影響鋼帶軋延過程運動之因素之一。

**關鍵字：**精軋製程、尾板撞擊、軋機組裝間隙、有限元素法

## ABSTRACT

A preliminary approach on the finite element modeling of the strip motion during hot strip rolling process was performed. The finishing mill model consists of work roller, back roller, side guide and looper has been established. The effect of assembly tolerance between chock and housing is also analyzed during rolling process. Simulation result shows that, gap between chock and housing will cause asymmetric contact condition and might cause the strip tail flap after leaving the finishing roller.

**Keywords:** Finishing mills, hot strip rolling, strip end crashing, tail pinch, finite element modeling

## 一、前言

精軋為熱軋製程的最後一道軋延步驟，此區的材料相對較薄，抗彎曲及挫屈能力大幅下降，因此只要精軋操作條件或軋機邊界條件控制不良，就很容易影響鋼帶精軋過程的運動穩定性，甚至可能使鋼帶撞擊生產線設備，除了損壞產品之外也會影響產線機構之壽命。為了分析各種撞擊行為的主要

成因，首先必需要了解可能影響鋼帶運動穩定之製程因素。精軋機的組裝間隙就是其中一個可能影響鋼帶運動穩定的因素之一。但由於現場相關參數量測不易，且影響鋼帶運動之機理相當複雜，因此分析工作變得很困難。本研究主要使用有限元素軟體 ABAQUS 建立精軋模型，並初步模擬鋼帶精軋過程之運動型態，藉分析其發生的影響因素進一步找出較好的製程參數條件，增加

生產效率與提高產品的品質。

## 二、軋延背景介紹

### 2.1 精軋製程

熱軋精軋製程之工作原理是讓材料在高溫的狀態下，藉由軋輪和材料之間的磨擦力將材料引入兩個轉動方向相反的軋輪之間，用以改變材料厚度或橫截面形狀的加工方法。

精軋區之軋輥一般有6~8座，其鋼帶的厚度約為40mm至1mm。由於軋延過程之鋼帶流動體積須維持恒定，因此精軋區的鋼帶軋延速度很高，最快可以達到每秒十幾公尺以上。為了要穩定軋延過程鋼帶的動態行為，熱軋線在兩座精軋機間設置Looper機構，當鋼帶通過時撐起鋼帶[1]，如圖1與圖2，並且配合前後精軋輥的軋速維持鋼帶張力以提供軋延穩定性。

### 2.2 軋機組裝間隙

熱軋現場藉由經驗累積認為軋機與Housing間之組裝間隙可能會影響鋼帶精軋過程之運動穩定性。為了將軋機組順利組裝至Housing中，軋機組之零件尺寸會小於Housing內壁耐磨墊約1~2mm，因此在軋延過程中，支撐軋輥的Chock會頻繁與Housing中的耐磨墊摩擦，如圖3，久而久之造成兩側間隙大小不等，影響軋延過程鋼帶之運動行為。圖4為Housing與軋機組裝間隙示意圖，組裝間隙共分三個方向，分別為軋延方向、軸向、和垂直方向。

### 2.3 精軋過程鋼帶尾板撞擊現象

尾板撞擊是精軋過程常見的情形，當鋼帶運動狀況不穩時，就很容易造成鋼帶撞擊而碎裂並傷及軋輥的情形。當情況嚴重時，熱軋產線必須停止生產並進行產線設備之更換，使生產效率大幅降低。

圖5為尾板撞擊之例[2]，其中三塊鋼帶依序進入精軋機軋延。第一塊鋼帶軋延過後表面平整光滑，而第二塊鋼帶軋延時發生尾板撞擊，因此鋼帶尾端碎裂並呈現不規則形狀，除此之外，軋輥因軋到鋼帶碎片而產生表缺陷[3]，如圖6。第三塊鋼帶軋延過程因軋面缺陷並翻印至鋼帶表面上，完軋後鋼帶表面出現週期性的印痕，導致的產品損毀。

鋼帶尾板撞擊是熱軋中常見的技術問

題，但由於其發生機理相當複雜，因此相關研究文獻十分有限。

Costa et al.(2007)[4]將鋼帶撞擊行為大致區分為四類:1.鋼帶頭端上翹撞擊模式、2.鋼帶尾端側向撞擊模式、3.鋼帶尾端碎裂撞擊模式及4.鋼帶尾端上翹拍擊模式。根據熱軋廠的統計，為以第二類的撞擊行為發生機率最高。

Costa et al.(2007)指出第一類撞擊行為(頭端上翹撞擊)的成因主要來自上下軋輥表面的磨耗程度不一致或是軋機間的高度差異。Sun et al.(2006)[5]和 Philipp et al.(2007)[6]以理論模型及有限元素模型對鋼帶頭端上翹撞擊軋輥的現象進行分析，其結果顯示若上下軋輥表面磨耗程度不同，將導致摩擦係數產生明顯差異，使鋼帶產生上下不對稱的塑性變形，並在進入下一座軋機時與軋輥發生撞擊。

第二類撞擊行為(尾端側向撞擊)的成因主要是來自於鋼帶的側向滑移及擺動行為(snake motion)，當鋼帶尾端脫離前一座軋機時，尾端會撞擊邊導器(Side guide)並向上捲曲或滑移至軋輥邊緣外，使鋼帶與後一座軋機發生撞擊或直接被軋輥成碎片。Matsumoto等人(1996,1999,2002)[7]提出「一般化二維理論模型」，並利用簡化的二維熱軋模型，以數值方法模擬複雜的材料側向流動行為，成功地預測鋼帶的側向滑移及碰撞行為。Kiyota和Matsumoto(2003)[8]參考上述理論模型，以「線性二次型最佳控制理論法」對鋼帶的側向滑移行為進行抑制，有效降低鋼帶尾端偏擺的幅度及撞擊的次數。

Costa et al.(2007)指出第三類行為(尾端碎裂撞擊)的成因主要是冷卻不當導致鋼板尾端的材料溫度過低，使得材料延韌性不足，在受軋時發生碎裂或破斷的情形。

Costa et al.(2007)指出第四類撞擊行為(尾端上翹拍擊)的成因可能來自鋼帶尾端在進行精軋之前，由於裁切不平整或歪斜，導致在精軋時尾端脫離軋輥的時間不同，使得部份尾端材料形變量不均勻，產生些許上翹或下彎，並在進入一座軋機時拍擊軋面。

回顧過去鋼帶撞擊行為的研究文獻，多為簡化分析與計算過程，通常採用二維平面應變模型進行分析。然而，鋼帶真實的運動行為是十分複雜的三維運動模式，包含左右、上下擺動或側邊翹曲等，很難以簡化的

二維模型來表示。同時，軋機不對稱的邊界條件，如軋機間隙、鋼帶彎曲外形或截面不對稱形狀皆無法以簡化的二維模型加以分析。因此，本研究與熱軋線合作，藉 ABAQUS 建立三維熱軋精軋模型，並模擬分析軋機間隙對鋼帶運動之影響。

### 三、有限元素模擬與結果討論

為了能完整的分析軋機組裝間隙對軋延過程的影響，本研究先分析不同不對稱組裝間隙的邊界條件對工軋與背軋之接觸狀況之影響，再以完整的精軋雙座機模型，模擬鋼帶尾板脫離精軋過程之動態行為

#### 3.1 工軋與背軋於軋機組裝間隙之接觸

圖 7 為背軋與工軋之有限元素模型，其中背軋的軸長為 1.7m，工軋軸長為 2 m。背軋與工軋分別設定 shell 與 core 材料。背軋的 shell 與 core 之楊氏係數設定為 200 GPa，而工軋之 shell 楊氏係數為 220 GPa，core 為 150 Gpa，並設定兩的軋輪反向旋轉，旋轉線速度為 6.9m/s。為了要模擬具軋機間隙下兩軋之接觸狀況，本研究設定兩軋輪具接觸壓力 2000 ton，並模擬三種不同之間隙狀況，如圖 8:

case1: 背軋與工軋無間隙，輪軸對中。

case2: 背軋與工軋於軋延方向間隙不對稱，其間隙為 1mm，期兩輪軸夾角為  $0.066^\circ$

case3: 背軋與工軋於軋延方向間隙不對稱，其間隙為 2mm，兩輪軸夾角為  $0.132^\circ$

模擬結果顯示，如圖 9，在無間隙的狀況下(case1)，其工軋與背軋的應力分布非常對稱，其受力面積之長度約為 1.87m。當工軋與背軋產生不對稱的間隙狀況(case2)，其接觸面積明顯縮短，其接觸面長度僅剩 1.26m。當間隙狀況更加嚴重(case3)，其面積縮小程度更加劇，其面積長度剩下 0.73m。

由上述的模擬結果顯示，軋延過程中，當工軋與背軋出現不對稱的間隙狀況，使軋延過程工軋與背軋輪軸不對稱，就可能影響工軋兩側受力不均，連帶影響鋼帶於變形區中的受力狀況。由此一狀況能夠解釋間隙對鋼帶尾板撞擊的影響無法忽視。

#### 3.2 軋機組裝間隙對鋼帶尾板運動影響

##### 3.2.1 鋼帶材料性質

本研究之材料應力應變曲線由 gleeble3800 壓縮試驗機實驗而得，其試片材料為 SAE1016，實驗溫度依照精軋溫度設定 900oC，其應力應變曲線如圖 10。此外，鋼帶之密度(density)為 7832 kg/m<sup>3</sup>，楊氏係數(Young's module)為  $7.8 \times 10^{10}$  Pa，波松比(Poisson ratio)為 0.27。

##### 3.2.2 精軋機模型

本研究依照熱軋產線實際參數建立第三座精軋機(F3)與第四座精軋機(F4)之完整的精軋雙座機模型，其中包含工軋、背軋與側導板，並在模型中加入 Looper 機構，完整模擬鋼帶精軋過程的運動狀況，如圖 11。其中兩座軋機中心距離 5.5m，工軋半徑為 0.33m。為了降低模擬時間，本計畫在合理的範圍下簡化模型邊界條件，其中設定下游軋機無轉動速度，單純只提供軋間間隙使鋼帶通過。而上游軋機轉速為 10.47 rad/s，Looper 機構則不做動，軋延過程中並未接觸鋼帶。

##### 3.2.3 鋼帶模型

鋼帶之全長為 6 m，寬度為 1.2 m。為了減少整體模擬時間，本研究設定模型省略穿帶過程，其鋼帶厚度配合各精軋站之鋼帶厚度，從 7.1 mm 經上游軋機裁減至 4.3 mm，再經下游軋機裁減至 2.8 mm。鋼帶於軋機中的頭尾端元素種類使用 C3D8R (3D-stress)，模擬鋼帶通過軋機時精確的變形狀況。而中段鋼帶則使用 SC8R (shell element)，用來模擬鋼帶運動狀態，如圖 12。

##### 3.2.4 軋軋於組裝間隙之運動狀態模擬

圖 13 為精軋過程軋軋於軋機組裝間隙中的運動歷程，其中縱軸之正值表示軋延方向。當鋼帶剛進入軋機時為暫態狀況，軋軋會沿鋼帶表面滾動，其運動方向與軋延方向相反。而當軋延進入穩態狀況，也就是軋軋抵到 Housing 邊緣時，其軋軋的位移維持固定，一直到鋼帶尾端脫離軋軋為止。

### 3.2.5 組裝間隙對鋼帶運動狀態影響分析

圖 14 為精軋過程鋼帶脫離上游軋機 (F3)時尾板運動狀態側示圖。其中分別比較 1.軋機 DS 與 OS 側皆無間隙之狀況 2.軋機 DS 與 OS 測分別具 $\pm 0.1\text{ mm}$ 與 $\pm 0.2\text{ mm}$ 之狀況 3.軋機 DS 與 OS 測分別具 $\pm 1\text{ mm}$ 與 $\pm 1.5\text{ mm}$ 之狀況。由模擬結果明顯能夠比較，隨著間隙值增加，鋼帶尾板脫離軋機時上翻的狀況越來越明顯，且兩側上翻之程度也不對稱。依此結果可以證明組裝間隙為影響鋼帶動態之因素之一。

## 四、結論

1. 本研究分析在不同間隙狀況下軋軛之接觸應力分布情形，其結果顯示，當工軛與背軛出現不對稱的間隙狀況，其工軛與背軛之接觸面會產生不對稱之狀況，並使軋延過程工輪兩側受力不均，可能連帶影響鋼帶軋延過程之運動穩定性。
2. 本研究依照熱軋線之邊界條件建立完整之精軋雙座機模型，其中包含工軛、背軛與側導板，並在模型中加入 Looper 機構，完整模擬鋼帶精軋過程的運動狀況。
3. 模擬結果顯示當鋼帶剛進入軋機時，軋軛會沿鋼帶表面滾動，其運動方向與軋延方向相反。而當軋延進入穩態狀況，也就是軋軛抵到 Housing 邊緣時，其軋軛的位移維持固定，一直到鋼帶尾端脫離軋軛為止。
4. 模擬結果顯示，隨著軋機組裝間隙值增加，鋼帶尾板脫離軋機時上翻的狀況越明顯，且兩側上翻之程度也不對稱，依此結果可以證明組裝間隙為影響鋼帶動態之因素之一。

## 五、參考文獻

- [1] F.G. Rossomando J. D. F., Modeling and Control of a Hot Rolling Mill. Latin American Applied Research 2006, 36, pp.199-204.
- [2] Evgeniya Balmashnova, Mark Bruurmijn, Ranjan Dissanayake, Remco Duits, Mark Bruurmijn, Leo Kampmeijer, Tycho van Noorden, "Image Recognition of Shape Defects in Hot Steel Rolling", Image Recognition of Shape Defects in Hot Steel Rolling, SWI 2012 Proceedings.
- [3] Union Electric Steel, "Roll Surface

Indication: Mechanical Marking", Technical Service Manuals.

- [4] Costa, A., Dornelas, F., Costa, R., Fontes, L., and Salles, A., 2007. CST Arcelor Brasil HSM tail-end crashing reduction using six sigma methodology. In: Iron & Steel Technology Conference Proceedings, Indianapolis, Indiana, May7-10, 2007.
- [5] Sun, J., Zhang, H., and Yu, Q., 2006. Analysis of bending on the front end of sheet under hot rolling. Journal of University of Science and Technology Beijing, Vol. 13, pp. 54-59.
- [6] Philipp, M., Schwenzfeier, W., Fischer, F. D., Wödlinger, R., Fischer, C., 2007. Front end bending in plate rolling influence by circumferential speed mismatch and geometry. Journal of Material Processing Technology, Vol. 184, pp. 224-232.
- [7] Matsumoto, H., 2001. What can be analysed by the rapid version of the generalized 2-dimensional theory. In: The 4th Rolling Symposium, Pohang, Korea, 2001.
- [8] Kiyota, T., Matsumoto, H., Adachi, Y., Kondo, E., Tsuji, Y., and Aso, S., 2003. Tail crash control in hot strip mill by LQR. In: Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.

## 十一、圖片

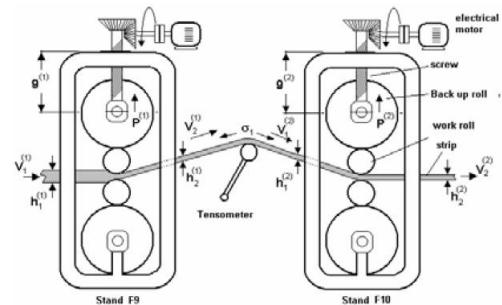


圖 1 精軋機與 Looper 示意圖[1]

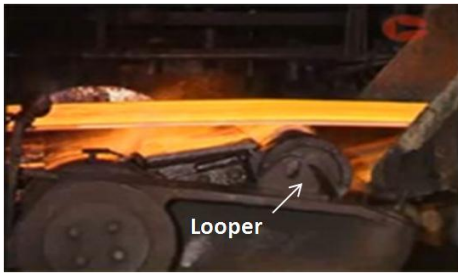


圖 2 Looper 機構

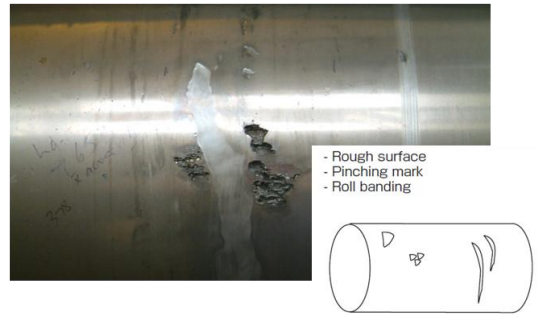


圖 6 尾板撞擊造成的軋面缺陷[2]



圖 3 精軋 Housing 與軋機組

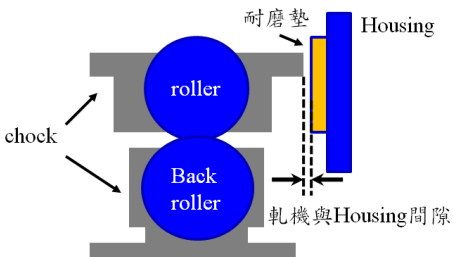


圖 4 chock 與 Housing 組裝間隙示意圖

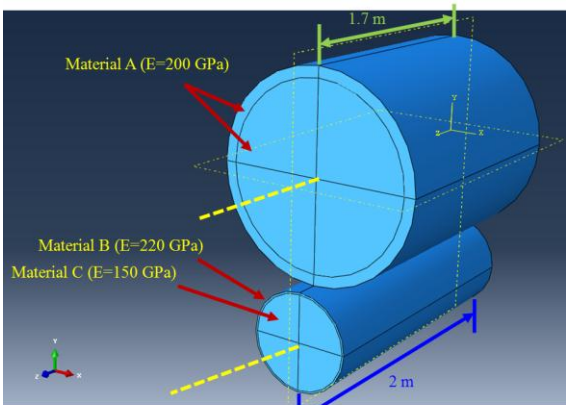
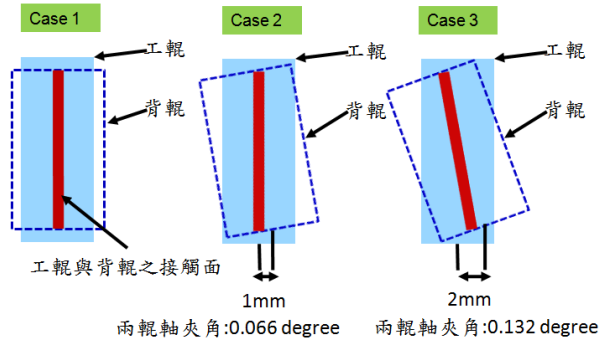


圖 7 精軋工軋與背軋模型示意圖



兩軋軸夾角:0.066 degree    兩軋軸夾角:0.132 degree

圖 8 不同組裝間隙模擬邊界條件示意圖

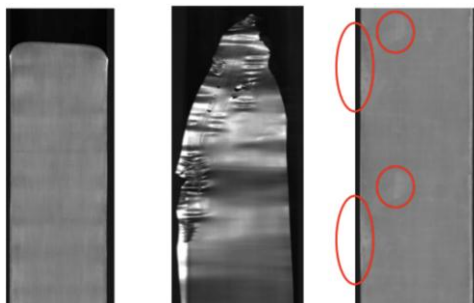


圖 5 精軋過程出現尾板撞擊對鋼帶之影響[1]

(a) 撞擊發生前之鋼帶尾板上視圖

(b) 發生尾板撞擊導致鋼帶尾端碎裂

(c) 撞擊傷及軋輪導致軋後鋼+板出現週期缺陷

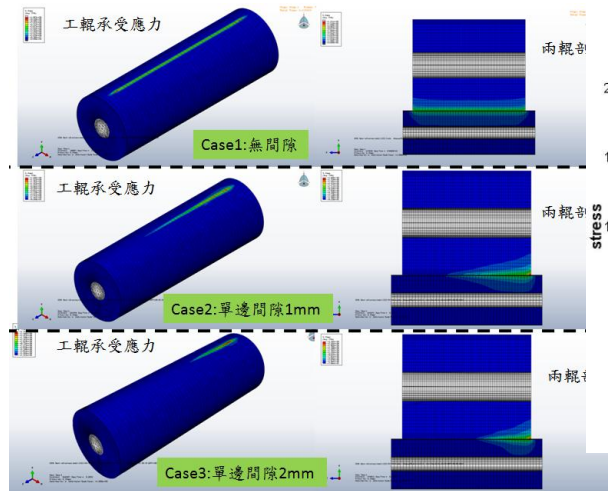


圖 9 工軋與背軋於不同間隙條件之接觸應力分布

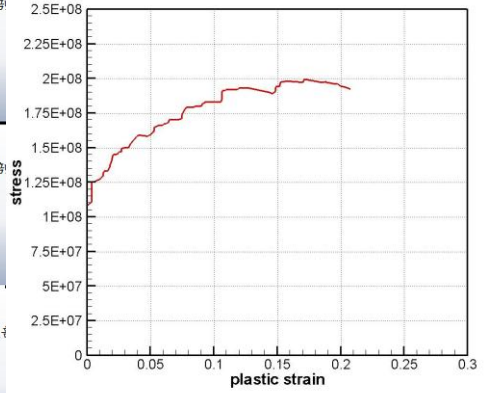


圖 10 溫度 900°C 之 SAE1016 應力應變曲線

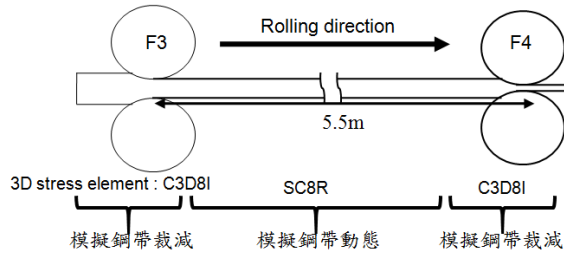


圖 12 鋼帶元素設定示意圖線

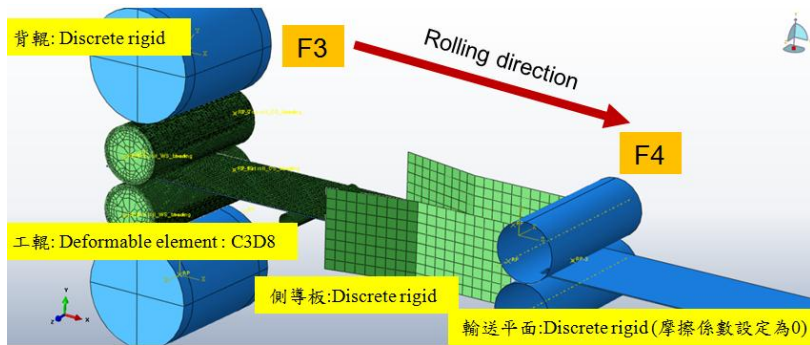


圖 11 F3 與 F4 精軋雙座機模型示意圖

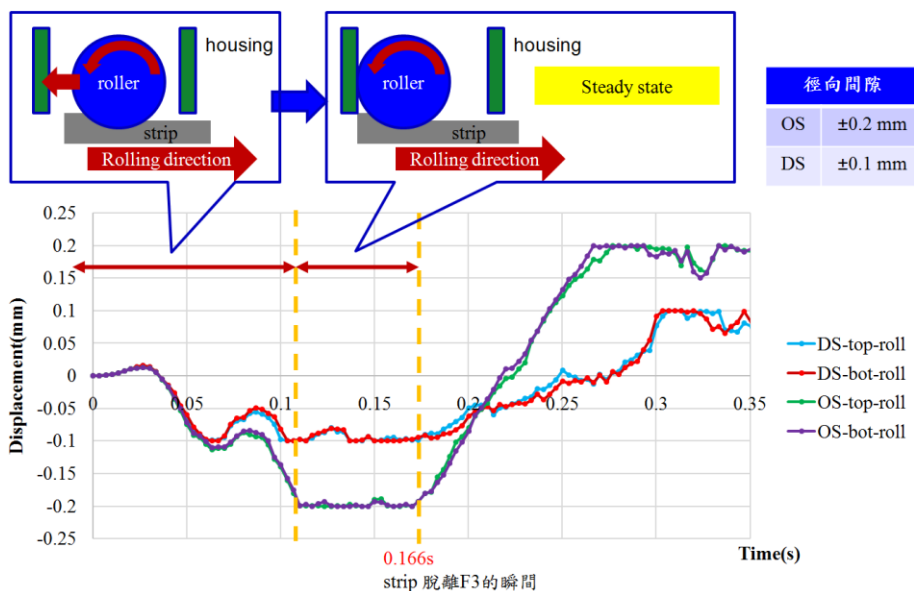


圖 13 精軋過程軋輥於軋機組裝間隙之運動歷程

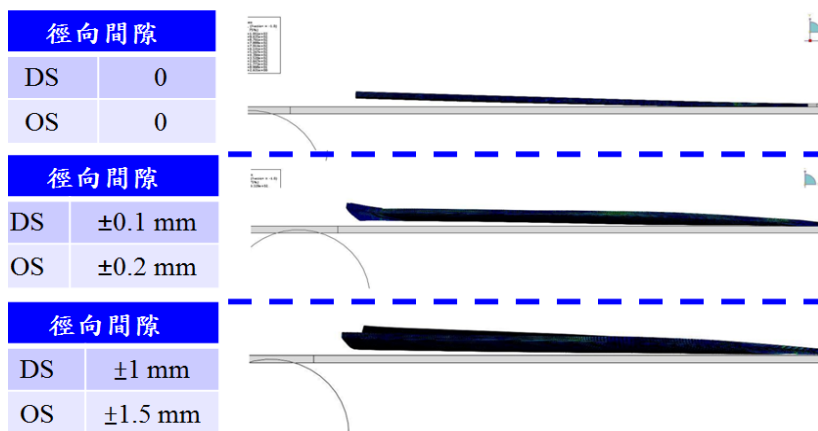


圖 14 鋼帶脱离上游軋機(F3)時尾板運動狀態