# 應用Pam-Stamp於鋁合金成型之回彈分析

張志毅[1*] 林義凱[2] 何明雄[1] 沈炳臣[3]

[1]南亞技術學院 機械工程學系

[2]中國鋼鐵股份有限公司 鋼鐵研究發展處

[3]元智大學 機械工程學系

## 摘　要

鋁合金的沖壓成型元件已經普遍存在於生活周遭的各種器物中，例如筆記型電腦的螢幕背板、行動電話與數位相機的外殼...等 3C 產品，某些高強度鋁合金甚至應用於汽車的鈑件中，但是這些鋁合金沖壓成型元件普遍存在著回彈的問題，為了避免沖壓成型回彈的效應而導致大幅修改模具，利用有限元素法模擬成型與回彈成為必備的分析工具。

影響回彈的因素非常多，包括平板材料性質、模具圓角、模具間隙、摩擦係數、壓板施力...等等，但本文將著重於探討軟體內部的影響因素，例如：殼元素厚度方向積分點數目、沖壓速度、平板在模具圓角處的元素數目、回彈演算法與分析精度等，許多分析軟體都將這些變因以預設值處理，因此常忽略這些變因對模擬結果的影響。本文將以 NUMISHEET’93 的鋁合金平板 U 形彎曲模型進行成型回彈分析，探討上述各種變因對回彈結果的影響。

關鍵字：鋁合金成型、回彈、U 形彎曲。

*E-mail: changci@nanya.edu.tw　Tel:03-4361070 Ext. 6408　Fax:03-4384670

# SPRINGBACK ANALYSIS OF ALUMINUM ALLOY FORMING BY PAM-STAMP

Chih-Yi Chang[1*], Yi-Kai Lin [2], Ming-Hsiung Ho[1], Ping-Chen Shen[3]

[1]Department of Mechanical Engineering, Nanya Institute of Technology, Jhongli, Taiwan

[2] Steel and Iron Research and Development Department, China Steel Corporation, Kaohsiung, Taiwan

[3] Department of Mechanical Engineering, Yuan Ze University, Jhongli, Taiwan

## Abstract

The products of aluminum alloy by sheet metal forming are very popular in our daily life, such as the back plate of the laptop computer, the case of mobile phone and digital camera. Some high strength aluminum alloy even use in the body panels of the cars. The springback effects are widely existed in these aluminum forming products. For the reason to reduce the modification of mold components due to springback effects, the simulation and analysis of the sheet springback effects are very important.

Accurate prediction of sheet metal forming is very difficult because the factors to influence the springback effects are numerous. Material properties, the radius of the molds, the gaps of the molds, the coefficients of friction, the forces applied on the blank holders, can change the final results. In this research, we focus on the internal factors induced by the software, such as the number of integration points in thickness direction of shell elements, the stamping velocity, the number of elements in contact with the die radius, the algorithm for the springback stage, the precision of computation. Researchers usually ignored the influences of these factors because most software proceeding these factors by default values. This research considered the U-shape bending models of NUMISHEET’93 to simulate and analyze the springback effects by Pam-Stamp.

Keywords：Aluminum alloy forming, Springback, U-shape bending.

*E-mail: changci@nanya.edu.tw Tel:03-4361070 Ext. 6408 Fax:03-4384670

# 壹、前言

回彈效應是沖壓成型製程中最重要且最難解決的一個課題，U 形彎曲成型是驗證回彈效應最常見的試驗方法，在試驗的過程中，平板必須經過複雜的變形過程，包括拉伸-彎曲、拉伸-彎平與反向彎曲的過程，最後當移除模具後，接著發生回彈以及側壁捲曲效應，這麼複雜的變形過程使得回彈效應的預測變得非常困難。

NUMISHEET 測試標準是普遍被採用的一種標準測試方法，隨著模擬方法的不斷進步，NUMISHEET 所提供的測試標準也不斷演進，最新的 NUMISHEET 2011 測試標準[1]包括 BM1：圓杯狀深抽並整平後杯緣產生的耳朵狀擴展現象模擬，BM2：十字杯狀深抽製程模擬，BM3：汽車前側桿件沖壓製程模擬的最佳化，BM4：已施加預應變的平板在二維 U 形彎曲測試的回彈現象。其中的 BM4 的測試方法源自於 NUMISHEET’93 的二維 U 形彎曲測試[2]，由於這種測試方法簡單明瞭，可以非常明確地測量回彈結果，因此有非常多文獻採用 NUMISHEET’93 的 U 形彎曲測試標準進行各種研究。

首先，2000 年 Chung et al. [3]將庫倫摩擦加進理想成型理論中，以理論解析的方式分析 NUMISHEET’93 的 U 形彎曲成型，2002 年 Liu et al. [4]同樣針對 NUMISHEET’93 的 U 形彎曲模型，以 LS-DYNA3D 進行模擬，探討可變化的壓板力(Blankholder Force)對減少回彈現象的影響，2004 年 Xu et al. [5]利用 Pam-Stamp 模擬高強度鋼的 U 形彎曲成型，以顯示解的方法探討阻尼比、積分點數目、網格數目與沖壓速度對回彈現象的影響，數值結果顯示側壁曲率半徑容易因為參數的變化而有較大的誤差範圍，2005 年 Gomes et al. [6]利用 LS-DYNA3D 模擬高強度鋼的回彈，考慮三種不同材料模型，分別使用 von Mises 降伏準則、Hill48 降伏準則與 Barlat89 降伏準則，探討鋼板的異向性對回彈的影響，2006 年 Zhang et al. [7]考慮鋁合金的 NUMISHEET’93 的 U 形彎曲模型，探討不同硬化法則與降伏函數對回彈預測準確度的影響，認為等向性硬化法則會過度預估回彈現象，而非線性混合硬化法則比較接近實驗結果，此外 Barlat89 跟 Hill48 降伏函數都比 Mises 降伏函數更接近真實的材料性質，2007 年 Zhang et al. [8]則以解析方法分析 U 形彎曲試驗的回彈與側壁捲曲現象，分別考慮等向硬化、動態硬化與混合硬化法則的影響，發現等向硬化法則會過度預估回彈現象，動態硬化法則會低估回彈現象，唯有混合硬化法則比較接近真實的材料行為，2007 年 Jiang et al. [9]則考慮 NUMISHEET’93 模型中的摩擦係數為未知的情況，獲得最小回彈結果之下的最佳化壓板力，2008 年 Kadkhodayan 與 Zafarparandeh [10]使用 ABAQUS 模

擬 U 形彎曲成型，探討等效塑性應變與回彈的關係，發現具有較高等效塑性應變的平板會產生比較小的回彈效應，2010 年 Tang et al.[11]考慮非等向性鋁合金平板，利用 ABAQUS 中的副程式 UMAT 撰寫材料模型並分析 NUMISHEET’93 的 U 形彎曲試驗，考慮 Lemaitre 與 Chaboche 的非線性動態硬化理論搭配 Barlat89 降伏準則，可以比等向硬化或動態硬化法則更準確預估回彈的結果。

本文使用 Pam-Stamp 模擬 NUMISHEET’93 的 U 形彎曲試驗，考慮鋁合金的平板，探討板厚方向的積分點數目、沖壓速度、平板在模具圓角處的元素數目、回彈演算法與計算精度等因素對回彈結果的影響，數值結果與 NUMISHEET’93 所提供的實驗值以及 Zhang et al. [8]所提供的理論值比較，可以進一步了解這些變因對於準確預估回彈與側壁捲曲效應的重要性。

## 貳、NUMISHEET'93之U形彎曲模型

圖 1 為 NUMISHEET’93 中所使用的二維 U 形彎曲模型，沖頭(Punch)與沖模(Die)間的間隙為 1mm，所有圓角半徑均為 5mm，圖 2 是 Pam-Stamp 仿照 NUMISHEET’93 所建立的三維 U 形彎曲模型。

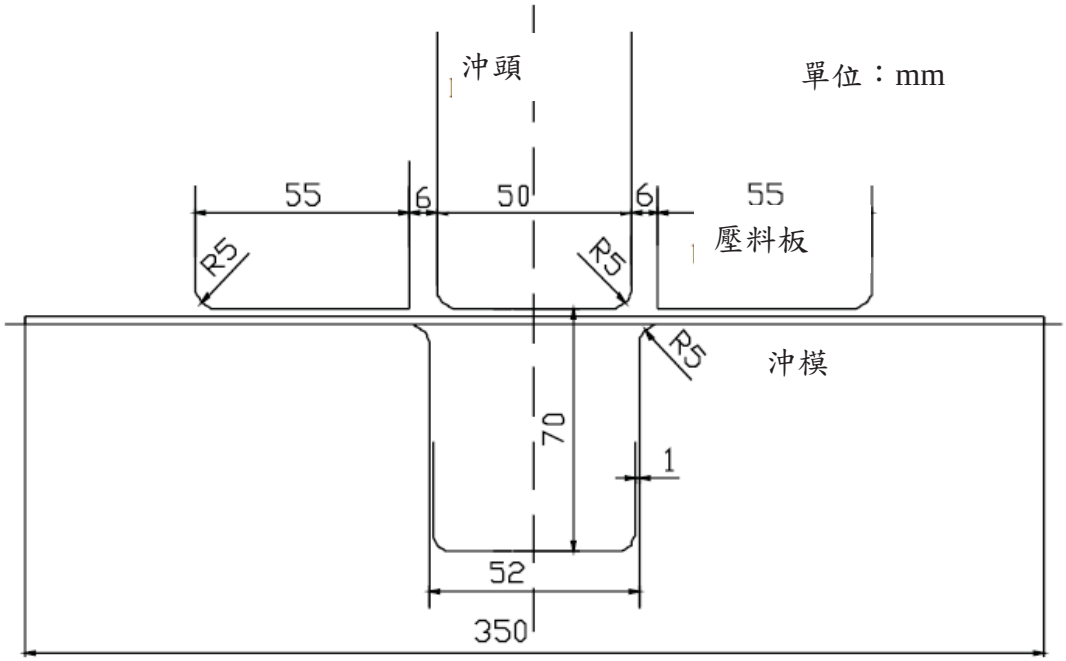


圖 1. NUMISHEET’93 的二維 U 形彎曲模型

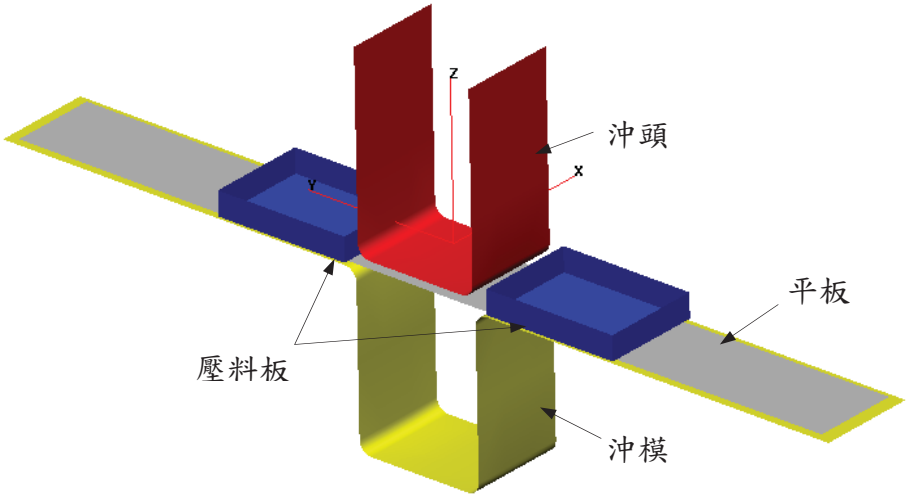


圖 2. Pam-Stamp 中建立的三維 U 形彎曲模型

平板材料為鋁合金，材料係數如表 1 所示，其中 $\bar{r}$ 是平均異向性係數，平板的長度 350mm，寬度 35mm，厚度 0.81mm，鋁合金材料採用等向硬化法則搭配 Hill48 降伏準則，硬化曲線採用 Krupkowsky Law 型式如(1)式

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \tag{1}$$

平板與成型工具間的摩擦係數為 0.162，壓板力維持 2.45 kN。

表 1.鋁合金材料係數表

| 材料 | $E$ (GPa) | $\nu$ | YS(MPa) | $K$(GPa) | $n$ | $\varepsilon_0$ | $\bar{r}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 鋁合金 | 71 | 0.33 | 135.3 | 0.57679 | 0.3593 | 0.01658 | 0.64 |

## 一、Pam-Stamp模擬U形彎曲試驗

為了精確模擬 U 形彎曲試驗，本文將試驗分成四個階段進行模擬，

(1)重力加載(Gravity)：將平板(Blank)放置於壓料板(Blankholder)上，重力方向為圖 3 中 z 方向，壓料板上升一段行程以頂起平板，此時由於重力作用會造成平板略微彎曲變形，為了精確模擬這段過程，此步驟必須以倍精度計算，但因為重力負載甚小，此時平板應力仍非常小。

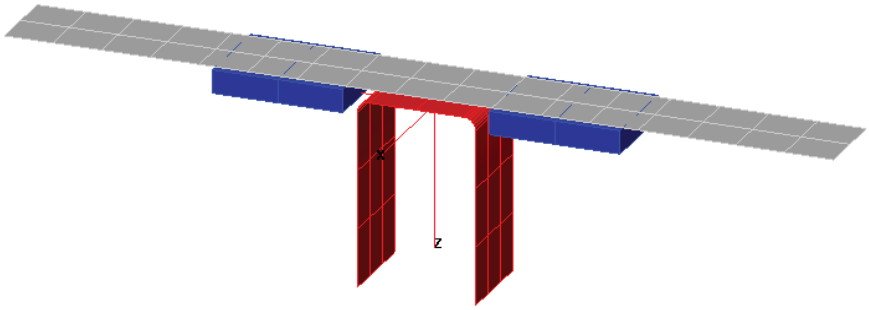


圖 3. Pam-Stamp 的重力加載分析階段

(2)夾持(Holding)：沖模(Die)壓在平板上，壓料板開始施加壓板力，由於壓板力的總力為 2.45KN，平板所承受的應力仍然非常小。

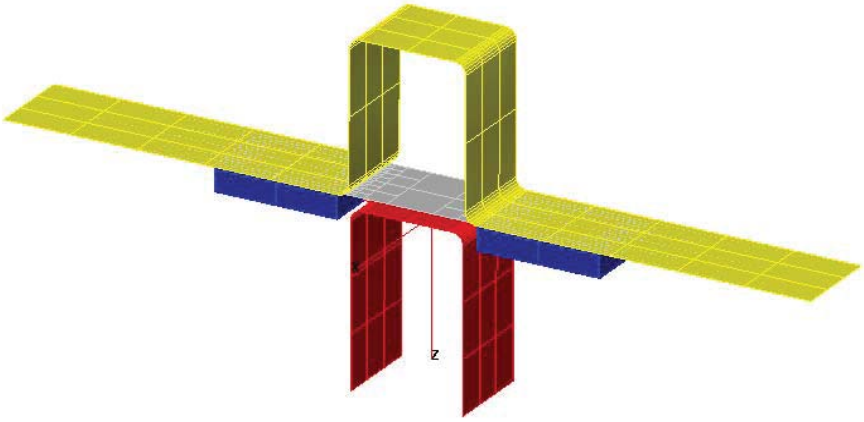


圖 4. Pam-Stamp 的夾持分析階段

(3)沖壓(Stamping)：沖模與壓料板一起下降，平板接觸到沖頭(Punch)而開始變形，過程中壓料板持續施加壓板力在平板上以確保平板的平整性。

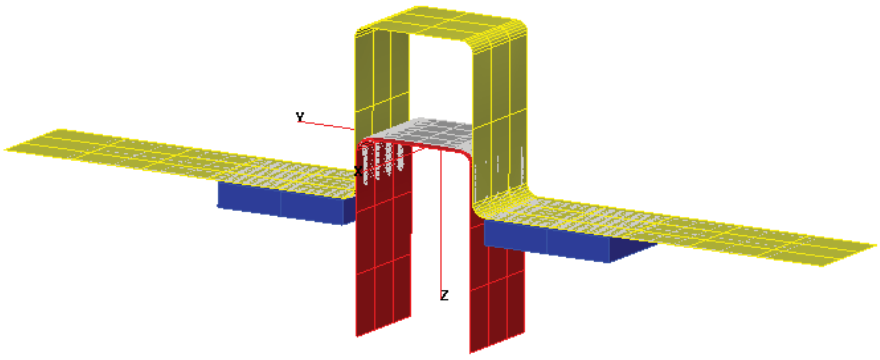


圖 5. Pam-Stamp 的沖壓分析階段

(4)回彈(Springback)：將沖模、沖頭與壓料板移除，讓變形的平板自由變形，在這個過程中可以選擇兩種演算法，第一種是顯示解法(Explicit)，第二種則必須選擇三個固定點，再以隱示解法(Implicit)計算，兩種方法各有優缺點，但為了提高準確度，一般建議此階段的分析應採倍精度計算。

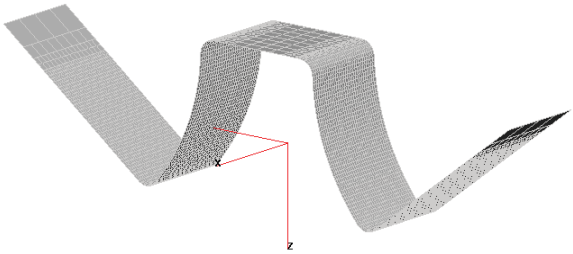

圖 6. Pam-Stamp 的回彈分析階段

## 二、回彈曲線的測量

NUMISHEET’93 所指定的回彈曲線測量方法如下圖所示。

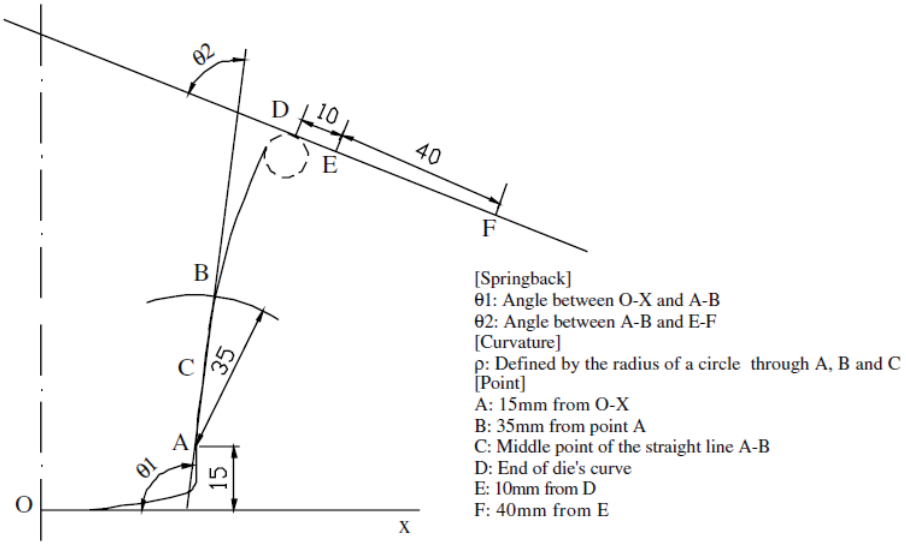


圖 7. NUMISHEET’93 指定量測方法

回彈分析階段完成後，回彈結果的測量步驟如下：

1. 在Pam-Stamp中取y-z平面作為分析的截面，擷取截面上回彈平板的座標點。
2. 利用軟體Grapher重新繪製曲線圖形，並控制水平垂直比例相同以還原回彈曲線，再將圖形匯出成dxf檔案。
3. 利用AutoCAD讀取dxf圖檔，並且測量 $\theta_1$ 、$\theta_2$ 與 $\rho$ 值。

# 參、結果與討論

金屬成型的模擬過程中，模擬軟體有一些內部設定可能會影響回彈的結果，一般而言有以下幾項：

- 殼元素在厚度方向的積分點數目($N_I$)
- 沖壓速度($v_{st}$)
- 平板接觸模具圓角處網格數目($N_E$)
- 回彈演算法(Implicit or explicit)
- 數值計算精度 (Double or single precision)

許多模擬軟體並不希望使用者更改這些參數，因而將這些參數以預設值處理，甚至無法更改，本文將利用 Pam-Stamp 2011 探討這些變因可能的影響。

## 一、積分點($N_I$)對回彈結果的影響

積分點分佈方式可以選擇平均分佈或是高斯分佈，一般而言高斯分佈準確度較高，因此高斯分佈是預設值，表 2 為殼元素在不同厚度方向積分點數目對回彈結果的比較，圖 8 為積分點數目對回彈結果的趨勢圖，從圖中可觀察厚度方向積分點數目對回彈角度$\theta_1$、$\theta_2$的影響極微小，對側壁捲曲半徑$\rho$的影響也不明顯。因此使用 Pam-Stamp 預設值 5 點即可擁有足夠的準確度，若為了模擬回彈而需要更高精確度，建議使用 7 個積分點應已足夠。

觀察表 2 中 Zhang et al. [8]的解析結果，等向硬化(Isotropic hardening)的材料模型明顯高估回彈效應，其中$\theta_1$已超過 NUMISHEET’93 實驗值的分佈範圍，動態硬化(Kinematic hardening)的材料模型則低估回彈效應，其中$\theta_2$也超過 NUMISHEET’93 實驗值的分佈範圍，反觀本文所模擬的平板也使用等向硬化法則，不論$\theta_1$，$\theta_2$或$\rho$都在實驗值範圍之內，也在 Zhang et al. [8]等向硬化與動態硬化解析值之間，可見本文模擬的 U 形彎曲回彈結果已經具有非常高的準確度。

表 2. 積分點($N_I$)對回彈結果的影響($v_{st}=5$，$N_E=12$，三點固定隱示解，倍精度)

| | NUMISHEET’93 實驗結果 | NUMISHEET’93 模擬結果 | Zhang et al. [8] 解析解 (等向硬化) | Zhang et al. [8] 解析解 (動態硬化) | $N_I=3$ | 5 | 7 | 9 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\theta_1$ | 101.5-116.0 | 62-134 | 118.25 | 106.77 | 106.98 | 106.99 | 106.6 | 106.99 | 107.36 |
| $\theta_2$ | 68.5-77.5 | 63-91 | 72.59 | 84.07 | 69.28 | 69.26 | 68.56 | 69.24 | 69.33 |
| $\rho$ | 75.7-217.0 | 60-531 | 75.28 | 151.46 | 92.51 | 92.6 | 94.15 | 93.05 | 93.76 |

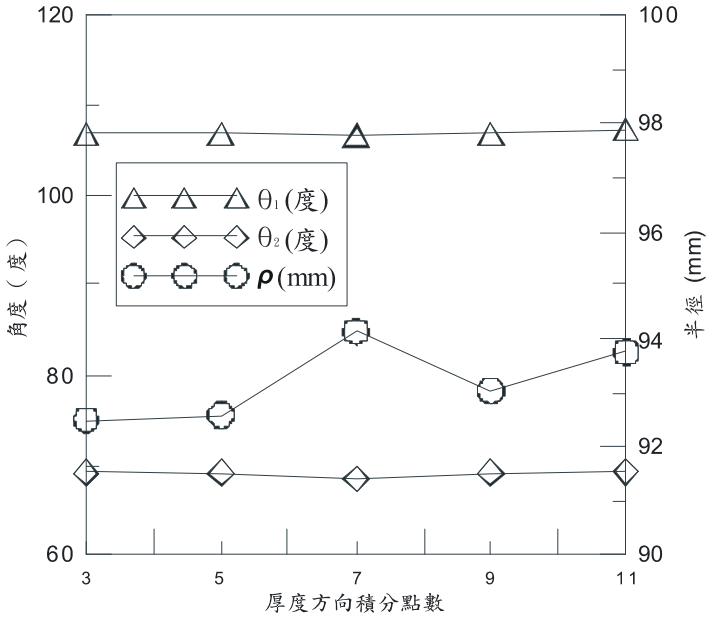


圖 8. 積分點($N_I$)對回彈結果的趨勢圖

## 二、沖壓速度($v_{st}$)對回彈結果的影響

Pam-Stamp 模擬沖壓的過程是以準靜態的方式計算，沖壓速度越慢，計算所需的時間越多，但為了縮短模擬的時間，預設的模擬沖壓速度將遠大於實際沖壓速度，但是過大的沖壓速度會增加模擬時的動態效應，對於需要高準確度的回彈模擬是非常不利的。

Pam-Stamp 的沖壓速度是以梯形波的方式加載，梯形波最高點的速度預設值為 5m/s，本文嘗試降低沖壓速度以瞭解較慢的沖壓速度對回彈模擬的影響，表 3 是不同沖壓速度對回彈結果的比較，圖 9 是沖壓速度對回彈結果的趨勢圖，從圖中可觀察出沖壓速度對回彈角度的影響並不明顯，對側壁彎曲半徑有比較明顯的影響，不過在 $v_{st}$＝2m/s 的情況應該就可以得到收斂的結果。

表 3. 沖壓速度($v_{st}$)對回彈結果的影響
($N_I$＝5，$N_E$＝12，三點固定隱示解，倍精度)

| | NUMISHEET'93 實驗結果 | NUMISHEET'93 模擬結果 | Zhang et al. [8] 解析解 (等向硬化) | Zhang et al. [8] 解析解 (動態硬化) | $v_{st}$＝5(m/s) | 4 | 3 | 2 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\theta_1$ | 101.5-116.0 | 62-134 | 118.25 | 106.77 | 106.99 | 106.73 | 108.56 | 109.12 | 109.75 |
| $\theta_2$ | 68.5-77.5 | 63-91 | 72.59 | 84.07 | 69.26 | 71.18 | 70.38 | 69.66 | 69.29 |
| $\rho$ | 75.7-217.0 | 60-531 | 75.28 | 151.46 | 92.6 | 97.76 | 89.33 | 85.17 | 83.89 |

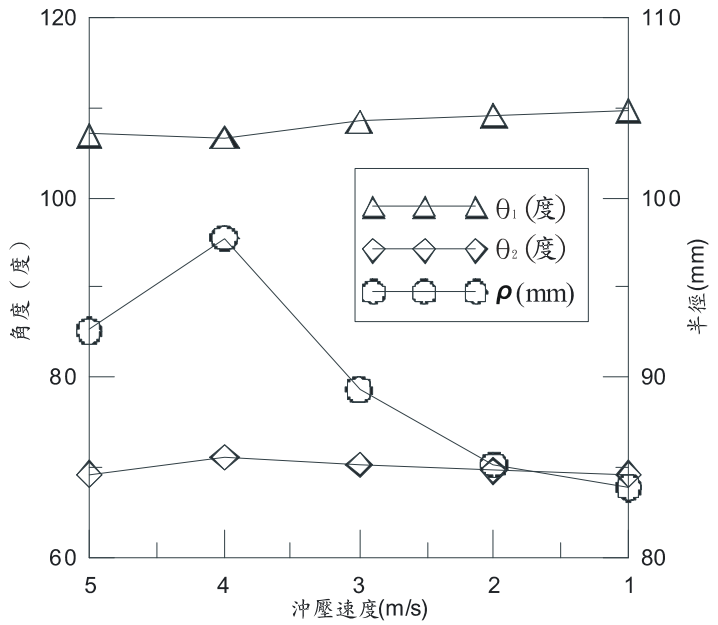


圖 9. 沖壓速度($v_{st}$)對回彈結果的趨勢圖

## 三、圓角處平板網格數目($N_E$)對回彈結果的影響

為了加快分析速度，Pam-Stamp 提供自適應(Adaptive)網格最佳化的功能，在分析初期使用較粗的網格，隨著計算的逐步進行，在某些需要精密網格描述的地方，再將網格進一步細化，藉由自適應網格最佳化可以在兼顧計算精密度的情況下獲得最有效率的計算時間。

在選取 Automatic meshing 功能後，可以藉由指定初始網格大小，自動網格細分的層級數(Refinement level)，以及改變網格滑移時的最小半徑(Sliding radius)，就可以改變平板網格在圓角處的尺寸。表 4 是平板接觸模具圓角處網格數目對回彈結果的比較，圖 10 是網格數目對回彈結果的趨勢圖，從圖 10 可觀察出當圓角處網格數目等於 9 時，回彈的結果即有相當不錯的收斂度，圖 11 是將不同圓角元素數目的回彈截面曲線重疊在一起，可以觀察出隨著圓角元素數目的增加，回彈結果逐漸變化的過程。

表 4.平板接觸模具圓角處網格數目($N_E$)對回彈結果的影響
($N_I=5$，$v_{st}=2$，三點固定隱示解，倍精度)

| | NUMISHEET'93 實驗結果 | NUMISHEET'93 模擬結果 | Zhang et al. [8] 解析解 (等向硬化) | Zhang et al. [8] 解析解 (動態硬化) | $N_E=3$ | 5 | 7 | 9 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\theta_1$ | 101.5-116.0 | 62-134 | 118.25 | 106.77 | 103.65 | 109.71 | 107.15 | 108.89 | 109.12 |
| $\theta_2$ | 68.5-77.5 | 63-91 | 72.59 | 84.07 | 72.6 | 71.65 | 73.86 | 71.53 | 69.66 |
| $\rho$ | 75.7-217.0 | 60-531 | 75.28 | 151.46 | 129.58 | 87.81 | 97.88 | 87.78 | 85.17 |

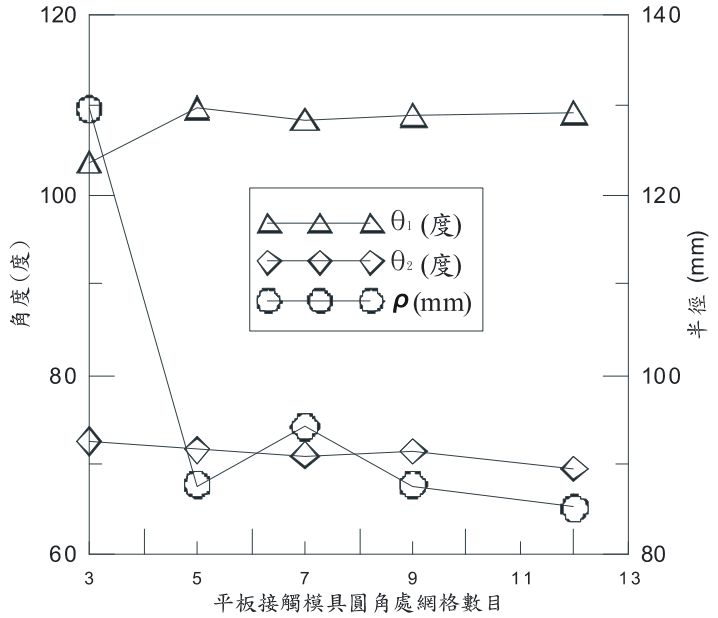


圖 10.平板接觸模具圓角處網格數目($N_E$)回彈結果的趨勢圖

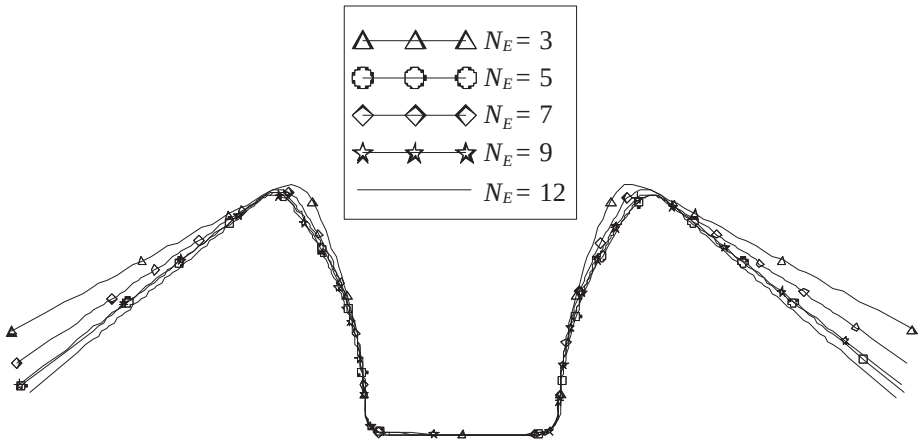


圖 11.不同平板接觸模具圓角處網格數目($N_E$)條件下的回彈截面圖

## 四、回彈演算法與計算精密度對回彈結果的影響

在回彈的分析階段，顯示(Explicit)演算法不需指定任何固定點而自由回彈，可視為動力問題，對每一個非常微小的時間步階逐一計算，可以獲得精確且接近真實回彈的結果，但耗費的計算時間非常可觀。隱示(Implicit)演算法必須指定三個固定點，而以靜態問題來求解，可以快速得到接近真實的回彈結果，但是必須慎選固定點以免過度限制平板回彈的效應。

表 5 為不同回彈演算法與計算精度搭配下之回彈結果比較表，圖 12 為不同演算法與計算精度條件下的回彈截面曲線，從圖 12 可觀察出使用顯示演算法的回彈分析(Explicit springback)，不論單精度或倍精度都可以得到一模一樣的結果，使用三點固定隱示演算法(3-points locked implicit)所得的回彈角度$\theta_1$，$\theta_2$與顯示演算法的回彈分析相差不多，側壁捲曲半徑$\rho$約有 9%的差異，但是計算所需的時間遠小於顯示演算法，因此在節省時間的前提之下，建議使用三點固定隱示演算法搭配倍精度的計算精度，可以得到既準確又有效率的計算結果。

表 5. 回彈演算法與計算精度對回彈結果的影響（$N_I = 5$，$v_{st} = 2$，$N_E = 12$）

| | 三點固定隱示解<br>倍精度 | 三點固定隱示解<br>單精度 | 顯示解<br>倍精度 | 顯示解<br>單精度 |
|---|---|---|---|---|
| $\theta_1$ | 109.12 | 109.16 | 109.35 | 109.35 |
| $\theta_2$ | 69.66 | 70.64 | 67.29 | 67.29 |
| $\rho$ | 85.17 | 87.33 | 79.72 | 79.72 |
| 回彈階段<br>模擬時間 | 33sec | 30sec | 144min | 88min |

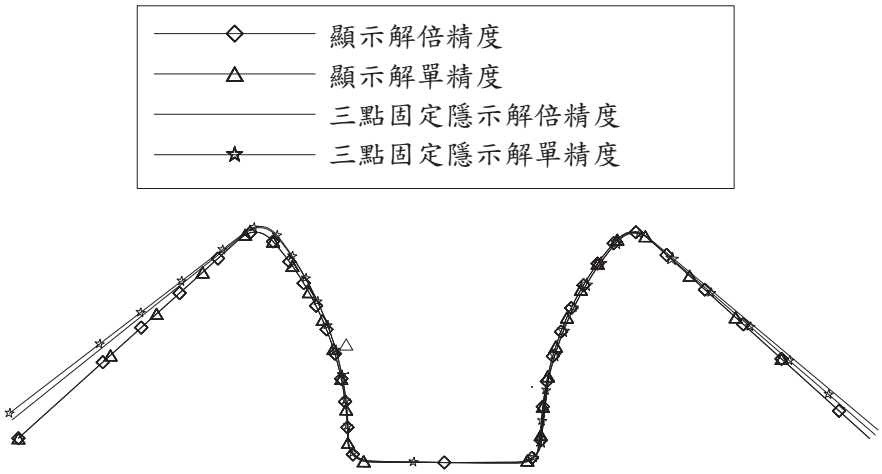


圖 12 不同回彈演算法與計算精度條件下的回彈截面圖

## 肆、結論

由以上對各種影響回彈變因的分析，可以獲得以下結論：

1. Pam-Stamp殼元素厚度方向的積分點數目預設為5，已足以準確模擬沖壓過程，若為了模擬回彈而需要更高精確度，建議使用7個積分點。
2. 沖壓速度越慢，計算所需的時間越多，太快的沖壓速度將會增加模擬時的動態效應，不利於回彈模擬，沖壓速度 $v_{st}$ ＝2m/s可以得到接近收斂的結果，在時間因素的考量之下，$v_{st}$ ＝2m/s是合理的選擇。
3. 自適應網格最佳化可以在兼顧計算精密度的情況下獲得最有效率的計算時間，平板在圓角處的網格數目為9時，即有相當好的收斂度。
4. 在回彈分析階段，使用三點固定隱示演算法所得的回彈角度與顯示演算法相差極小，側壁捲曲半徑約有9%的差異，但是模擬所需的時間遠小於顯示演算法，因此建議採用三點固定隱示演算法搭配倍精度進行回彈模擬。

## 伍、致謝

感謝中國鋼鐵股份有限公司對本研究團隊的經費支援與經驗上的多方支持，在此特別予以感謝。

## 陸、參考文獻

1. The 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Seoul, Korea, 2011, “Benchmark Problems”

http://www.numisheet2011.org/index.html?Pagenum=50 (Date visited: December 11, 2011).

2. Taylor, L., Cao, J., Karafillis, A. P. and Boyce, M. C., 1995, "Numerical simulations of sheet-metal forming." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, NO. 1-4: pp. 168-179.
3. Chung, K., Yoon, J. W. and Richmond, O., 2000, "Ideal sheet forming with frictional constraints." *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, NO. 6: pp. 595-610.
4. Liu, G., Lin, Z., Xu, W. and Bao, Y., 2002, "Variable blankholder force in U-shaped part forming for eliminating springback error." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, NO. 1-3: pp. 259-264.
5. Xu, W. L., Ma, C. H., Li, C. H. and Feng, W. J., 2004, "Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, NO. 1-3 SPEC. ISS.: pp. 217-222.
6. Gomes, C., Onipede, O. and Locell, M., 2005, "Investigation of springback in high strength anisotropic steels." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, NO. 1: pp. 91-98.
7. Zhang, D., Cui, Z., Ruan, X. and Li, Y., 2006, "Sheet springback prediction based on non-linear combined hardening rule and Barlat89's yielding function." *Computational Materials Science*, Vol. 38, NO. 2: pp. 256-262.
8. Zhang, D., Cui, Z., Ruan, X. and Li, Y., 2007, "An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending." *Computational Materials Science*, Vol. 38, NO. 4: pp. 707-715.
9. Jiang, C., Han, X., Liu, G. R. and Li, G. Y., 2007, "The optimization of the variable binder force in U-shaped forming with uncertain friction coefficient." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, NO. 1-3: pp. 262-267.
10. Kadkhodayan, M. and Zafarparandeh, I., 2008, "On the relation of equivalent plastic strain and springback in sheet draw bending." *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, NO. SUPPL. 1: pp. 141-144.
11. Tang, B., Lu, X., Wang, Z. and Zhao, Z., "Springback investigation of anisotropic aluminum alloy sheet with a mixed hardening rule and Barlat yield criteria in sheet metal forming." *Materials and Design*, Vol. 31, NO. 4: pp. 2043-2050.