

## 第三章 建立簡化等效纖維編織布分析模型

### 3.1 單層纖維編織布簡化模型建立

防彈衣為多層纖維編織布組成，若於有限元素模型建立多層編織布，其運算量會較單層編織布增加許多，因此為了達到多層編織布模擬之目標，並且與實驗結果對照，簡化編織布模型為必要的工作，且由於編織布實際上受衝擊時會被衝擊物穿透，因此在本節中加入破壞準則進行分析。根據文獻回顧，Nilakantan 等人[10, 11]使用多尺度混合元素分析法將複雜的編織布模型進行簡化，可節省分析運算時間，但由於薄殼元素運用於編織模型上無法確實表現出纖維束受衝擊後其厚度方向之變形，故本研究將單層編織布接近撞擊區域的部分建為實體元素，遠離撞擊區域的部分建為平板薄殼元素，使用單尺度混合元素分析法模擬單層簡化編織布受衝擊之結果，並以全編織模型做為比較標準，探討全編織模型與 HEA 簡化模型之差異。

#### 3.1.1 全編織實體元素模型建立

首先，根據前一章所介紹之編織布幾何形狀，建立一尺寸為 50.8mm × 25.4mm 的四分之一模型，其截面之幾何參數如同表 2.1 所示，有限元素模型如圖 3.1 所示，編織布總計 329,256 個實體元素，並使用

\*MAT\_ADD\_EROSION 來定義材料之破壞行為，將破壞準則設定為最大主應力(Maximum principle stress)，若某一元素在計算中其最大主應力超過所設定之破壞準則，在 LS-DYNA 會將此元素在計算中刪除，在此設定最大主應力超過纖維方向拉伸強度 3400MPa 即為破壞。圓球直徑為 5.5mm，並只允許沿垂直編織布平面方向移動，材料為鋼材，初速度設分別設為 40m/s、100m/s 以及 300m/s。在此使用自動型單面接觸(Contact Automatic Single Surface)來定義接觸行為，參考文獻測量之纖維間摩擦係數[16, 18]，在此將圓球與編織布間以及編織布纖維之間的摩擦係數皆設為 0.18。在本章中將以此模型作為基準值(baseline)，探討全編織模型受圓球衝擊後，圓球之速度歷程、編織布動能及應變能變化與摩擦耗能等，並與簡化模型做比較。

### 3.1.2 等效模型建立

#### 3.1.2.1 矩形等效模型

根據 3.1.1 節介紹的單跨距編織布模型及尺寸，首先建立矩形等效模型編織布，由於此模型對稱於 x-z 平面以及 y-z 平面，因此同樣只須建立四分之一來模型進行分析。模型分為兩部分：第一部分為靠近撞擊之區域，由實體元素編織布組成，其幾何形狀與材料性質同 3.1.1 節所介紹，此區域尺寸為 48.5mm×27.6mm，約為整體模型的四分之一；第二部分為遠離

撞擊區域的部分，由薄殼元素組成，採用 SHELL163 為分析元素類型，SHELL163 為一階四節點薄殼元素，適用於顯性動態分析，其幾何形狀為一平板，厚度為 0.23mm，其簡化模型如圖 3.2 所示。而編織區域與平板區域之交介於編織布厚度中心處，其有限元素模型如圖 3.3 所示，在此將兩介面交接處作三方向位移耦合之處理，其餘邊界條件、摩擦係數與圓球幾何等參數皆與 3.1.1 節所介紹之模型相同，以便比較簡化模型與全編織模型做比較。

### 3.1.2.2 十字形等效模型

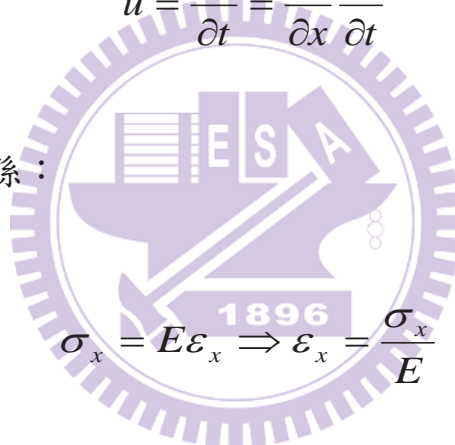
為了比較不同等效模型對於纖維編織布受衝擊之行為，在此建立十字形等效模型如圖 3.4 所示，此模型同樣對稱於 x-z 平面以及 y-z 平面，因此同樣只須建立四分之一來模型進行分析。模型分為兩部分：第一部分為靠近撞擊之區域向外延伸至邊界，為了將編織區域與等效區域所占比例能夠與矩形等效模型相接近，在此將寬度縮小為 14.2mm，由實體元素編織布組成，其幾何形狀與材料性質同 3.1.1 節所介紹；第二部分為遠離撞擊區域的部分，由薄殼元素組成，材料參數如同表 3.1 所示，並將編織區域與平板區域之介面交接處作三方向位移耦合之處理。根據 3.1.2 節所建立之矩形等效模型，以及本小節之十字形等效模型，計算出簡化區域所佔之面積比例分別為 0.73 與 0.62，可發現由於十字形等效模型其編織區域會延伸至邊界上，因此出簡化區域所佔之面積會較矩形等效模型小。

### 3.1.3 等效區域之材料參數

當物體受力時會產生一應力波，若應力波傳遞時穿越兩種不同的介質，由於兩介質的阻抗(Impedance)不同，即有可能發生透射(transmit)或反射(reflect)之行為，當一入射波由介質 A 傳遞至介質 B，其產生透射波與反射波示意圖如圖 3.5 所示，以一維彈性波[24]為例子，介質粒子移動之速度  $\dot{u}$  可表示為：

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3-1)$$

再由應力與應變之關係：


$$\sigma_x = E \varepsilon_x \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (3-2)$$

介質粒子移動之速度  $\dot{u}$  可改寫為：

$$\dot{u} = \varepsilon_x \frac{c \partial t}{\partial t} = \frac{\sigma_x}{E} c = \frac{\sigma_x}{\rho v^2} c = \frac{\sigma_x}{\rho v} = \frac{F}{\rho v A} \quad (3-3)$$

其中  $E$  為材料的楊氏模數，

$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ：為波在介質中傳遞之速度(波速)，

$$\sigma_x = \frac{F}{A} : F \text{ 為外力，} A \text{ 為截面積，}$$

$Z = \rho v A$  在此定義為材料之特性阻抗(specific impedance)。

根據 Nilakantan 等人[10, 11]之文獻，當編織布受衝擊後，第一部分與第二部份兩介質間阻抗(Impedance)應要相同，應力波在傳遞時不會產生反射波，藉由此關係可得等效材料部份之楊氏係數及密度。幾何尺寸示意如圖 3.6， $E_{11}$  及  $E_{22}$  分別為纖維束的纖維方向及垂直纖維方向之楊氏係數， $\rho_{yarn}$  為纖維束的密度。而  $E_{xx-eff}$  及  $E_{yy-eff}$  為等效平板部分 X 方向與 Y 方向之楊氏係數， $\rho_{eff}$  為等效平板部分的密度， $t_{eff}$  為等效平板之厚度。首先，由於等效後編織布質量應相同，藉由測量編織布的單位面積之重量可得知編織布的面密度(areal density)，並測量編織布之厚度作為等效平板區域厚度  $t_{eff}$ ，即可得到等效平板區域之密度，如式(3-4)：

$$\rho_{eff} = \frac{\text{areal density}}{t_{eff}} \quad (3-4)$$

接著根據兩介質間阻抗相同，可得到式(3-5)及式(3-6)：

$$Z = \rho v A \quad (3-5)$$

$$\rho_{eff} v_{xx-eff} A_{xx-eff} = \rho_{yarn} v_{yarn} A_{xx-yarn} \quad (3-6)$$

其中  $v_{yarn}$  為纖維束之波速， $v_{xx-eff}$  為等效平板區域之波速， $A_{xx-yarn}$  為 X 方向

纖維束之截面積總和， $A_{xx-eff}$  為等效平板區域之截面積， $W$  為兩介質交界面之寬度，因此等效平板區域之截面積可表示為：

$$A_{xx-eff} = t_{eff} W \quad (3-7)$$

而等效平板與纖維束之波速可分別表示為：

$$v_{xx-eff} = \sqrt{\frac{E_{xx-eff}}{\rho_{eff}}} \quad (3-8)$$

$$v_{yarn} = \sqrt{\frac{E_{11}}{\rho_{yarn}}} \quad (3-9)$$

將式(3-8)及式(3-9)整理代入式(3-6)後可得：

$$\sqrt{E_{xx-eff} \rho_{eff}} A_{xx-eff} = \sqrt{E_{11} \rho_{yarn}} A_{xx-yarn} \quad (3-10)$$

再將式(3-7)代入式(3-10)並進行整理，可得等效平板區域之 X 方向楊氏係數如下：

$$E_{xx-eff} = \frac{E_{11} \rho_{yarn} A_{xx-yarn}^2}{\rho_{eff} t_{eff}^2 W} \quad (3-11)$$

同理可得到等效平板區域之 Y 方向楊氏係數：



$$E_{yy-eff} = \frac{E_{11}\rho_{yarn}A_{yy-yarn}^2}{\rho_{eff}t_{eff}^2L} \quad (3-12)$$

$A_{yy-yarn}$  為 Y 方向纖維束之截面積和， $A_{yy-eff}$  為等效平板區域之截面積， $L$  為兩介質交界面之寬度。最後根據等效平板區域截面積與纖維束截面積之關係式如下：

$$A_{xx-yarn} = \frac{W}{s_{yarn}} A_{yarn} \quad (3-13a)$$

$$A_{yy-yarn} = \frac{L}{s_{yarn}} A_{yarn} \quad (3-13b)$$

其中  $A_{yarn}$  為編織束之截面積，在此模型中為  $0.049\text{mm}^2$ ； $s_{yarn}$  為編織束之跨度，在此模型中為  $0.747\text{mm}$ 。再將式(3-13a)與式(3-13b)分別代入(3-11)與式(3-12)即可求得等效平板區域之楊氏係數：

$$E_{xx-eff} = E_{yy-eff} = E_{11} \frac{\rho_{yarn}}{\rho_{eff}} \left( \frac{A_{yarn}}{t_{eff}s_{yarn}} \right)^2 \quad (3-14)$$

由式(3-14)可計算出等效平板之楊氏係數，剪力模數  $G_{eff}$  假設與纖維束之材料性質相同，其幾何參數與材料參數如表 3.1 所示，即可套用於 3.1.2 節所介紹之等效模型中，以便後續之探討。

## 3.2 單層纖維編織布簡化模型結果討論

### 3.2.1 衝擊速度 $V_0=40\text{m/s}$

為了比較簡化模型與全編織模型編織布受衝擊時之差異，本研究探討鋼質圓球分別由  $40\text{m/s}$ 、 $100\text{m/s}$  及  $300\text{m/s}$  之速度衝擊於編織布上，觀察衝擊過程中圓球速度變化以及編織布能量改變趨勢。全編織模型與 HEA 模型於  $40\text{m/s}$  之速度衝擊結果如圖 3.7 所示：黑色線段為全編織實體元素模型(full woven)，在本研究中為基準模型以便與其他模型做比較，紅色線段為矩形等效模型(central-patch)，綠色線段為十字形等效模型(center-cross)，觀察三個模型受衝擊後圓球速度、編織布應變能、編織布中心位移 以及編織布動能隨時間的變化。圖中可觀察十字形等效模型在  $40\text{m/s}$  之速度衝擊下與全編織模型之曲線皆能幾乎重合，而矩形等效模型部分的圓球速度變化明顯較其他兩者少，且編織布的中心位移較其他編織布模型大，表示矩形等效模型之抗衝擊能力較差，無法表示全編織模型受衝擊之行為。

觀察全編織模型與等效模型受  $40\text{m/s}$  圓球衝擊之變形圖如圖 3.8，觀察時間間格為  $50\mu\text{s}$  之側向變形，由圖中編織布變形之趨勢發現由於衝擊速度較低，因此編織布側向變形會傳遞至邊界上且不會發生破壞，而十字形等效模型之側向變形與全編織模型較相近，矩形等效模型的側向變形範圍明顯較小，此結果亦能表示十字形等效模型受  $40\text{m/s}$  之速度衝擊



下較能表示全編織模型受衝擊之行為。為了解釋兩種不同等效模型受衝擊後有不同的現象，全編織模型與等效模型受 40m/s 圓球衝擊之主應力圖如圖 3.9 所示，圖中可發現全編織模型受衝擊時主應力集中在十字區域，因此十字形等效模型主應力分布較接近全編織模型，而矩形等效模型四周皆為等效平板區域，應力在此區域效會較小，導致其結果與全編織模型相比會產生差異。

### 3.2.2 衝擊速度 $V_0=100\text{m/s}$

接著探討鋼質圓球由 100m/s 之速度衝擊於編織布上，觀察衝擊過程中圓球速度變化以及編織布能量改變趨勢，全編織模型與 HEA 模型於 100m/s 之速度衝擊結果如圖 3.10，觀察三個模型受衝擊後圓球速度、編織布應變能、編織布摩擦耗能以及編織布動能隨時間的變化，圖中同樣發現十字形等效模型在 100m/s 之速度衝擊下與全編織模型之曲線皆能幾乎重合，由於圓球衝擊速度較大，全編織模型與十字形等效模型編織布開始有元素之應力值超過所設定之破壞準則而在計算中被刪除，此時的時間為  $70\mu\text{s}$  標註於圖 3.10 中。由圖 3.10(a)可發現當編織布開始發生破壞後鋼球速度會開始趨近平緩，直至穿透編織布後速度維持定值，而圖 3.10(b)與圖 3.10(d)中編織布的應變能與動能亦會在鋼球穿透之後即不再上升。在矩形等效模型部分：圓球速度變化可看出編織布直到  $100\mu\text{s}$  時依然尚

未發生破壞，因此受衝擊後與其他兩模型有所差異，編織布應變能亦較大許多，表示矩形等效模型之韌性較強，使得變形量較大，與全編織模型受衝擊之行為完全不同。

比較全編織模型與等效模型受 100m/s 鋼質圓球衝擊之變形圖如圖 3.11 所示，觀察時間間格為  $20\mu\text{s}$  之側向變形，由圖中編織布變形之趨勢發現由於衝擊速度略高，因此編織布側向變形依然會傳遞至邊界上且開始有破壞行為發生，而十字形等效模型之側向變形與全編織模型較相近，矩形等效模型的側向變形範圍明顯較小，也能看出尚未發生破壞，此結果亦能表示十字形等效模型受 100m/s 之速度衝擊下較能表示全編織模型受衝擊之行為。而在此速度衝擊之下，編織布纖維會先受鋼球衝擊後往撞擊點兩側撐開，接著開始發生破壞，當編織布發生破壞後，隨著破壞的部分愈大，纖維束的拘束亦隨之減少，導致纖維之間較容易彼此滑移，故由圖 3.10(c) 摩擦耗能歷程可發現全編織模型與十字形等效模型在  $70\mu\text{s}$  後會開始急遽上升，而矩形等效模型依然維持穩定上升。

接著觀察全編織模型與等效模型受 100m/s 圓球衝擊之主應力圖如圖 3.12 所示，與受到 40m/s 之速度撞擊時相同：可發現全編織模型受衝擊時主應力集中在十字區域，因此十字形等效模型主應力分布較接近全編織模型，而矩形等效模型結果與全編織模型相比會產生差異。

### 3.2.3 衝擊速度 $V_0=300\text{m/s}$

最後探討鋼質圓球由  $300\text{m/s}$  之速度衝擊於編織布上，衝擊過程中圓球速度變化以及編織布能量改變趨勢，全編織模型與 HEA 模型於衝擊  $300\text{m/s}$  之速度衝擊結果如圖 3.13，觀察三個模型受衝擊後圓球速度、編織布應變能、編織布摩擦耗能以及編織布動能隨時間的變化。由圖中可發現矩形等效模型與十字形等效模型在  $300\text{m/s}$  之速度衝擊下都能與全編織模型之曲線達到重合，代表此時兩個簡化模型皆能取代全編織模型。觀察編織布開始有元素發生破壞時間為  $12\mu\text{s}$  並標註於圖中，由圖 3.13(a) 可發現當編織布開始發生破壞後，鋼球速度即漸漸趨近於一定值，表示鋼球已穿透編織布，由圖 3.13(b) 及圖 3.13(d) 中觀察編織布的應變能及動能歷程，由於鋼球衝擊速度較大，會產生慣性作用導致編織布被穿透之後應變能及動能依然會些微上升而不會立即下降。

比較全編織模型與等效模型受  $300\text{m/s}$  鋼質圓球衝擊之變形圖如圖 3.14 所示，觀察時間間格為  $5\mu\text{s}$  之側向變形，由圖中編織布變形之趨勢發現由於衝擊速度較高，因此編織布受衝擊後很快就開始有破壞行為發生，導致編織布的側向變形範圍較小，因此矩形等效模型與十字形等效模型兩者之側向變形都與全編織模型差異不大，且由於編織布側向變形只集中於撞擊點附近，編織布纖維受鋼球衝擊後會直接斷裂，因此纖維破壞後對於周遭纖維滑移之影響不顯著，故圖 3.13(c) 中摩擦耗能歷程在編織布

發生破壞後不會有明顯之轉折處。觀察全編織模型與等效模型受 300m/s 圓球衝擊之主應力圖如圖 3.15 所示，圖中顯示時間 10 $\mu$ s 編織布開始發生破壞之前之主應力分布，可發現三個模型應力最大值都集中於撞擊區域，因此矩形等效模型與十字形等效模型的主應力分布皆能接近全編織模型，且主應力最大值差異亦不大。

接著比較全編織模型與簡化模型的運算時間，單層纖維編織布模型運算時間比較如表 3.2 所示，可發現編織布受到衝擊後，矩形等效模型與十字形等效模型與全編織模型相比都可減少將近一半的的運算時間，故簡化模型在本研究中確實達到減少計算量之效果，其中十字形等效模型又能與全編織模型之模擬結果達到一致。

### 3.3 三層纖維編織布簡化模型建立

由前一節討論中，探討了全編織模型與兩種簡化模型在受到不同速度衝擊下之差異，發現在不同速度的衝擊物撞擊時皆有良好的簡化模型可以表現全編織模型受衝擊之行為，在本節中將編織布增加為三層且層與層之間無間隙，其有限元素模型及側視圖如圖 3.16 所示。初速度設分別設為 40m/s、100m/s 以及 300m/s。同 3.1 節所介紹之摩擦係數設定，使用自動型單面接觸(Contact Automatic Single Surface)來定義接觸行為，並將層與層之間摩擦係數亦設為 0.18。在本章中將以此模型作為基準值，探討三層全編織模型受圓球衝擊後，圓球之速度歷程、編織布動能及應變能



變化與摩擦耗能等，並與三層簡化模型做比較。

## 3.4 三層纖維編織布模型結果討論

### 3.4.1 衝擊速度 $V_0=40\text{m/s}$

本節將探討三層纖維編織布受圓球衝擊之行為，首先探討鋼質圓球由  $40\text{m/s}$  之速度衝擊於三層編織布上，觀察衝擊過程中圓球速度變化以及織布能量改變趨勢，全編織模型與 HEA 模型於衝擊  $40\text{m/s}$  之速度衝擊結果如圖 3.17，觀察三個模型受衝擊後圓球速度、編織布應變能、編織布摩擦耗能以及編織布動能隨時間的變化，由於在單層編織布受鋼球衝擊時就已經不會發生破壞，因此在三層編織布的模擬會與單層之結果相近：十字形等效模型在  $40\text{m/s}$  之速度衝擊下與全編織模型之曲線皆能幾乎重合且圓球速度達到靜止，而矩形等效模型較無法表示全編織模型受衝擊之行為。

觀察三層全編織模型與等效模型受  $40\text{m/s}$  圓球衝擊之變形圖如圖 3.18，觀察時間間格為  $50\mu\text{s}$  之側向變形，同樣可發現由於衝擊速度較低，因此編織布側向變形會傳遞至邊界上且不會發生破壞，與全編織模型相比，十字形等效模型之側向變形與全編織模型較相近，而矩形等效模型的側向變形傳遞明顯較慢，因此範圍較其他二者小，表示十字形等效模型不論於單層或三層受  $40\text{m/s}$  之速度衝擊下皆能夠表示全編織模型受衝擊之

行為。若比較三層全編織模型與等效模型受 40m/s 圓球衝擊之主應力圖如圖 3.19 所示，圖中可發現全編織模型受衝擊時主應力集中於中心線上並延伸至上下邊界，且十字形等效模型主應力分布較接近全編織模型。

### 3.4.2 衝擊速度 $V_0=100\text{m/s}$

接著探討三層纖維編織布受圓球 100m/s 之速度衝擊之行為，並觀察衝擊過程中圓球速度變化以及編織布能量改變趨勢，全編織模型與 HEA 模型於 100m/s 之速度衝擊結果如圖 3.20，觀察三個模型受衝擊後圓球速度、編織布應變能、編織布摩擦耗能以及編織布動能隨時間的變化，由於編織布已增加為三層，抵抗衝擊之能力大幅提升，因此受到圓球衝擊後不易發生破壞，而會產生大範圍的側向變形。圖中可以發現十字形等效模型在 100m/s 之速度衝擊下與全編織模型之曲線皆能幾乎重合且圓球速度已達到靜止，而矩形等效模型部分受衝擊後與其他兩模型有所差異。

比較三層全編織模型與等效模型受 100m/s 鋼質圓球衝擊之變形圖如圖 3.21 所示，觀察時間間格為  $20\mu\text{s}$  之側向變形，由圖中編織布變形之趨勢發現編織布側向變形依然會傳遞至邊界上，而十字形等效模型之側向變形與全編織模型較相近，矩形等效模型的側向變形範圍明顯較小，此結果亦能表示十字形等效模型受 100m/s 之速度衝擊下較能表示全編織模型受衝擊之行為。當時間為  $60\mu\text{s}$  時，由圖 3.22 及圖 3.23 編織布之側



視圖及上視圖來觀察各模型受衝擊之破壞情形，可發現全編織模型與十字形等效模型受到圓球 100m/s 之速度衝擊後第一層編織布會發生破壞，而矩形等效模型受衝擊後三層皆不會破壞，更可發現編織布破壞後纖維會明顯被鋼球撐開而向撞擊點兩側滑移，原因為當有破壞發生之後纖維束的拘束較少，使得纖維之間較容易彼此滑移，故由圖 3.20(c)摩擦耗能歷程可發現全編織模型與十字形等效模型在 48 $\mu$ s 後會開始急遽上升，而矩形等效模型依然維持穩定上升。

接著觀察全編織模型與等效模型受 100m/s 圓球衝擊之主應力圖如圖 3.24 所示，與單層編織布受 100m/s 之速度撞擊時相同：可發現全編織模型受衝擊時主應力集中在十字區域，因此十字形等效模型主應力分布較接近全編織模型，而矩形等效模型結果與全編織模型相比會產生差異。

### 3.4.3 衝擊速度 $V_0=300\text{m/s}$

最後探討鋼質圓球由 300m/s 之速度衝擊於三層編織布上，衝擊過程中圓球速度變化以及編織布能量改變趨勢，三層全編織模型與 HEA 模型於衝擊 300m/s 之速度衝擊結果如圖 3.25，觀察三個模型受衝擊後圓球速度、編織布應變能、編織布摩擦耗能以及編織布動能隨時間的變化。由圖中可發現雖編織布厚度已增加為三層，但由於速度高達 300m/s，當第一層編織布開始發生破壞的時間為 2 $\mu$ s，表示編織布接觸到鋼球之後立即

發生破壞，由圖 3.25(a)顯示鋼球速度不會立即達到平緩，直至三層編織布皆破壞使得鋼球穿透編織布後( $t=20\mu\text{s}$ )即會達到定速。而矩形等效模型與十字形等效模型在 300m/s 之速度衝擊下，圓球皆已穿透編織布且都能與全編織模型之曲線達到重合，與單層編織布之趨勢相同：兩個簡化模型皆能良好表現全編織模型之現象。若觀察圖 3.25(b)及圖 3.25(d)會發現編織布應變能與動能皆會在鋼球離開編織布後( $t=20\mu\text{s}$ )才開始趨近平緩並下降。

比較全編織模型與等效模型受 300m/s 鋼質圓球衝擊之變形圖如圖 3.26 所示，觀察時間間格為  $5\mu\text{s}$  之側向變形，由圖中編織布變形之趨勢發現由於衝擊速度較高，因此編織布受衝擊後很快就開始有破壞行為發生，導致編織布的側向變形範圍較小，因此矩形等效模型與十字形等效模型兩者之側向變形都與全編織模型差異不大，且觀察圖 3.25(c)亦會發現 300m/s 之速度撞擊之下編織布立即發生破壞，故摩擦耗能在破壞後的轉變行為不如受到 100m/s 之速度撞擊時明顯。最後觀察全編織模型與等效模型受 300m/s 圓球衝擊之主應力圖如圖 3.27 所示，圖中顯示時間  $10\mu\text{s}$  編織布開始發生穿透之前之主應力分布，可發現三個模型應力最大值都集中於撞擊區域，因此矩形等效模型與十字形等效模型的主應力分布皆能接近全編織模型，且主應力最大值差異亦不大。

接著比較三層全編織模型與簡化模型的運算時間，三層纖維編織布

模型運算時間比較如表 3.2 所示，首先可發現編織布增加為三層後，矩形等效模型與十字形等效模型與全編織模型相比都可減少將近 40% 至 60% 的運算時間，故簡化模型在本研究中確實達到減少計算量之效果，其中十字形等效模型不論受到 40m/s、100m/s 及 300m/s 之速度衝擊之下皆能與全編織模型之模擬結果達到一致。

### 3.5 實驗結果比較

根據單層及三層簡化等效纖維編織布的分析結果可整理發現，當編織布受衝擊的速度不足以使編織布本身立即發生破壞時，編織布會因衝擊而產生側向位移並延伸於邊界上，使得應力會集中於十字區域，因此十字形等效模型較能表示全編織模型受衝擊時之行為。然而，當編織布受到 300m/s 之速度衝擊時，由於圓球速度足以使得編織布受碰撞後立即發生破壞並且穿透編織布，導致編織布的側向位移都集中於撞擊區域而非延伸於邊界上，因此簡化模型只需保留近撞擊區域為實體編織元素即可表現全編織模型受衝擊之狀況，矩形等效模型與十字形等效模型皆能夠完整表現編織布受 300m/s 之速度衝擊之行為。

此外，Tan 等人[15]在衝擊實驗中觀察單層編織布受到半圓球形狀的彈頭衝擊後，紀錄纖維束斷裂以及鬆開滑移之數量，結果發現子彈速度愈高則纖維束斷裂數量愈多，而纖維束鬆開滑移之數量愈少。在本研究分析中亦可得到相同之趨勢：比較單層纖維編織布受到不同速度衝擊下，觀察

纖維束破壞情形與滑移現象如圖 3.28，首先由圖 3.28(a)發現單層編織布在受到 100m/s 之速度衝擊下水平方向及垂直方向纖維束斷裂數量分別為 1 束及 7 束，且纖維滑移情形非常明顯；由圖 3.28(b)觀察編織布在受到 300m/s 之速度衝擊下可發現水平方向及垂直方向纖維束斷裂數量分別為 3 束及 7 束，而滑移情形不明顯。

另一方面 Tan 等人[17]比較一層、兩層及四層纖維編織布受子彈衝擊時，子彈可穿透編織布之極限速度，結果發現四層編織布所需之衝擊速度較高，其次分別為兩層及一層編織布，本研究模擬單層及三層編織布亦可歸納出此結論：3.2.2 節中單層編織布在受到 100m/s 之速度衝擊下，纖維會發生破壞且圓球會完全穿透編織布；3.4.2 節中三層編織布在受到 100m/s 之速度衝擊下，只有第一層纖維會發生破壞而圓球會完全被編織布阻擋且達到靜止，因此由分析與實驗可觀察到相同趨勢，多層數編織布具有較好的抗彈能力。

## 第四章 結論與未來工作

### 4.1 結論

本研究經由有限元素法探討纖維編織布受衝擊後之行為，根據研究項目可分為兩大類，第一部分針對單層纖維編織布的材料以及幾何結構進行探討，第二部分利用單尺度混合元素分析模擬法針對簡化模型進行探討，並比較矩形等效模型及十字型等效模型之成效，可歸納出以下結論：

1. 根據等效單元體模擬纖維受剪應力之變形，計算出紗線尺度的編織布模型，隨著紗線厚度方向壓應力逐漸增加，其等效剪力模數會隨之增加，而增加纖維間的摩擦係數會使等效剪力模數提升。
2. 比較不同剪力模數的纖維編織布模型受衝擊時之行為，發現剪力模數較低的編織布受到鋼球衝擊後較晚發生破壞，變形量也會較大，卻能延遲阻擋衝擊的時間，使得抗彈能力較佳。
3. 當編織布纖維間摩擦係數分別為 0 及 0.5 時，編織布受衝擊後之行為。結果顯示，當纖維間摩擦力較大時，編織布受衝擊後較不易產生纖維滑移現象，而較容易減弱衝擊物之速度，因此其抗彈能力較佳。
4. 比較單跨距纖維編織布與雙跨距纖維編織布受衝擊之行為，由編織布變形歷程圖可明顯發現由於雙跨距編織布的纖維排列方式



較鬆散，因此受衝擊後纖維滑移之情形較單跨距編織布為明顯，因此抗彈效果也較差。

5. 比較單跨距纖維編織布在四邊固定、兩邊固定以及四邊無拘束三種不同邊界條件之下，受衝擊後編織布之行為。可發現邊界條件不同對於編織布受衝擊後之行為也有明顯之差異，受拘束方向的變形波傳遞較快；不受拘束方向的變形波傳遞較慢。而比較衝擊物在三種邊界條件下之餘速，結果顯示四邊固定之編織布對於抗彈能力較佳，其次為兩邊固定之編織布，而四邊無拘束之編織布抗彈能力最弱。
6. 在單層簡化模型方面：當編織布受衝擊的速度不足以使編織布本身立即發生破壞時，十字形等效模型較能表示全編織模型受衝擊時之行為。反之，當編織布受到衝擊的速度足以使得編織布受碰撞後立即發生破壞並且穿透編織布，矩形等效模型與十字形等效模型皆能夠完整表現編織布受 300m/s 之速度衝擊之行為。此外，鋼球在不同衝擊速度之下，編織布的破壞模式不同：受 100m/s 之速度衝擊的編織布纖維會先受鋼球撐開而斷裂，受 300m/s 之速度衝擊的編織布纖維會直接破壞。
7. 在三層簡化模型方面：當衝擊速度依然不足以使編織布發生破壞時，其結果與單層簡化模型相同，十字形等效模型較能表示全編



織模型受衝擊時之行為。當衝擊速度只會使部分編織布發生破壞但不穿透編織布時，編織布側向變形依然會傳至邊界上，故十字形等效模型與全編織模型衝擊之結果較一致，而發現編織布破壞時纖維束的拘束會減少導致纖維間較易產生滑移，因此摩擦耗能會大幅提升。最後當編織布在受到 300m/s 之速度衝擊之下，編織布受碰撞後立即發生破壞，矩形等效模型與十字形等效模型依然能夠完整表現編織布受衝擊之行為。

8. 比較單層及三層編織布模擬運算時間，利用簡化模型可減少 40~50% 的運算時間，在本研究中達到節省運算量並能取代全編織模型之效果。

## 4.2 未來工作

本研究已透過有限元素模擬，探討纖維編織布受衝擊之行為以及簡化模型之比較，對於抗彈部的衝擊模擬尚有其他部分可進行深入探討：

1. 根據剪力模數與纖維間摩擦係數對於抗彈能力之影響，由 2.2 節結果發現摩擦係數愈小會使纖維束剪力模數減低，而編織布的抗彈能力愈佳。但由 2.3 節結果發現纖維束之間的纖維間摩擦係數愈大抗彈能力愈佳，兩參數對於編織布受衝擊之行為互相矛盾，因此未來可對於剪力模數與纖維間摩擦係數進行最佳化分析，探討最佳抗衝擊能力之編織布。此外，本研究對於編織布摩擦係數

的影響，尚未考慮纖維束有破壞行為發生，因此未來將加入破壞準則繼續探討纖維編織布摩擦係數對於抗彈能力的影響。

2. 目前所探討纖維編織布受衝擊後之行為，皆尚未考慮溫度變化對於編織布結構造成的影響，未來將考慮衝擊過程中所造成熱傳現象以及摩擦生熱對於抗彈能力的影響。
3. 對於多層纖維編織布的探討，本研究探討的編織布厚度方向為同相位之排列方式，但實際編織布並非同相位排列，若厚度方向排列方式有錯位情形，其受衝擊後可能會有所差異。故未來將探討不同錯位排列之編織布受衝擊的行為，並與同相位排列的編織布做為比較。另一方面，本研究探討的編織布疊層皆為同角度，未來可分析不同疊層角度的編織布受衝擊之行為。
4. 防彈衣之材料並非全由纖維編織布所組成，現實中亦有其他幾何形狀之抗彈布，未來將探討其他非編織結構的抗彈布受衝擊之行為，例如單方向纖維布，並探討單方向纖維布角度排列對於抵抗子彈衝擊能力之影響。
5. 綜合上述兩點，編織布與單方向纖維布對於抵抗衝擊能力之機制可能有所差異，未來將分析比較兩纖維布之優缺點，並綜合兩種纖維布組成不同排列形式之抗彈布，比較並求得最佳抗衝擊能力之防彈衣結構。

## 參考文獻

- [1] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti, and B. Cheeseman, "Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, pp. 996-1012, 2005.
- [2] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti, B. Cheeseman, and B. Powers, "A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 1299-1312, 2006.
- [3] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti, and B. Cheeseman, "Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric," *Composite Structures*, vol. 68, pp. 331-337, 2005.
- [4] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti, and B. Powers, "Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 48, pp. 33-43, 2006.
- [5] H. Talebi, S. Wong, and A. Hamouda, "Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric," *Composite Structures*, vol. 87, pp. 314-320, 2009.
- [6] M. Grujicic, G. Arakere, T. He, M. Gogulapati, and B. Cheeseman, "A numerical investigation of the influence of yarn-level finite-element model on energy absorption by a flexible-fabric armour during ballistic impact," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 222, 2008.
- [7] G. Nilakantan, M. Keefe, T. A. Bogetti, and J. W. Gillespie, "Multiscale modeling of the impact of textile fabrics based on hybrid element analysis," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 1056-1071, 2010.

- [8] M. Rao, M. Keefe, B. Powers, and T. Bogetti, "A Simple Global/Local Approach to Modeling Ballistic Impact onto Woven Fabrics," in *Proceedings of the tenth international LS-DYNA users conference, Dearborn, MI, USA, June 8-10, 2008*.
- [9] R. Barauskas and A. Abraitienė, "Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34, pp. 1286-1305, 2007.
- [10] G. Nilakantan, M. Keefe, T. A. Bogetti, R. Adkinson, and J. W. Gillespie, "On the finite element analysis of woven fabric impact using multiscale modeling techniques," *International journal of solids and structures*, vol. 47, pp. 2300-2315, 2010.
- [11] G. Nilakantan, M. Keefe, J. W. Gillespie Jr, and T. Bogetti, "Novel multi-scale modeling of woven fabrics for use in impact studies," in *Proceedings of the tenth international LS-DYNA users conference, Dearborn, MI, USA, June 8-10, 2008*.
- [12] C. Ha-Minh, T. Kanit, F. Boussu, and A. Imad, "Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact," *Computational Materials Science*, vol. 50, pp. 2172-2184, 2011.
- [13] S. Chocron, E. Figueroa, N. King, T. Kirchdoerfer, A. E. Nicholls, E. Sagebiel, C. Weiss, and C. J. Freitas, "Modeling and validation of full fabric targets under ballistic impact," *Composites science and technology*, vol. 70, pp. 2012-2022, 2010.
- [14] S. Gogineni, X. L. Gao, N. David, and J. Zheng, "Ballistic Impact of Twaron CT709® Plain Weave Fabrics," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 19, pp. 441-452, 2012.
- [15] V. Tan, C. Lim, and C. Cheong, "Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 28, pp. 207-222, 2003.

- [16] M. Rao, Y. Duan, M. Keefe, B. Powers, and T. Bogetti, "Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric," *Composite Structures*, vol. 89, pp. 556-566, 2009.
- [17] V. Tan, T. Tay, and W. Teo, "Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions," *International journal of solids and structures*, vol. 42, pp. 1561-1576, 2005.
- [18] Z. Dong and C. Sun, "Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, pp. 1863-1869, 2009.
- [19] J. O. Hallquist, "LS-DYNA theory manual," *Livermore Software Technology Corporation*, vol. 3, 2006.
- [20] 黃鐳迪, "薄殼產品落地試驗之研究," 私立中原大學機械工程研究所論文, 2003.
- [21] "ANSYS® Academic Research, Release 13.0, Help system," 2010.
- [22] K. Searles, G. Odegard, and M. Kumosa, "Micro-and mesomechanics of 8-harness satin woven fabric composites: I—evaluation of elastic behavior," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, pp. 1627-1655, 2001.
- [23] 尚曉江;蘇建宇;王化鋒, *ANSYS/LSDYNA 動力分析方法與工程實例* 2 nd ed. 北京: 中國水利水電出版社, 2008.
- [24] 孫宏華, "考慮土壤液化機制下震波傳遞之行為與槽溝隔振數值模擬," 國立中山大學海洋環境及工程研究所論文, 2004.

## 附表

表 2.1 纖維之材料常數[10]

| 楊氏模數       | 波松比   | 密度                             | 剪力模數       |
|------------|-------|--------------------------------|------------|
| E<br>(GPa) | $\nu$ | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | G<br>(GPa) |
| 62         | 0     | 1310                           | 31         |



表 2.2 編織布之幾何參數[10]

| 跨度           | 寬度            | 厚度                |
|--------------|---------------|-------------------|
| Span<br>(mm) | Width<br>(mm) | Thickness<br>(mm) |
| 0.747        | 0.536         | 0.115             |



表 2.3 編織布之材料常數[10]

| 楊氏模數              |                   |                   | 剪力模數              |                   |                   | 波松比        |            |            | 密度                             |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|------------|--------------------------------|
| $E_{11}$<br>(GPa) | $E_{22}$<br>(GPa) | $E_{33}$<br>(GPa) | $G_{12}$<br>(GPa) | $G_{13}$<br>(GPa) | $G_{23}$<br>(GPa) | $\nu_{12}$ | $\nu_{13}$ | $\nu_{23}$ | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 62                | 0.62              | 0.62              | 0.328             | 0.328             | 0.328             | 0          | 0          | 0          | 1310                           |

表 2.4 鋼質圓球之材料常數

| 楊氏模數       | 波松比   | 密度                             |
|------------|-------|--------------------------------|
| E<br>(GPa) | $\nu$ | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 200        | 0.32  | 7038                           |

表 2.5 雙跨距編織布之幾何參數

| 跨度           | 寬度            | 厚度                |
|--------------|---------------|-------------------|
| Span<br>(mm) | Width<br>(mm) | Thickness<br>(mm) |
| 1.494        | 0.536         | 0.115             |

表 2.6 編織布元素數量收斂性





| 纖維束截面網格   | 編織布元素數量 | 鋼球穿透編織布後之餘速 |
|---|---------|-------------|
|   | (個)     | (m/s)       |
|    | 115,368 | 83.85       |
|    | 173,052 | 83.91       |
|    | 230,736 | 84.05       |
|  | 288,420 | 84.06       |

表 2.7 比較不同邊界條件編織布受衝擊後圓球之末速度( $t=80\mu\text{s}$ )

| 圓球初速度               | 圓球末速度(m/s) |      |       |
|---------------------|------------|------|-------|
|                     | 四邊固定       | 兩邊固定 | 四邊無拘束 |
| $V_0=100\text{m/s}$ | 51.9       | 75.9 | 90.6  |

表 3.1 等效模型之幾何參數與材料參數

| 等效模型 – 均質薄殼元素                |                              |                           |       |                          |   |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------|--------------------------|---|
| $E_{xx\text{-eff}}$<br>(GPa) | $E_{yy\text{-eff}}$<br>(GPa) | $G_{\text{eff}}$<br>(GPa) | $\nu$ | $t_{\text{eff}}$<br>(mm) | $\rho_{\text{eff}}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 8.87                         | 0.62                         | 0.328                     | 0     | 0.23                     | 745   |



表 3.2 單層及三層纖維編織布模型運算時間比較

| 編織布模型   | 運算時間(hr.) |        |        |       |        |        |
|---------|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|
|         | 單層        |        |        | 三層    |        |        |
|         | 鋼球初速      |        |        | 鋼球初速  |        |        |
|         | 40m/s     | 100m/s | 300m/s | 40m/s | 100m/s | 300m/s |
| 全編織模型   | 3.1       | 0.9    | 0.3    | 50.0  | 34.0   | 8.8    |
| 矩形等效模型  | 1.5       | 0.5    | 0.2    | 22.1  | 20.9   | 3.4    |
| 十字形等效模型 | 1.8       | 0.6    | 0.2    | 26.8  | 21.2   | 4.7    |

## 附圖

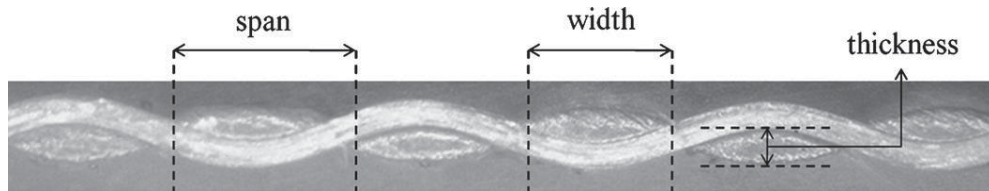


圖 2.1 平織布橫截面之顯微照片圖[10]

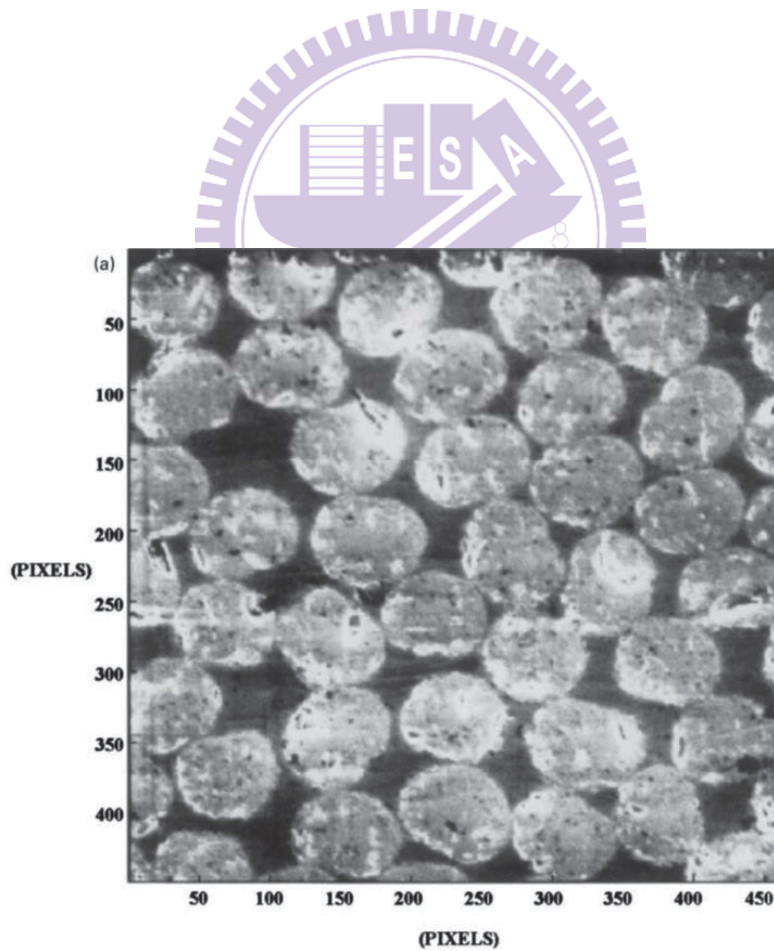


圖 2.2 編織布纖維束截面圖[22]

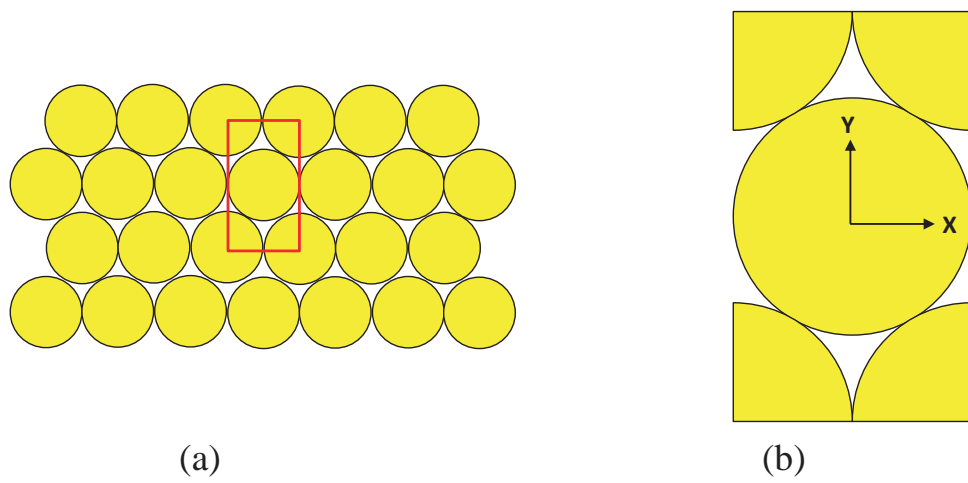


圖 2.3 編織布纖維束截面 (a)纖維排列情形(b)代表性單元體

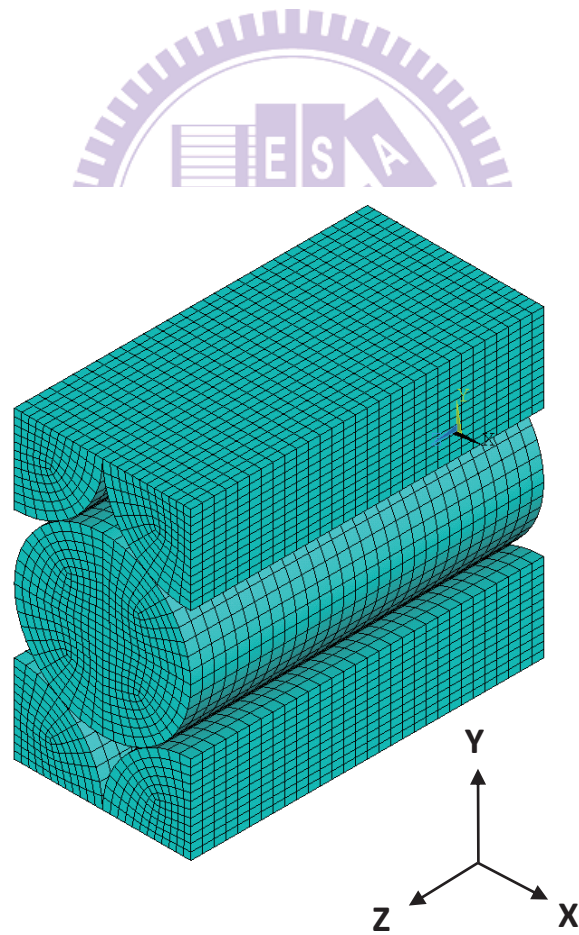


圖 2.4 編織布纖維之代表性單元體有限元素模型

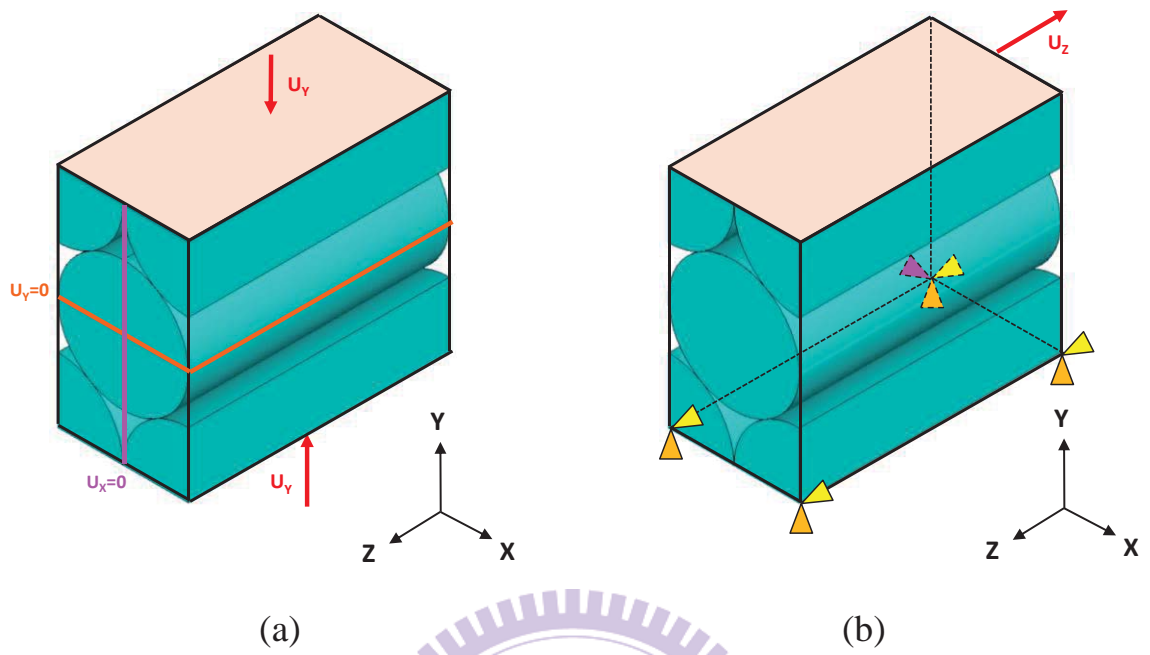


圖 2.5 編織布纖維代表性單元體之邊界條件設定

(a) 第一步驟 (b) 第二步驟

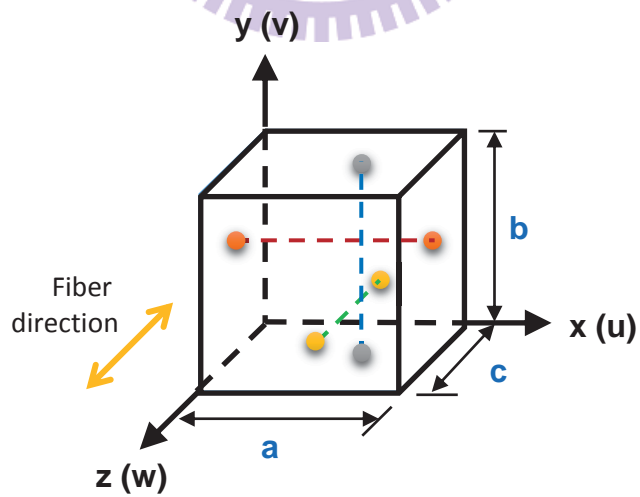


圖 2.6 代表性單元體的座標系統及尺寸示意圖



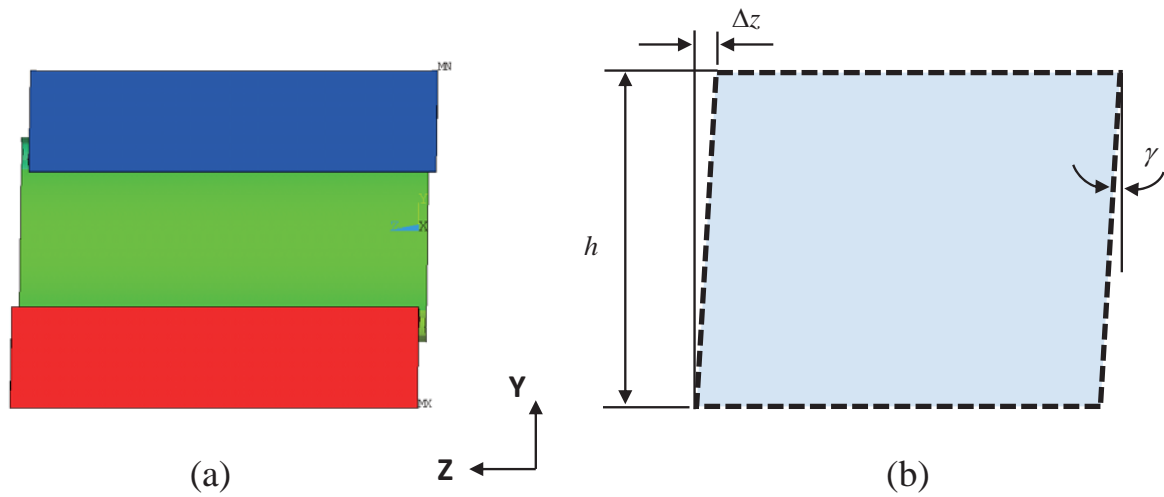


圖 2.7 代表性單元體模型之側視圖(a)節點Z方向位移分布 (b)簡化側

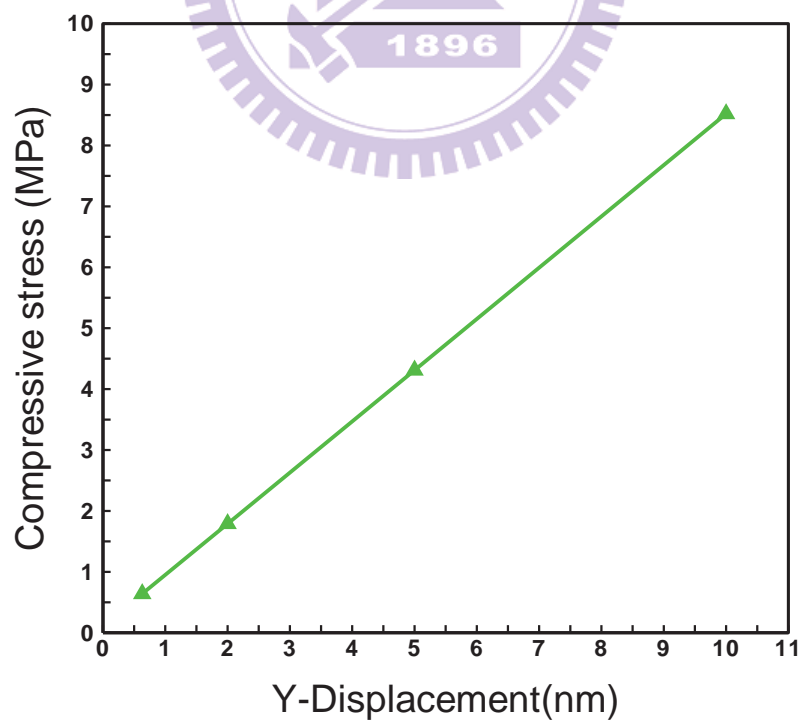


圖 2.8 代表性單元體壓應力與壓縮位移之關係圖

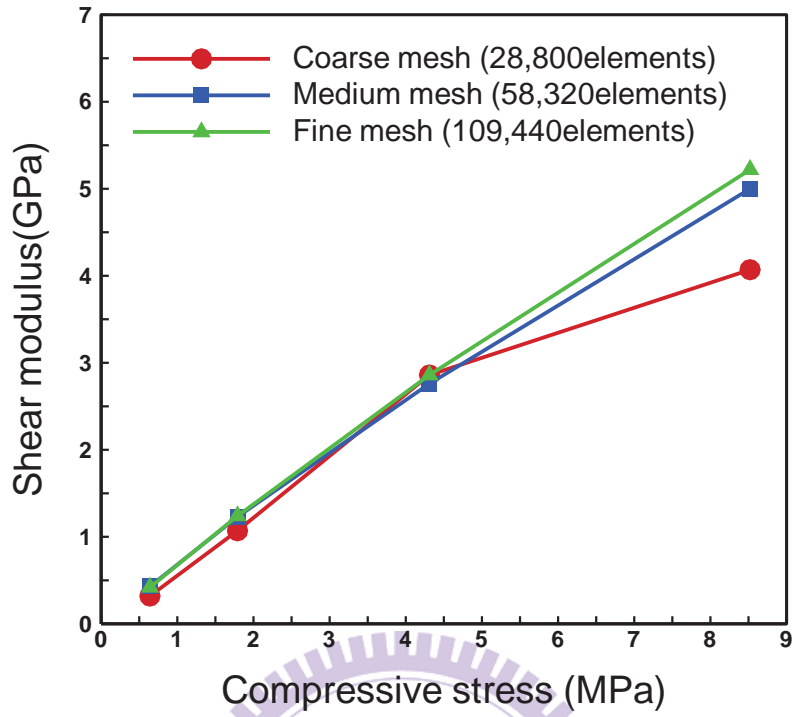


圖 2.9 代表性單元體等效剪力模數與壓應力之關係圖

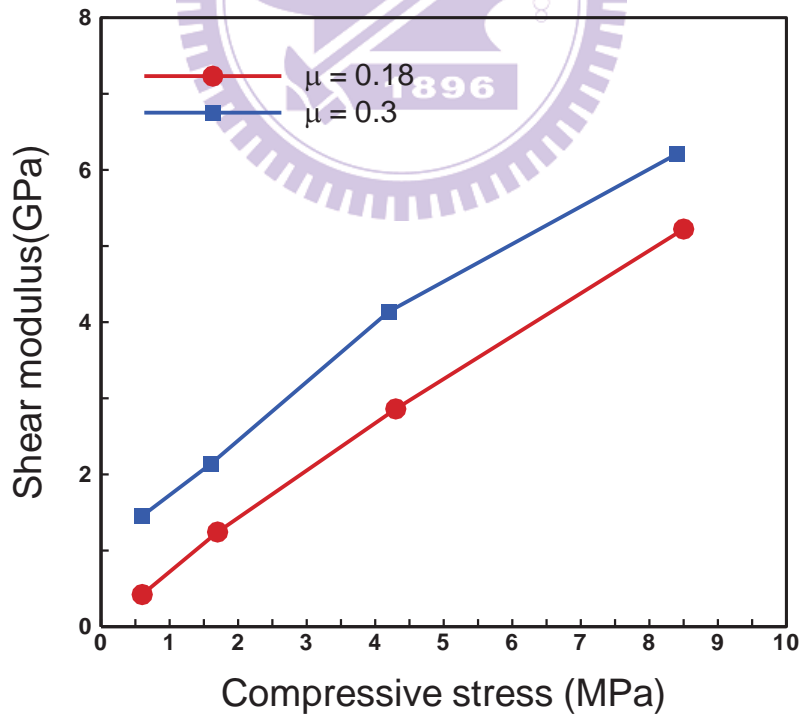


圖 2.10 不同摩擦係數下，等效剪力模數與壓應力之關係圖

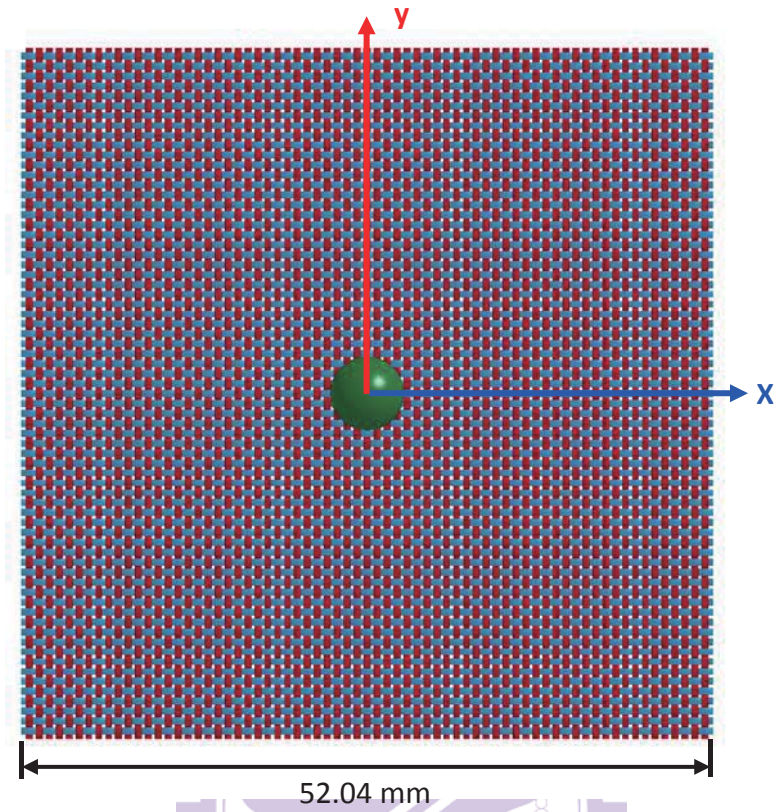


圖 2.11 鋼球撞擊單層編織布初始狀態之幾何模型

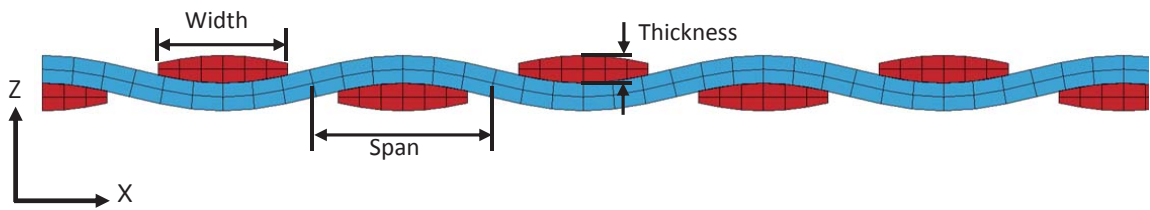


圖 2.12 纖維編織布有限元素模型之橫截面

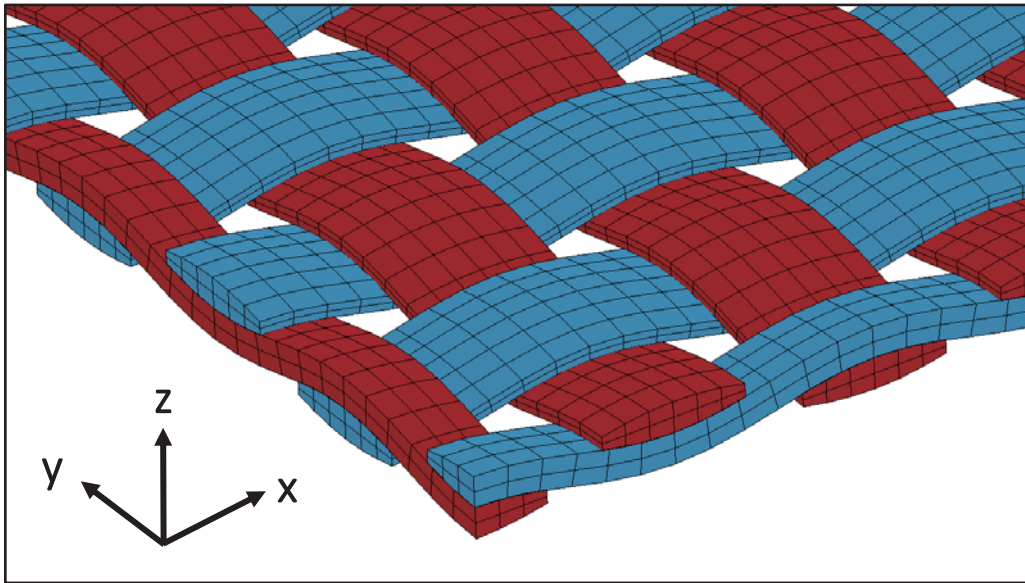


圖 2.13 單層編織布有限元素模型

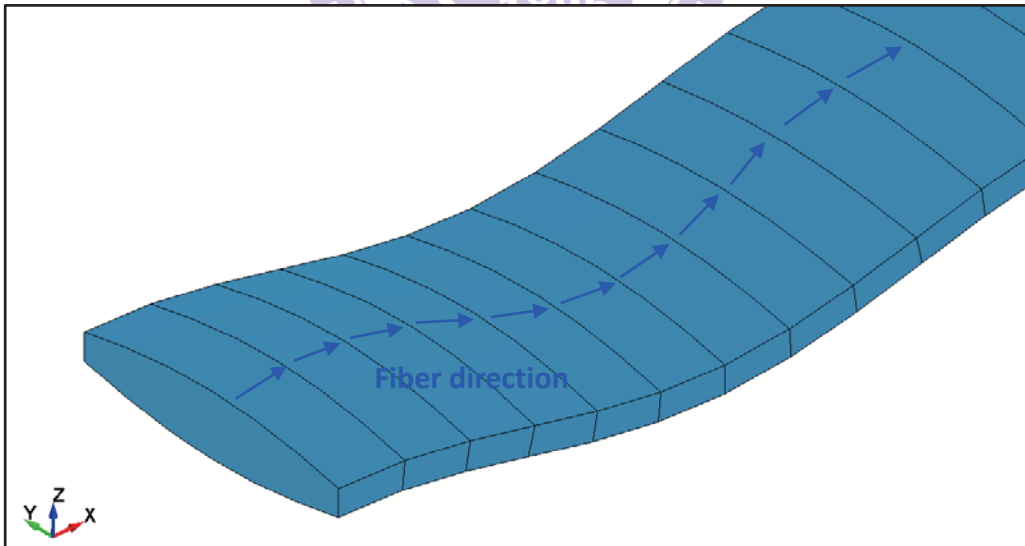


圖 2.14 纖維束之元素座標方向

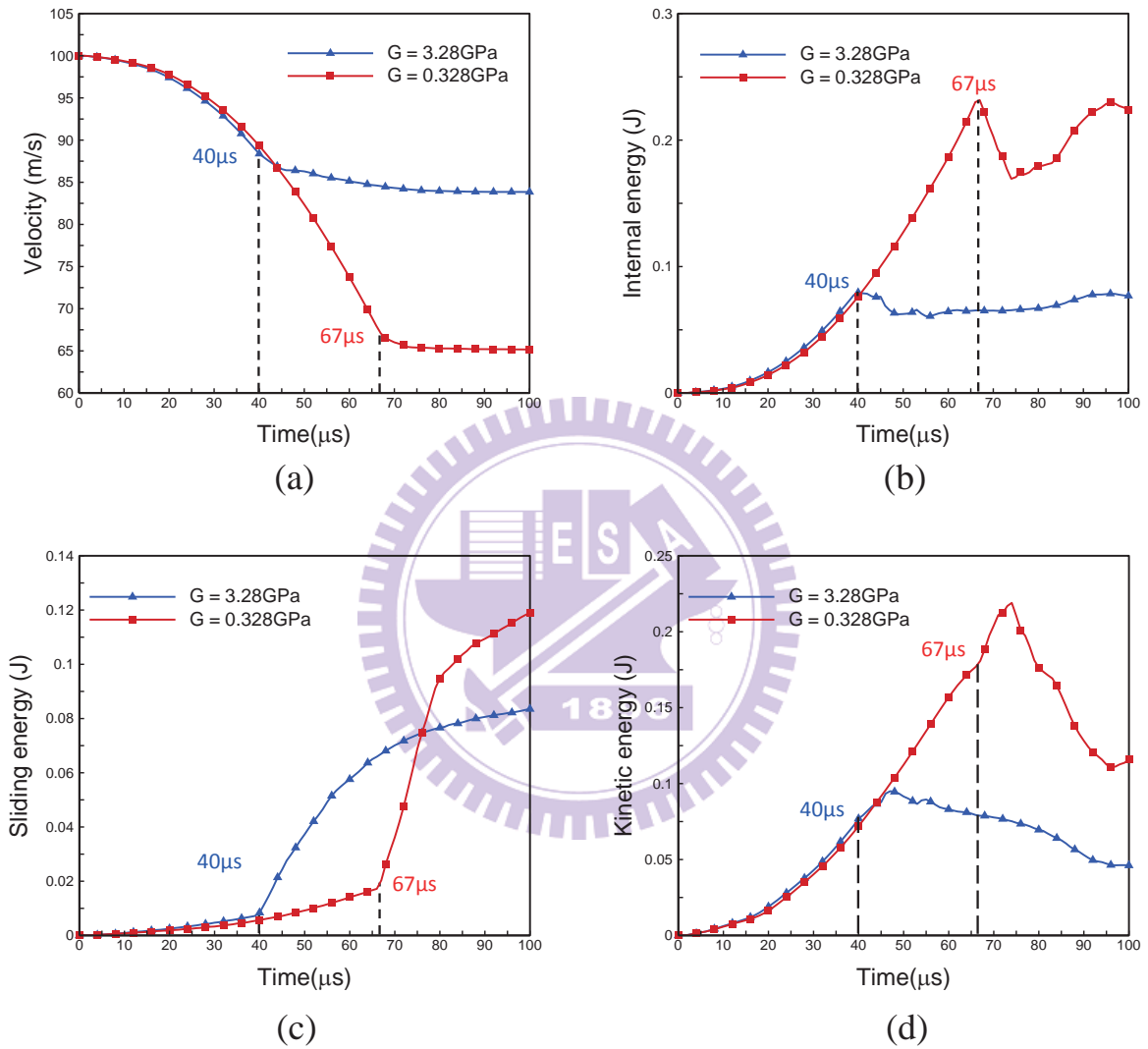


圖 2.15 不同剪力模數的纖維編織布受衝擊後(a)圓球之速度歷程 (b)編織布應變能變化(c)編織布摩擦耗能變化 (d)編織布動能變化



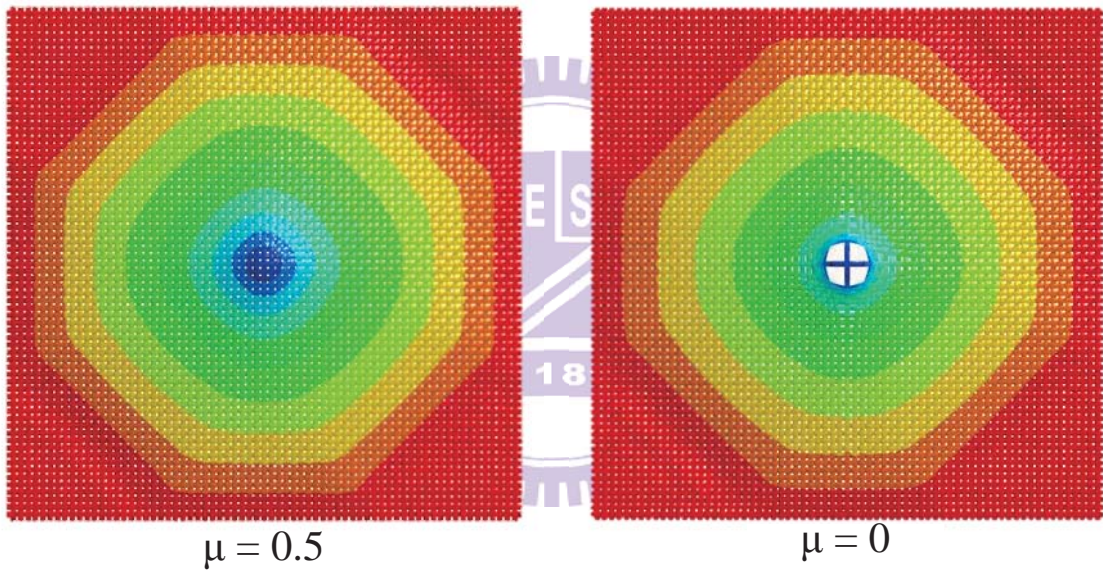


圖 2.16 比較編織布四邊固定時纖維摩擦係數之變形圖( $t=80\mu s$ )

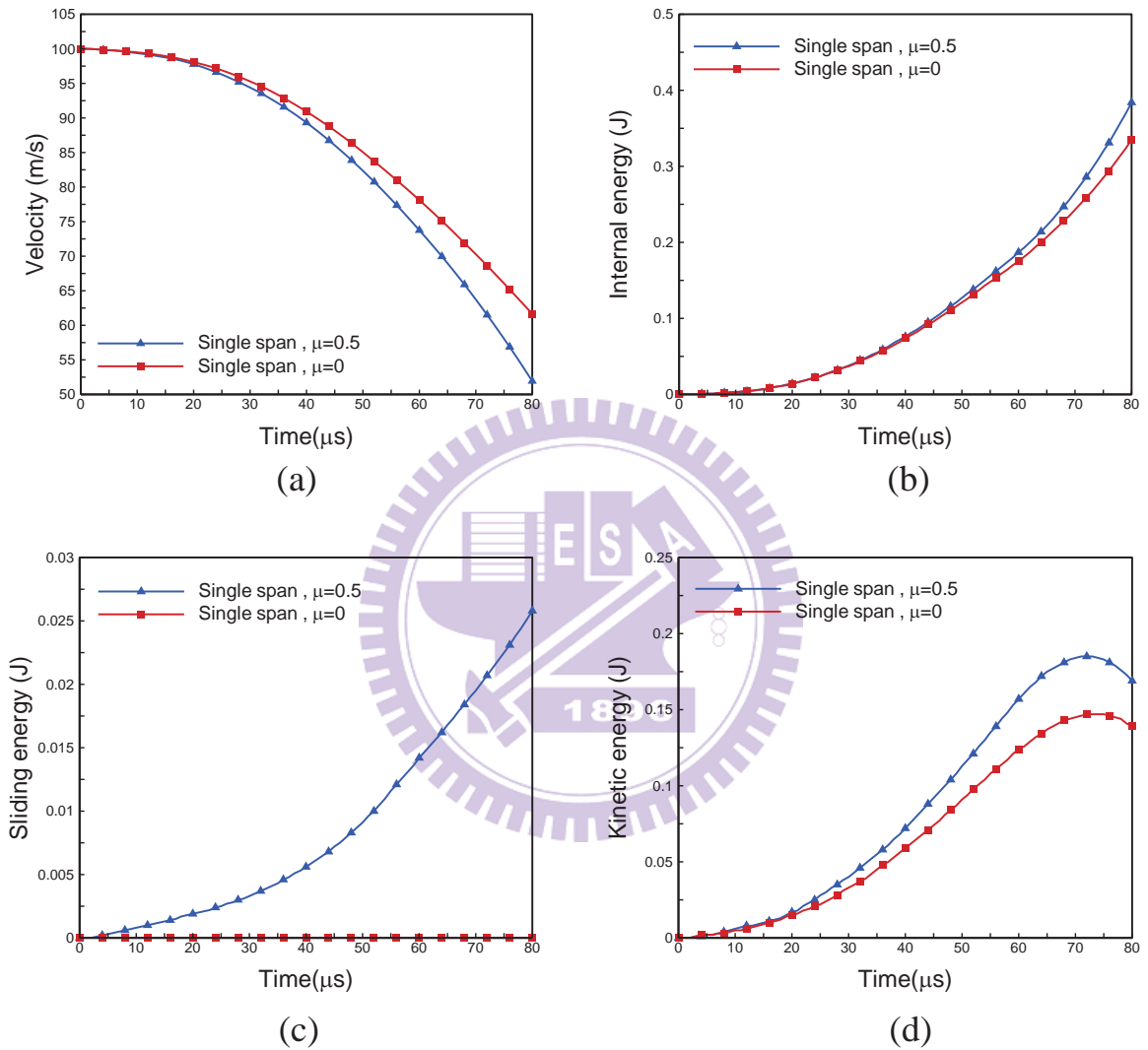


圖 2.17 不同摩擦係數的纖維編織布受衝擊後(a)圓球之速度歷程 (b)編織布應變能變化(c)編織布摩擦耗能變化 (d)編織布動能變化

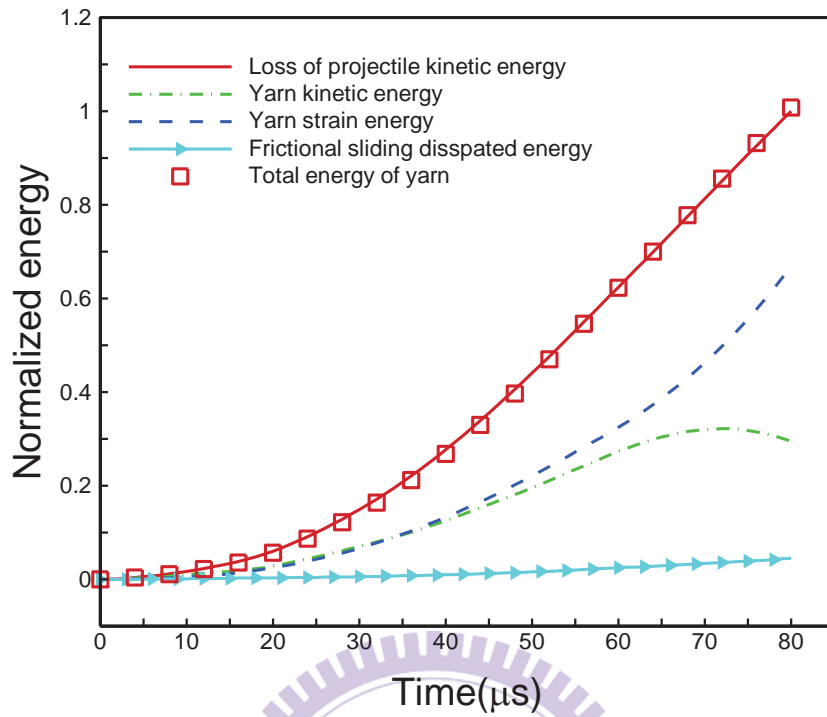


圖 2.18 編織布四邊固定受衝擊時能量轉移曲線圖， $\mu=0.5$

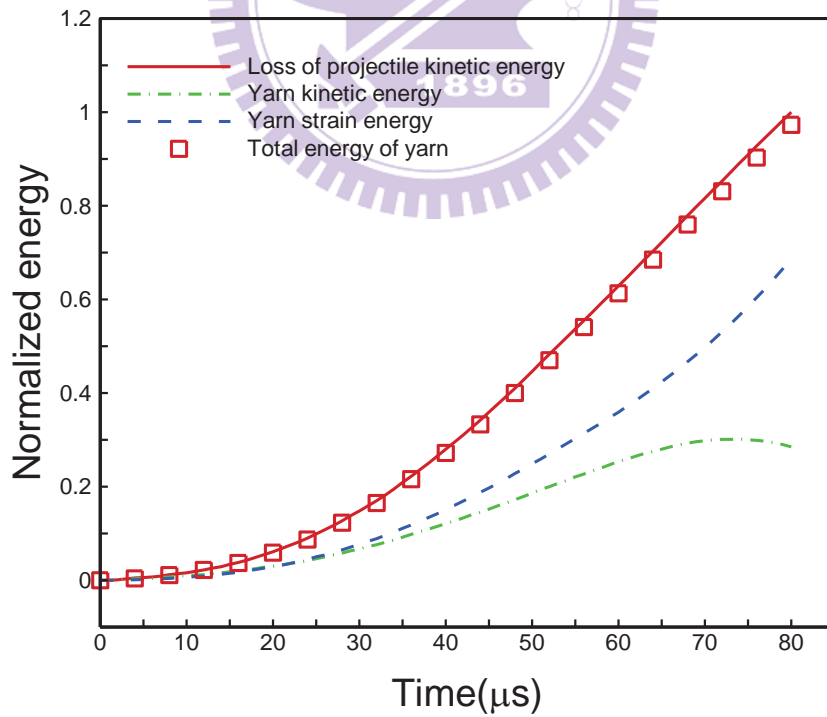


圖 2.19 編織布四邊固定受衝擊時能量轉移曲線圖， $\mu=0$

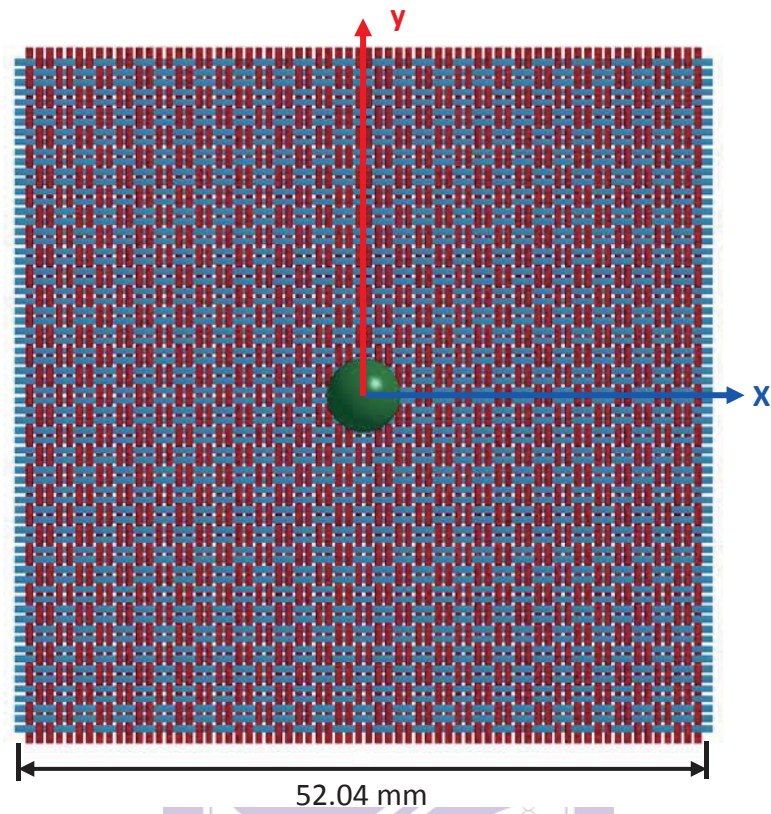


圖 2.20 鋼球撞擊單層雙跨距編織布初始狀態之幾何模型

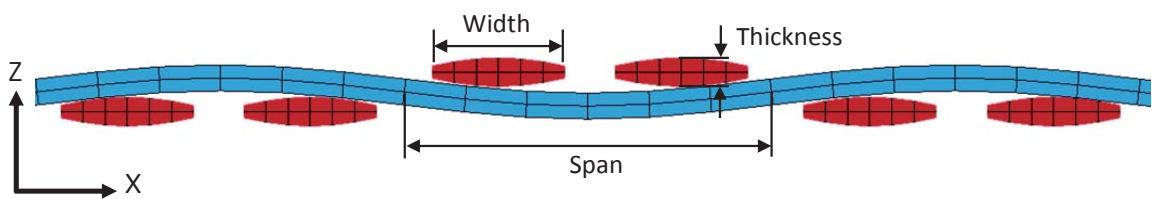


圖 2.21 雙跨距平織布有限元素模型之橫截面



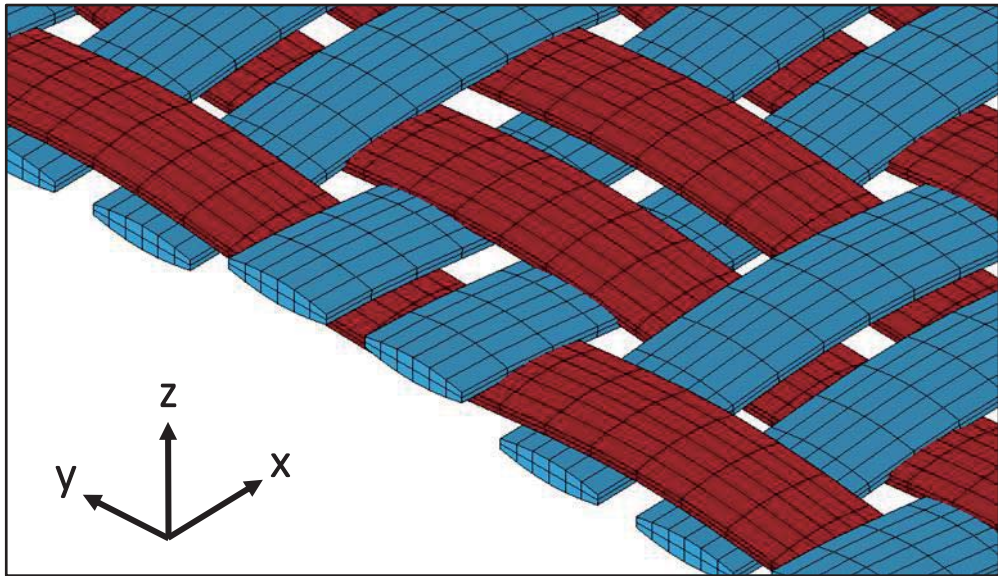


圖 2.22 單層雙跨距編織布有限元素模型

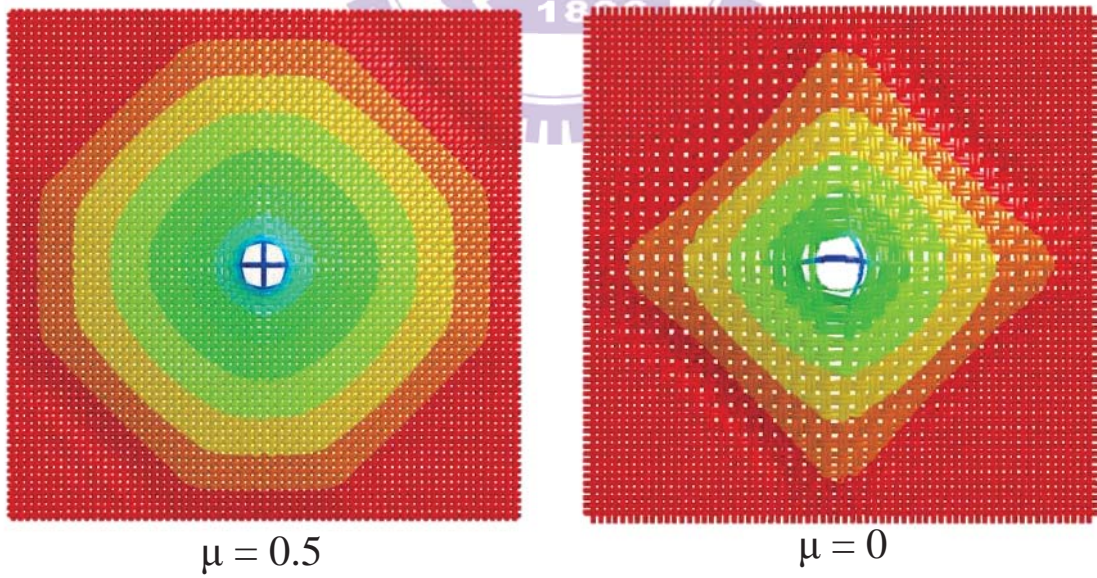


圖 2.23 比較雙跨距編織布四邊固定時纖維摩擦係數之變形圖( $t=80\mu s$ )



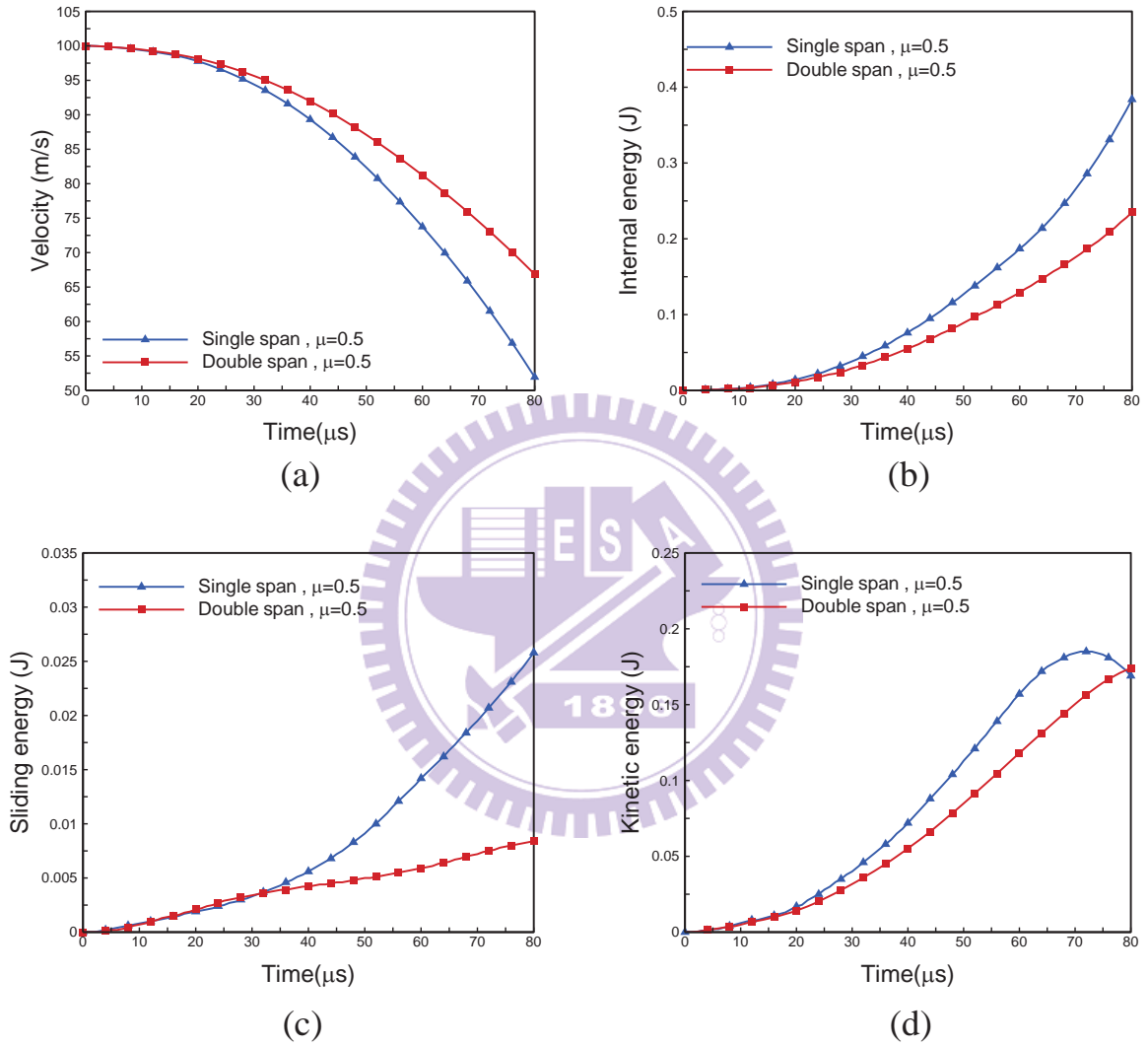


圖 2.24 不同跨距的纖維編織布受衝擊後(a)圓球之速度歷程 (b)編織布應變能變化(c)編織布摩擦耗能變化 (d)編織布動能變化

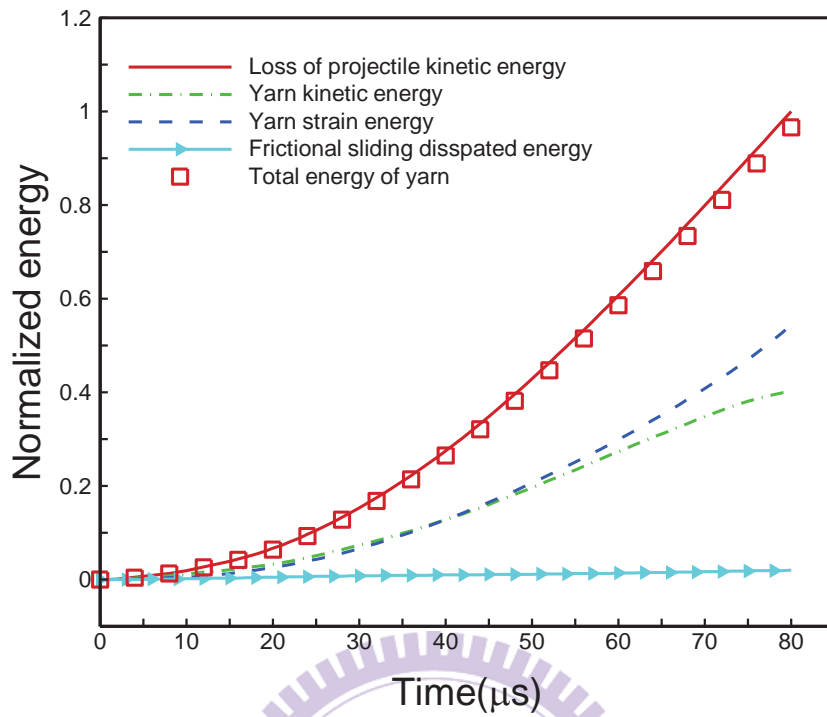


圖 2.25 雙跨距編織布四邊固定受衝擊時能量轉移曲線圖， $\mu_{y-y}=0.5$

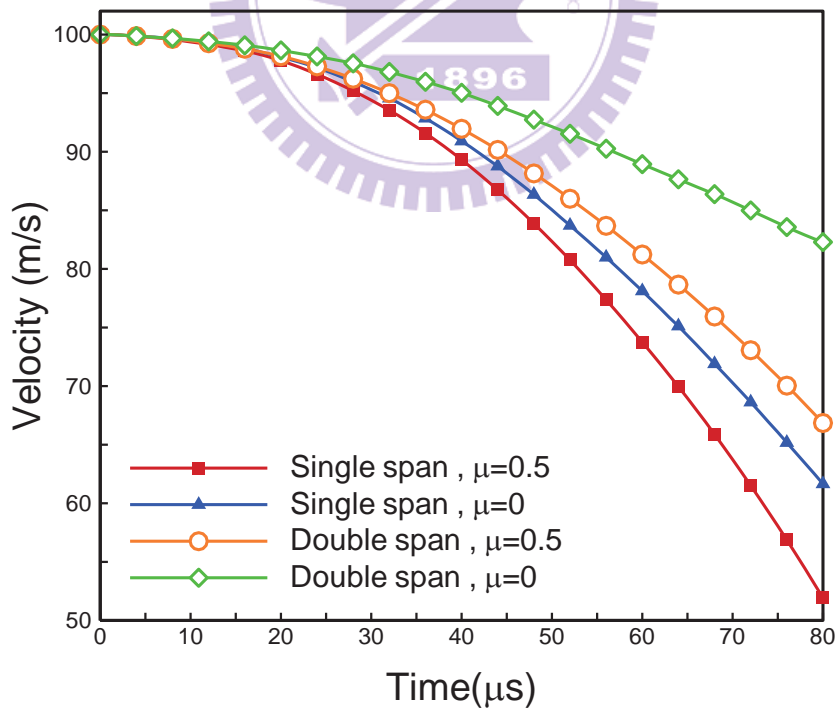


圖 2.26 比較跨距及摩擦力對於鋼球之速度-時間歷程

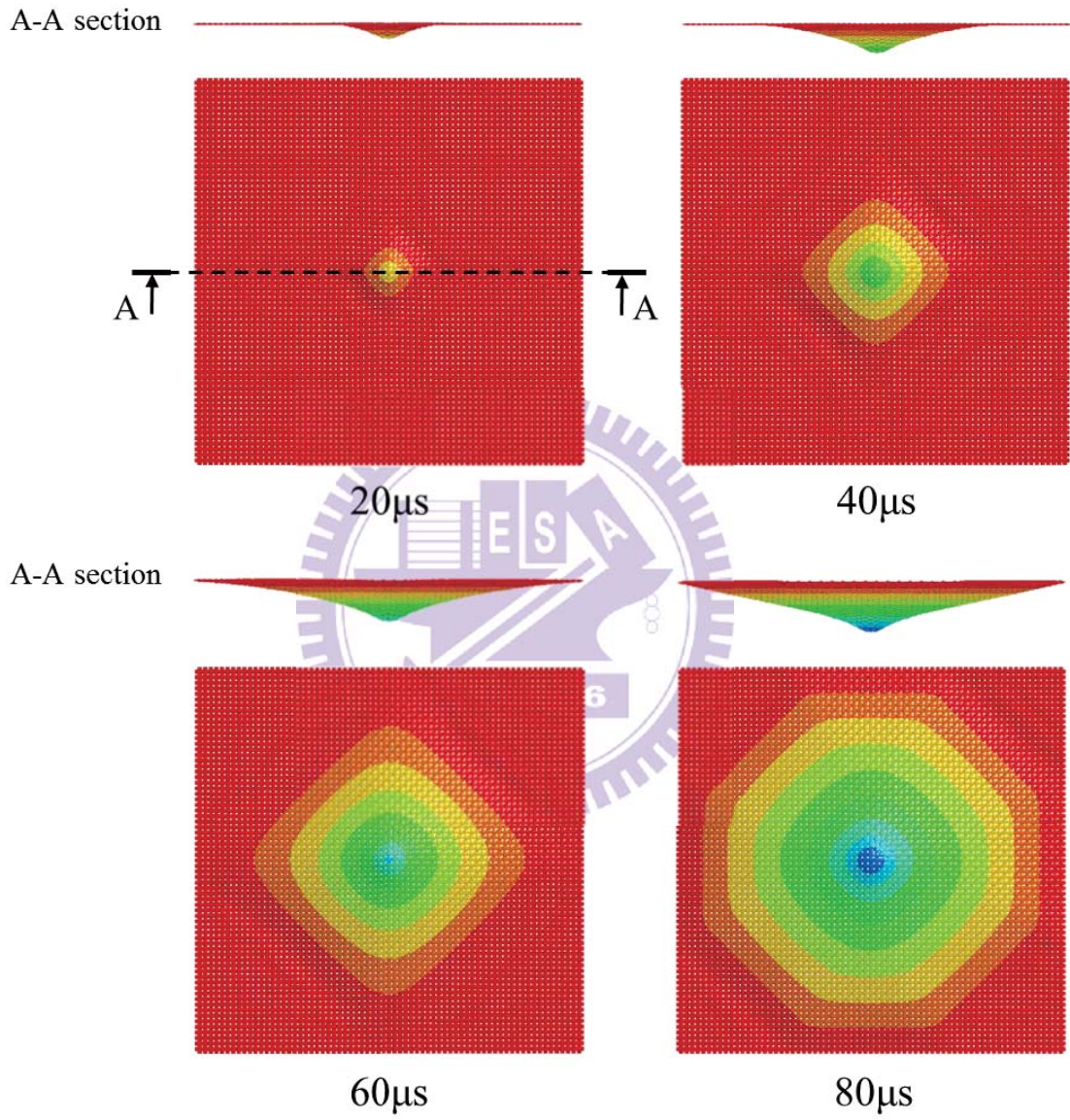


圖 2.27 編織布四邊固定受衝擊之側視圖及下視圖， $\mu_{y-y} = 0.5$

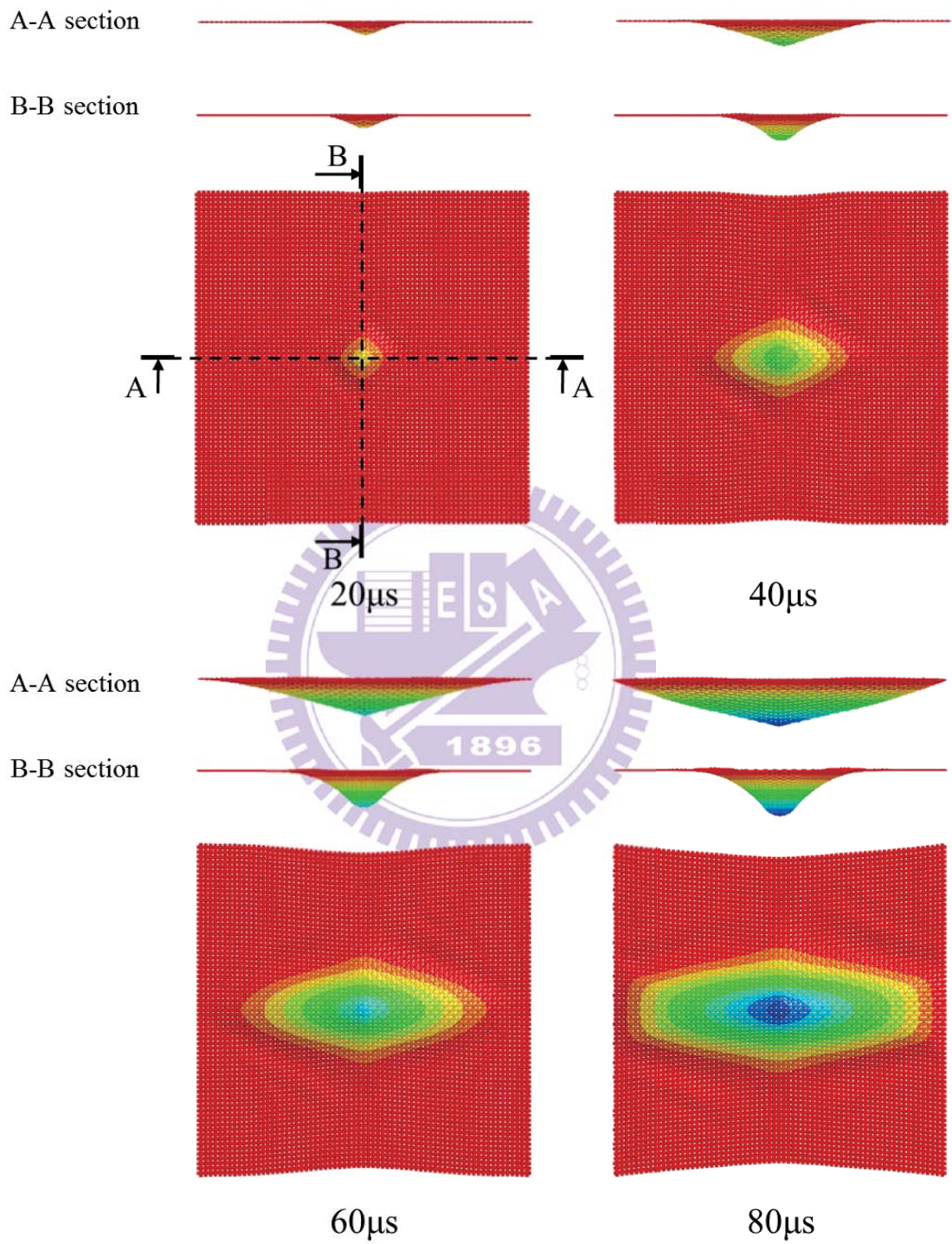


圖 2.28 編織布兩邊固定受衝擊之側視圖及下視圖， $\mu=0.5$



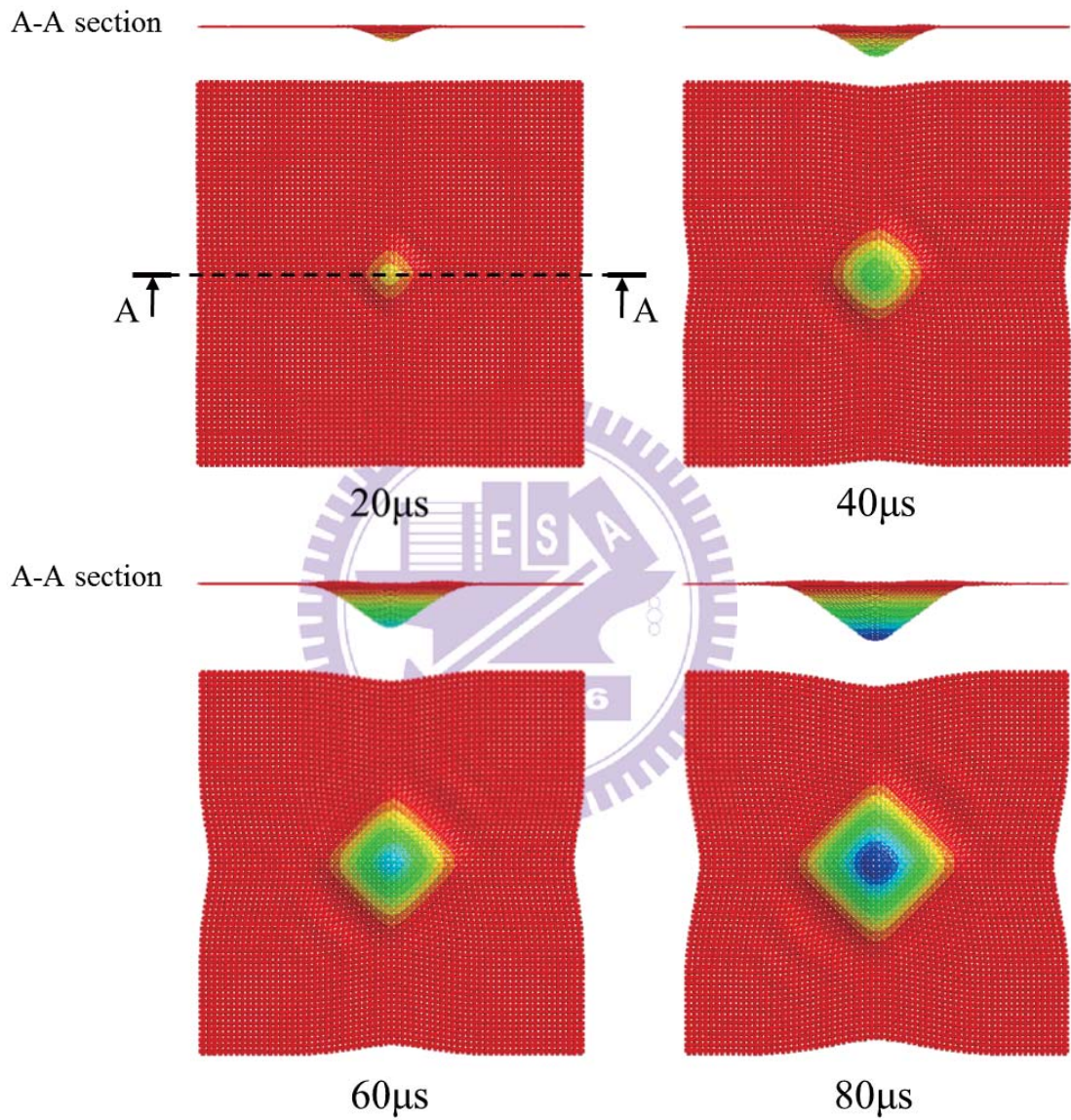


圖 2.29 編織布四邊無拘束受衝擊之側視圖及下視圖， $\mu=0.5$



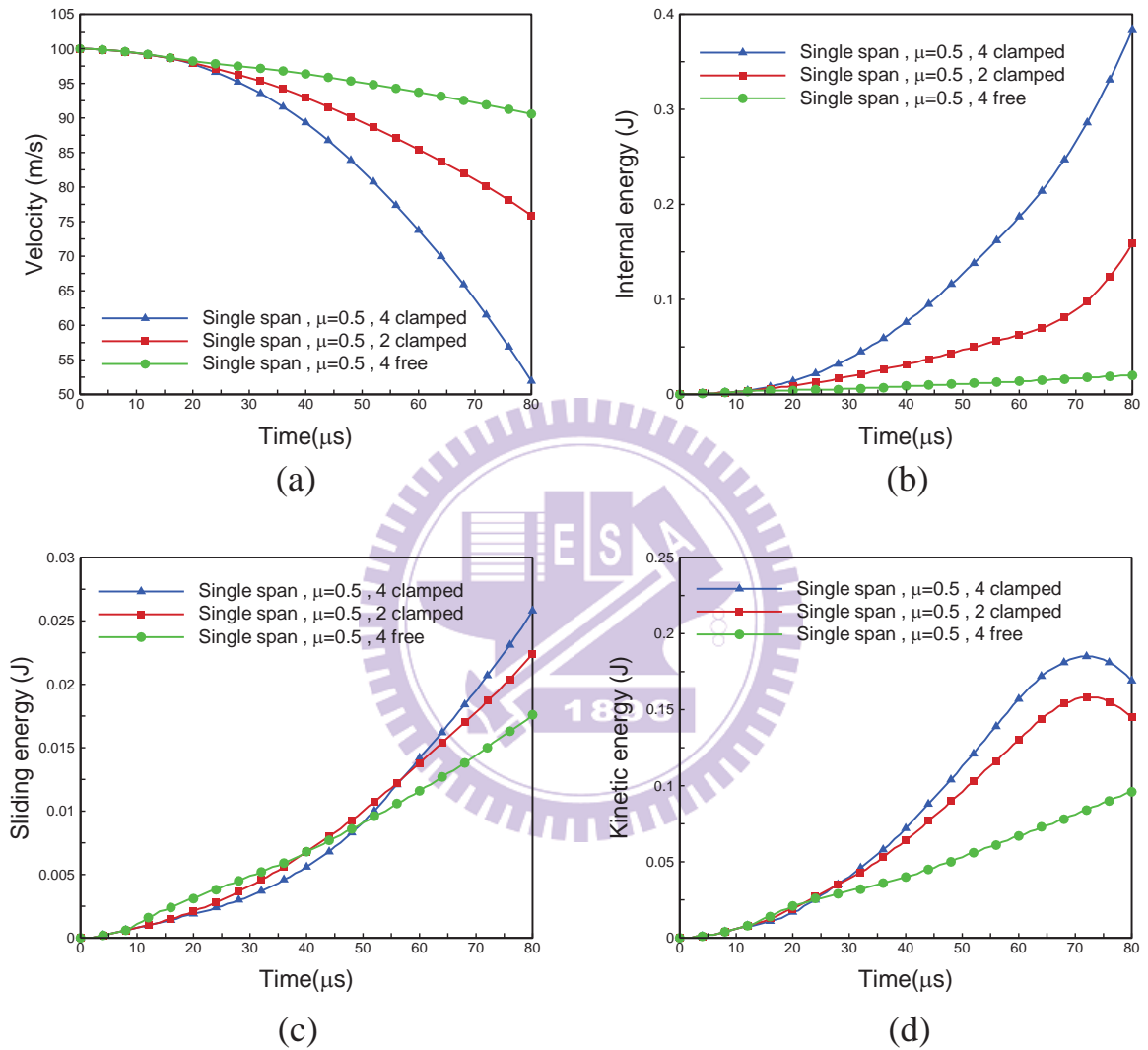


圖 2.30 不同邊界條件的纖維編織布受衝擊後(a)圓球之速度歷程 (b)編織布應變能變化(c)編織布摩擦耗能變化 (d)編織布動能變化

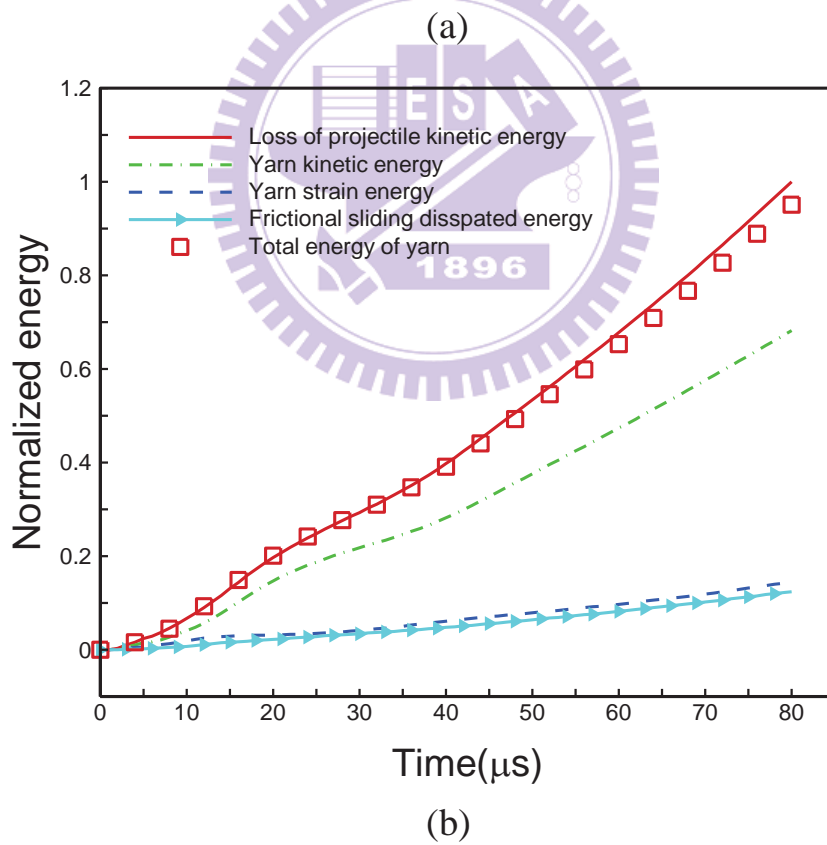
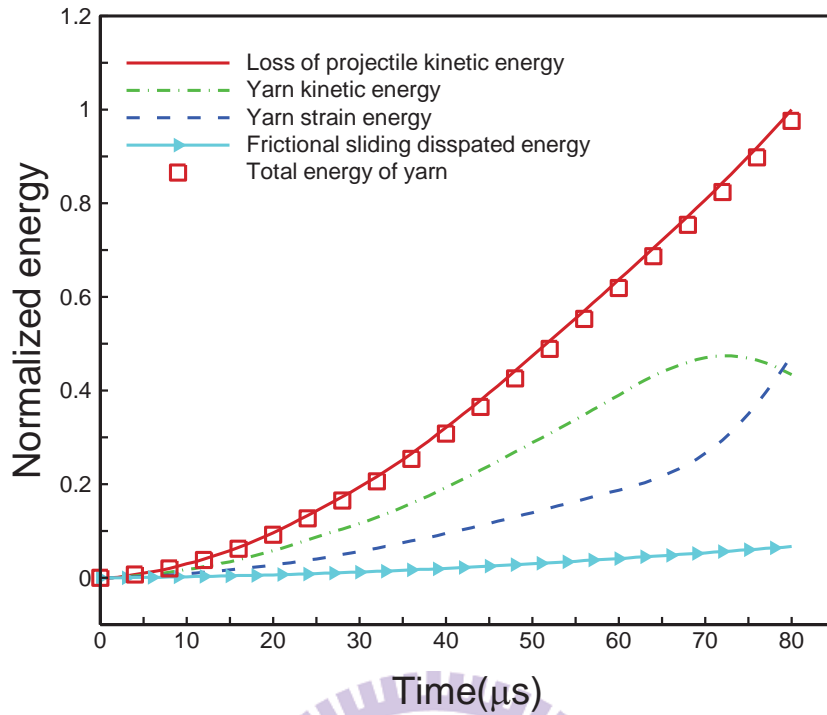


圖 2.31 編織布受衝擊時能量轉移曲線圖(a)編織布兩邊固定 (b)編織布

四邊無拘束

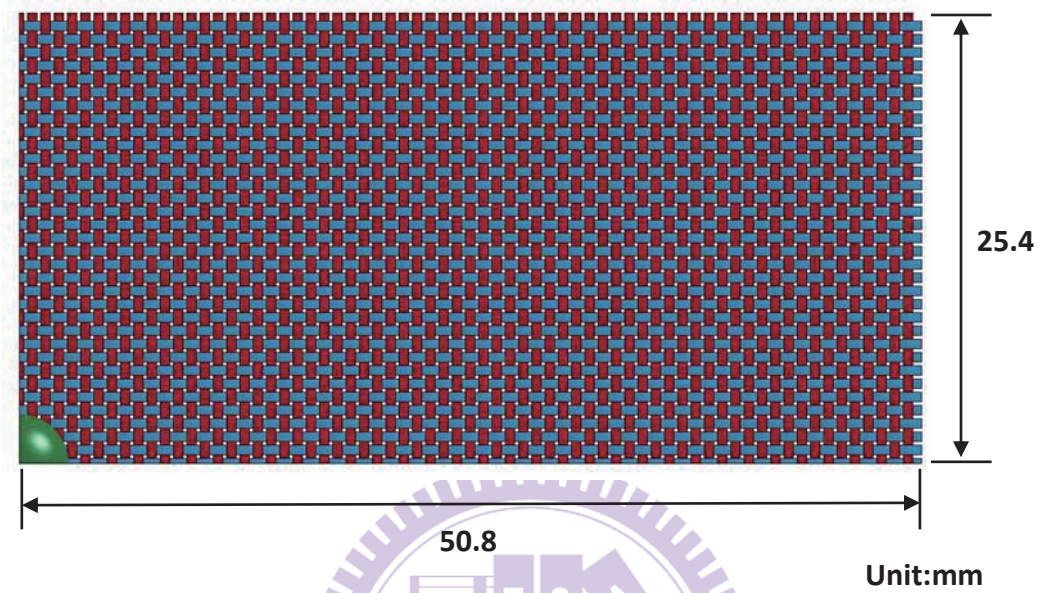


圖 3.1 全編織實體元素模型上視圖(四分之一模型)

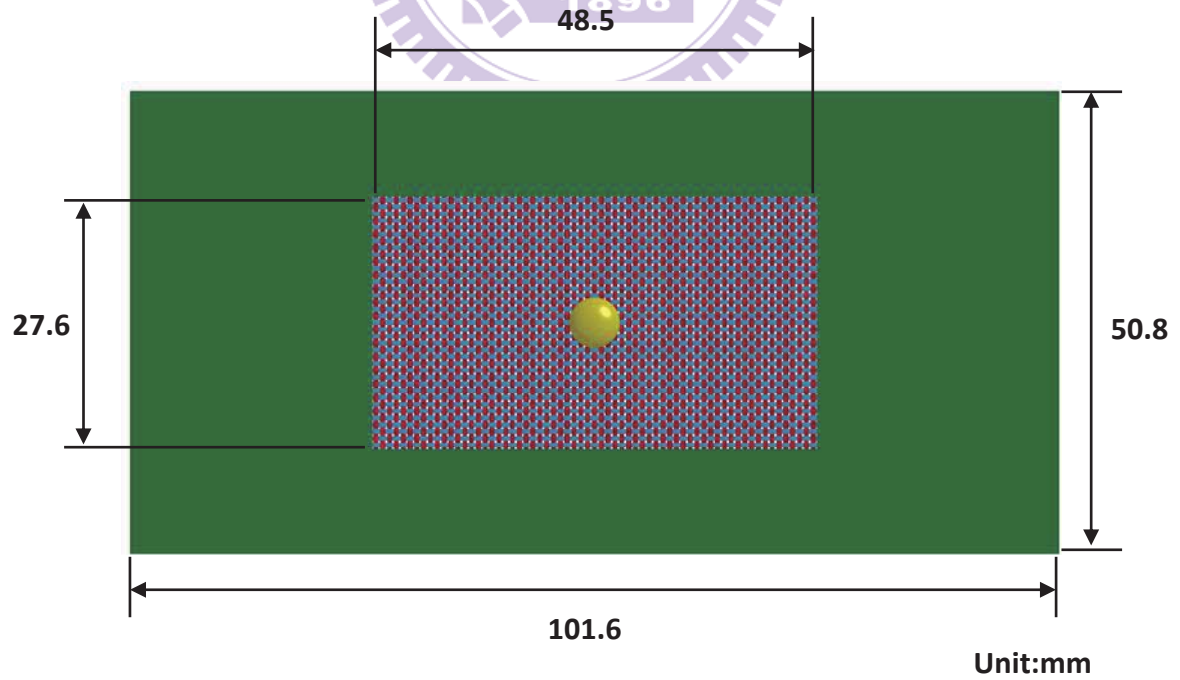


圖 3.2 矩形等效模型上視圖(全模型)

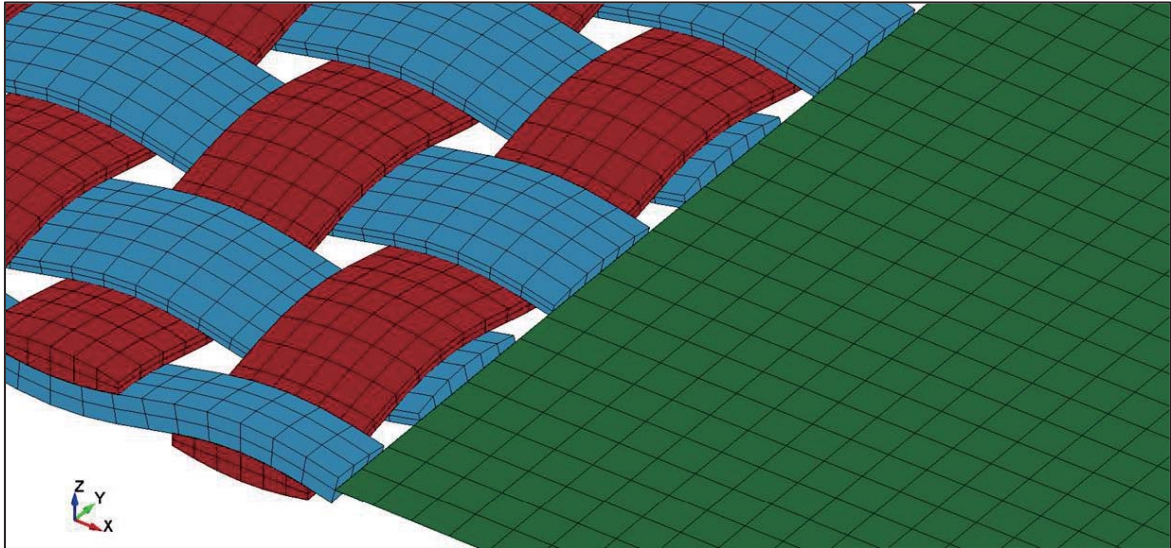


圖 3.3 編織區域與平板區域之交介面有限元素模型圖

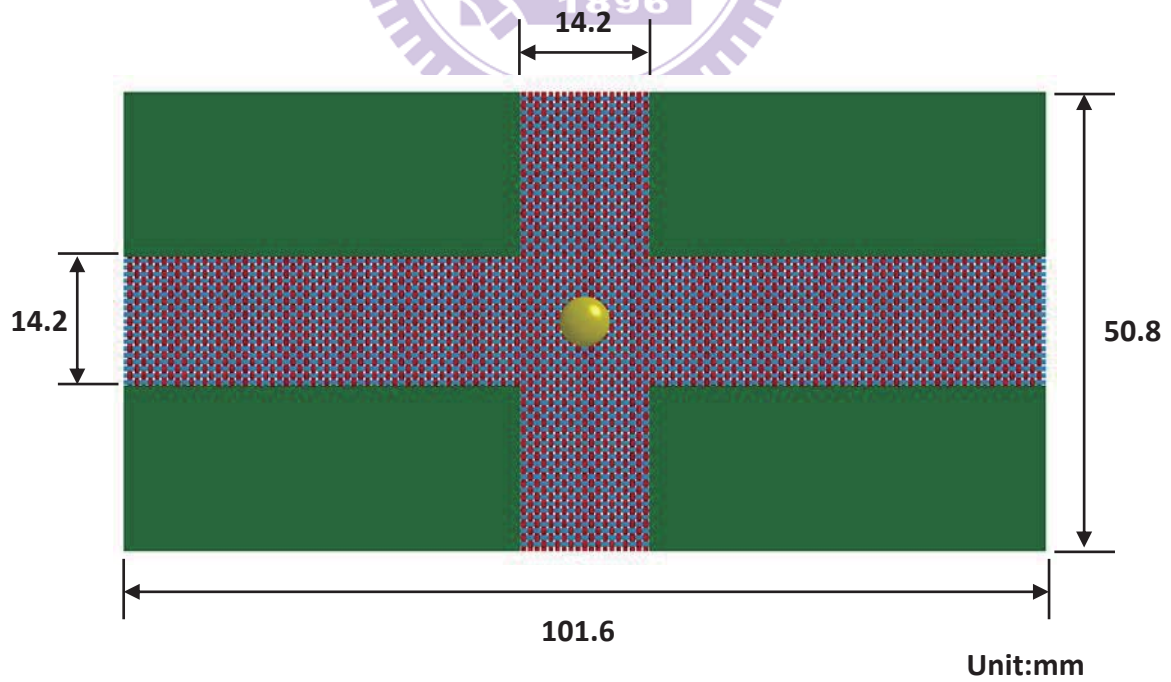


圖 3.4 十字形等效模型上視圖(全模型)

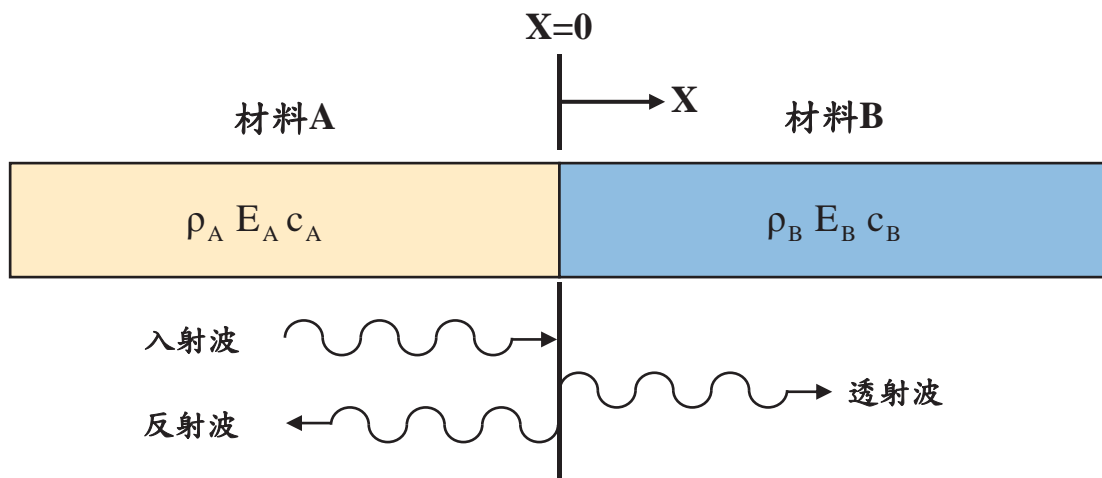


圖 3.5 入射波、透射波與反射波示意圖

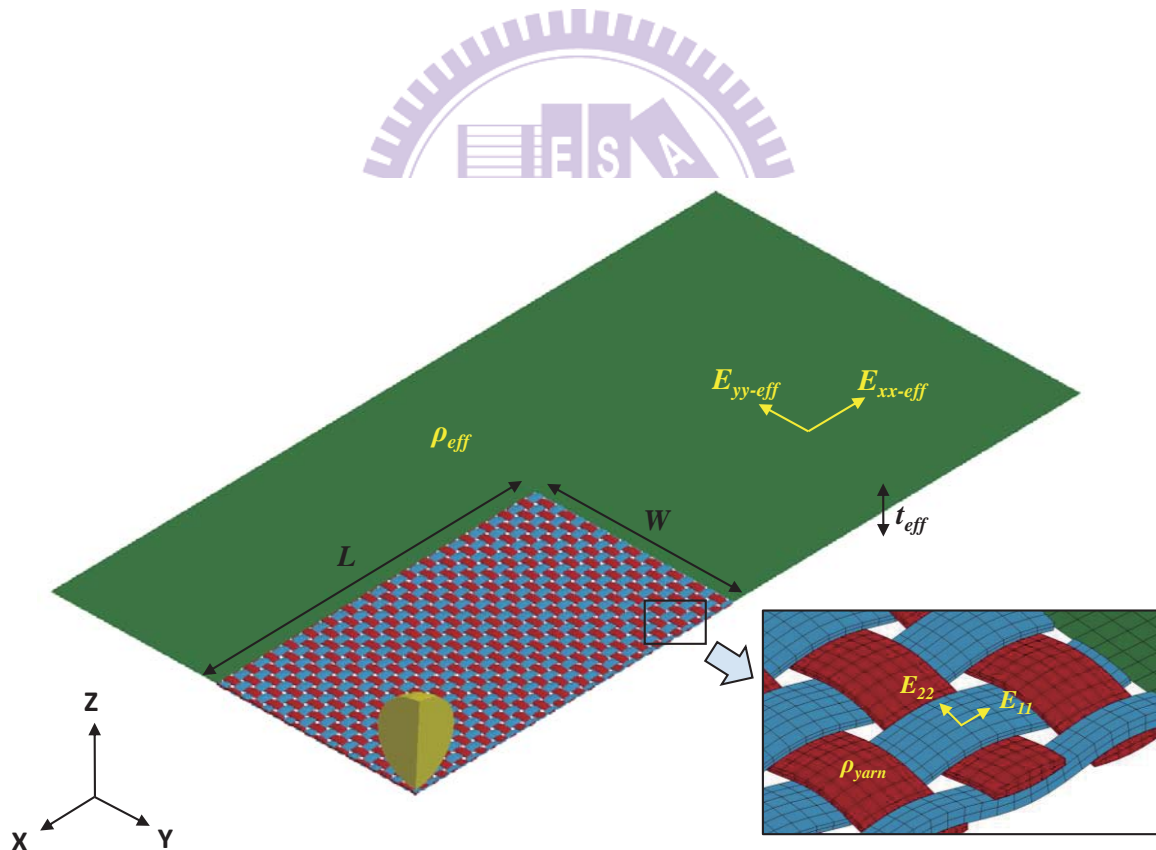


圖 3.6 HEA 模型幾何尺寸示意圖



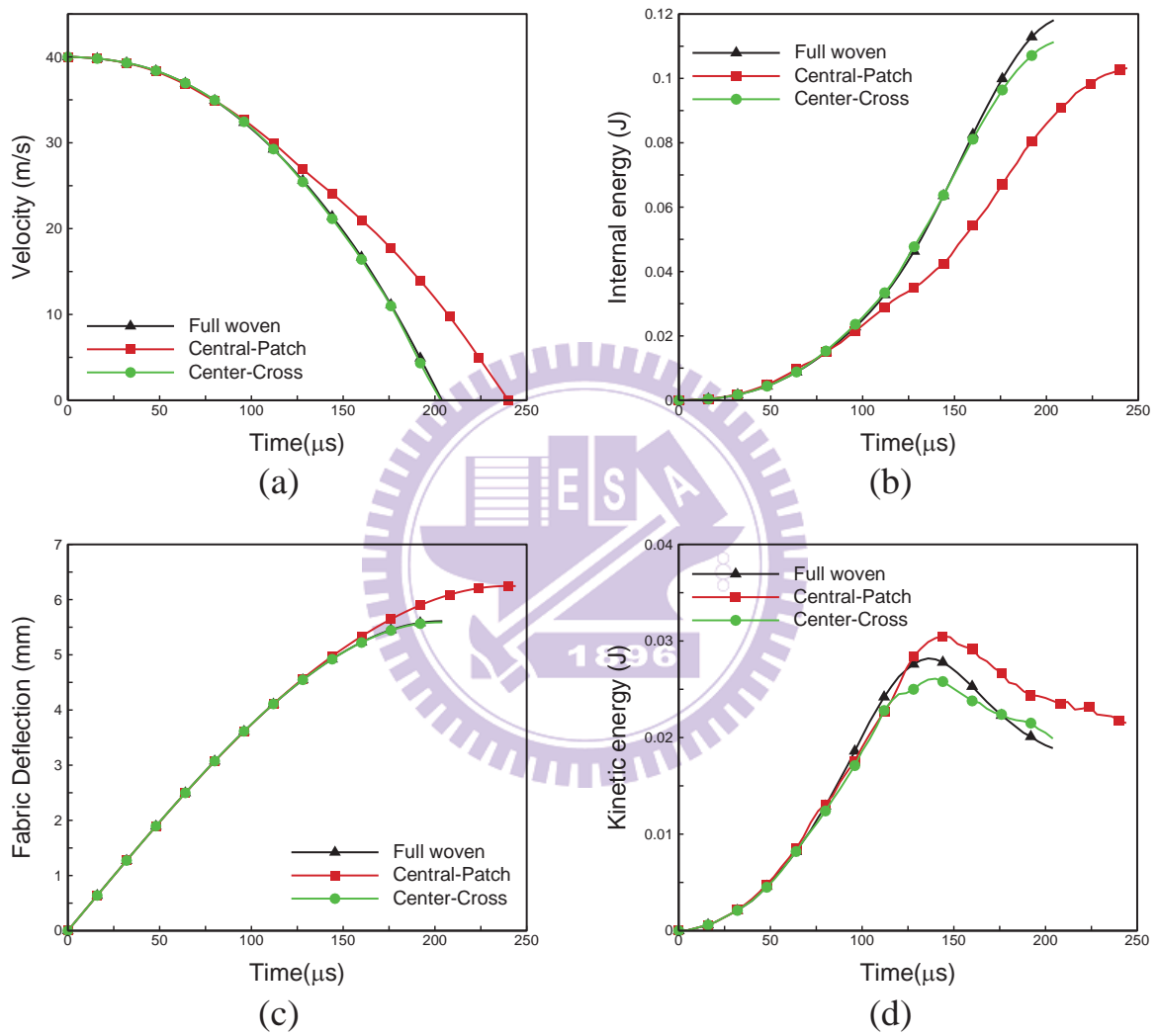


圖 3.7 比較全編織模型與 HEA 模型於 40m/s 之速度衝擊之結果(a)圓球

速度 (b)編織布應變能 (c)編織布中心位移 (d)編織布動能

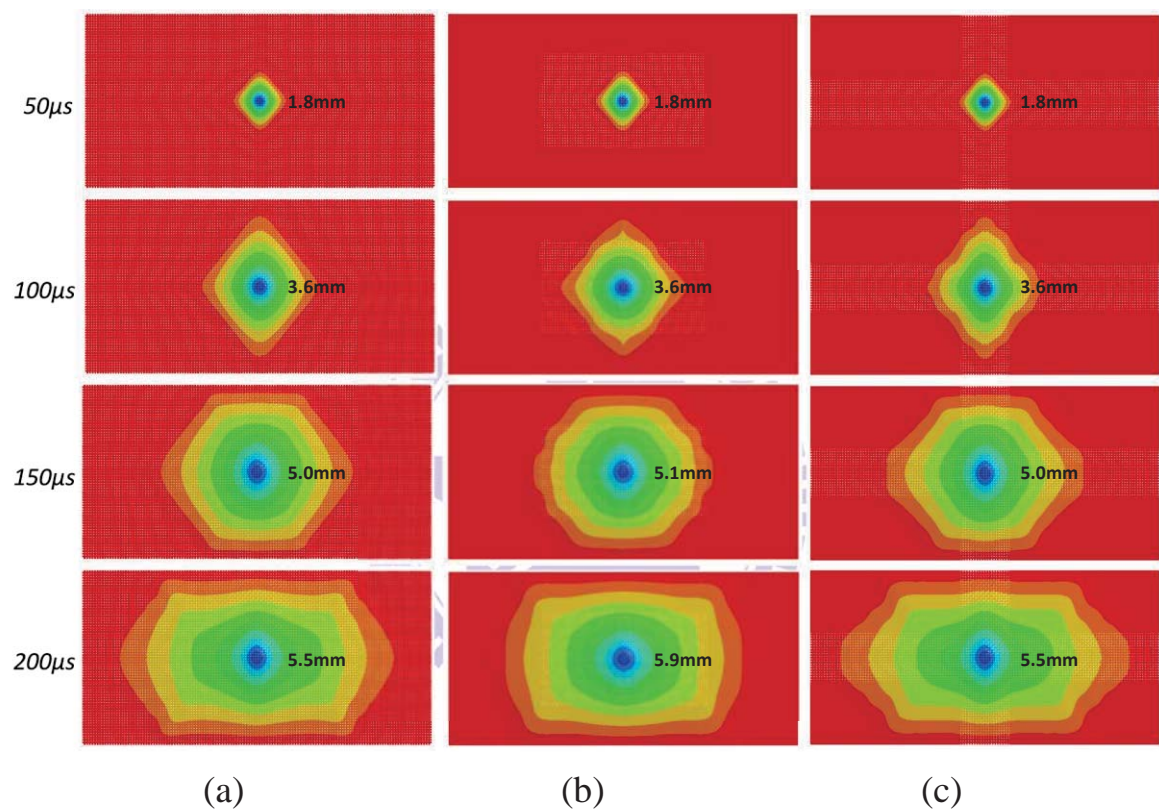


圖 3.8 全編織模型與 HEA 模型受 40m/s 圓球衝擊之變形圖(a)全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型

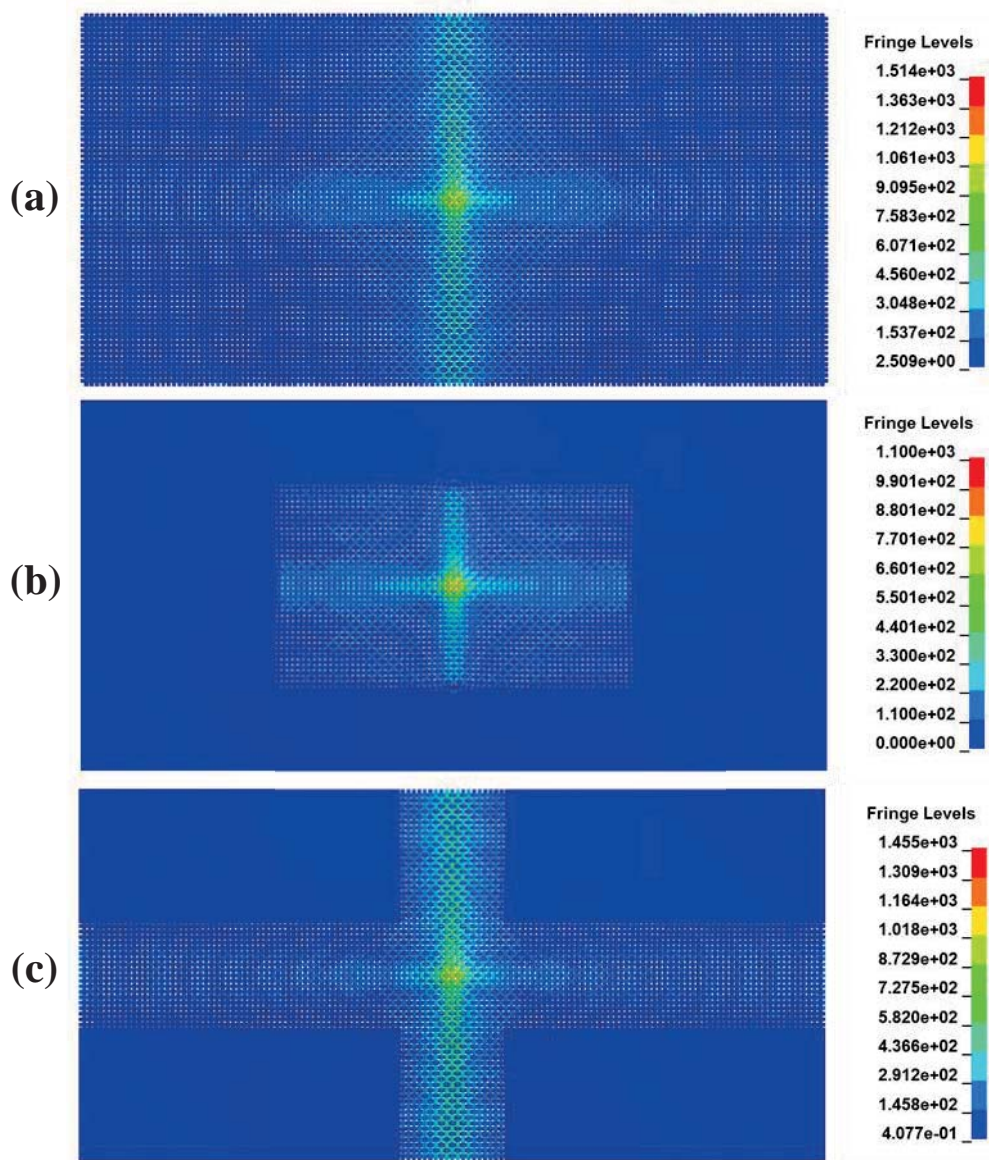


圖 3.9 全編織模型與 HEA 模型受 40m/s 圓球衝擊之主應力圖(a)全編織

模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型( $t=200\mu\text{s}$ )

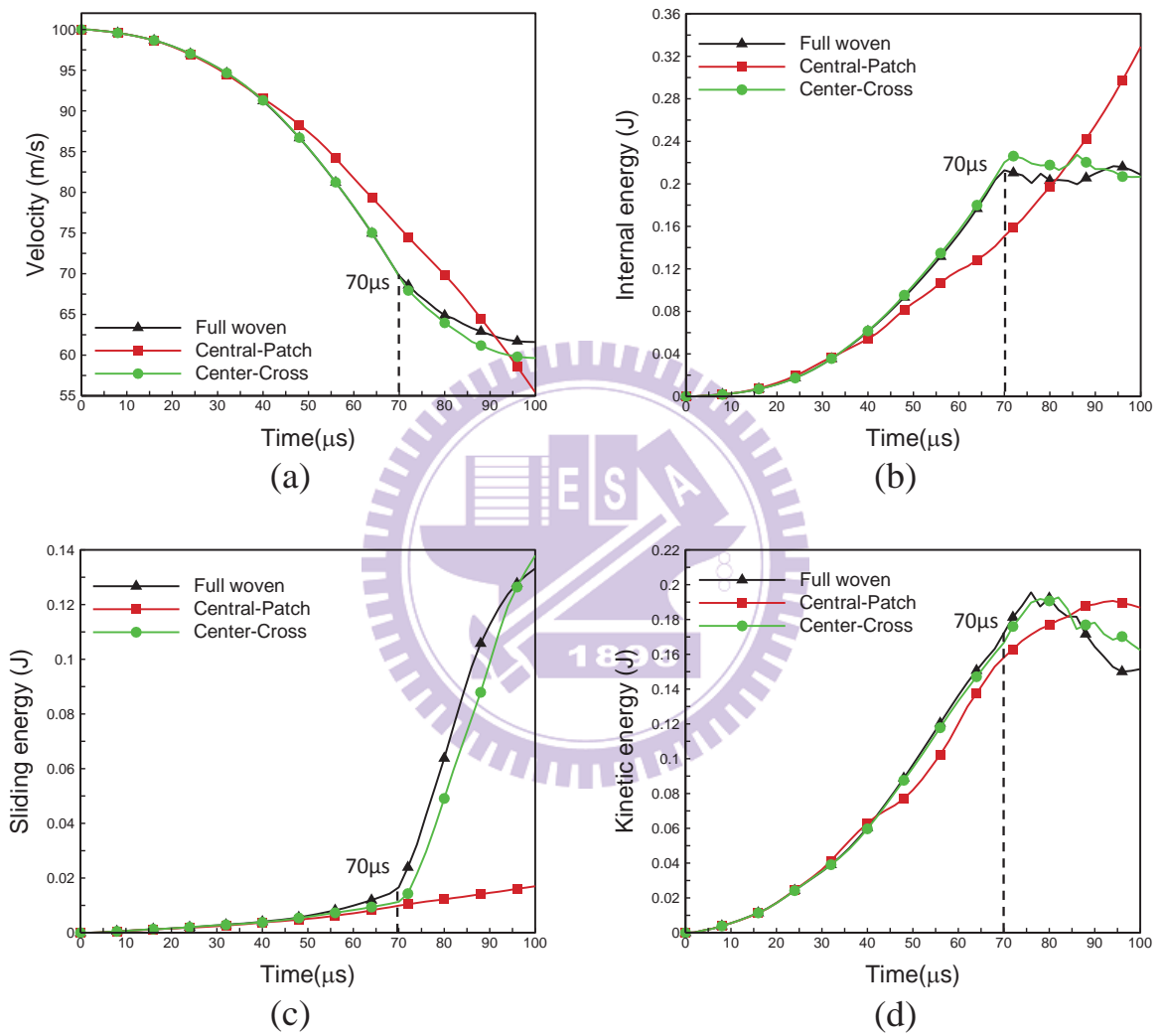


圖 3.10 比較全編織模型與 HEA 模型於 100m/s 之速度衝擊之結果(a)圓

球速度 (b)編織布應變能 (c)編織布摩擦耗能 (d)編織布動能

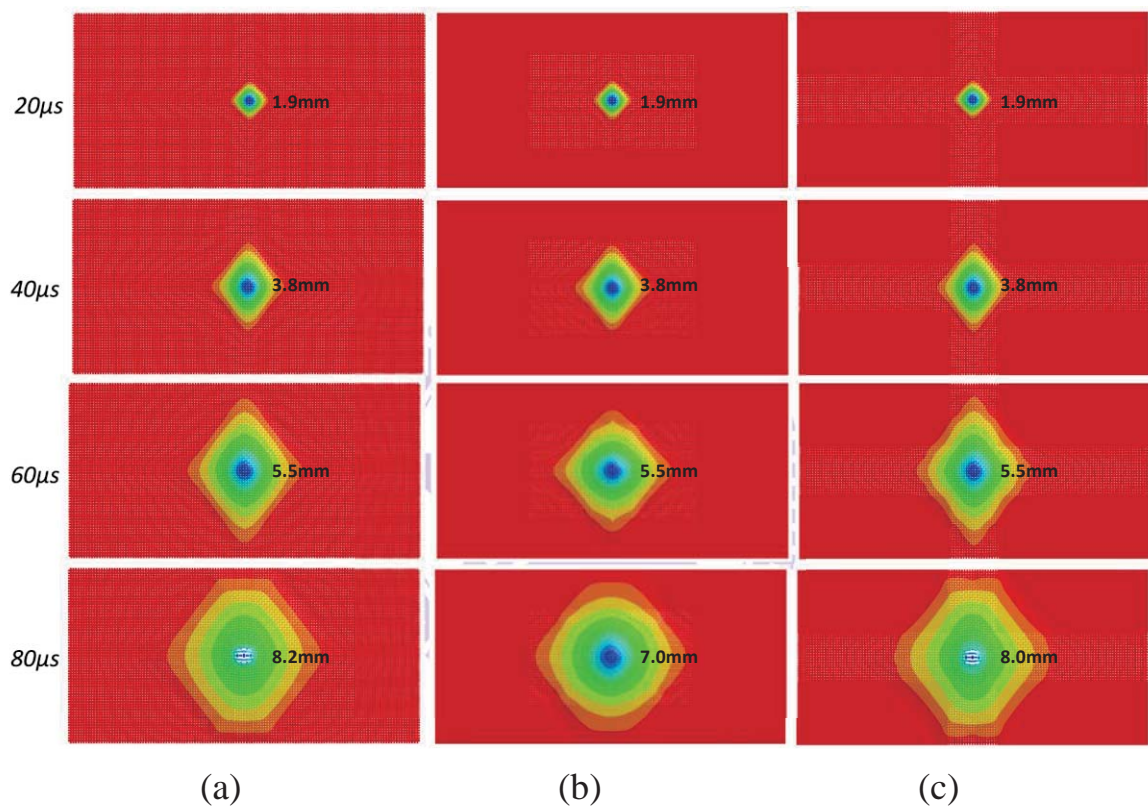


圖 3.11 全編織模型與 HEA 模型受 100m/s 圓球衝擊之變形圖(a)全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型



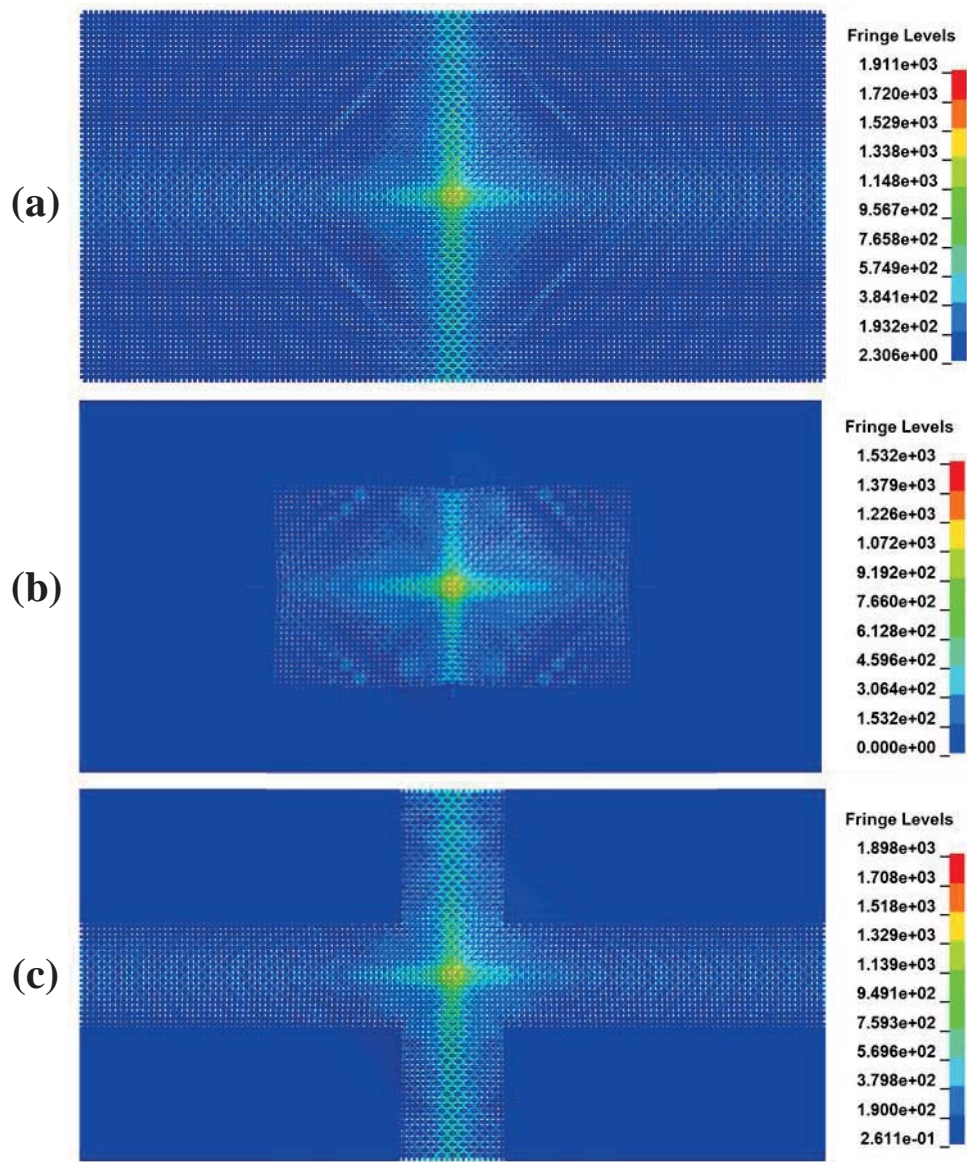


圖 3.12 全編織模型與 HEA 模型受 100m/s 圓球衝擊之主應力圖(a)全編

織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型( $t=60\mu\text{s}$ )

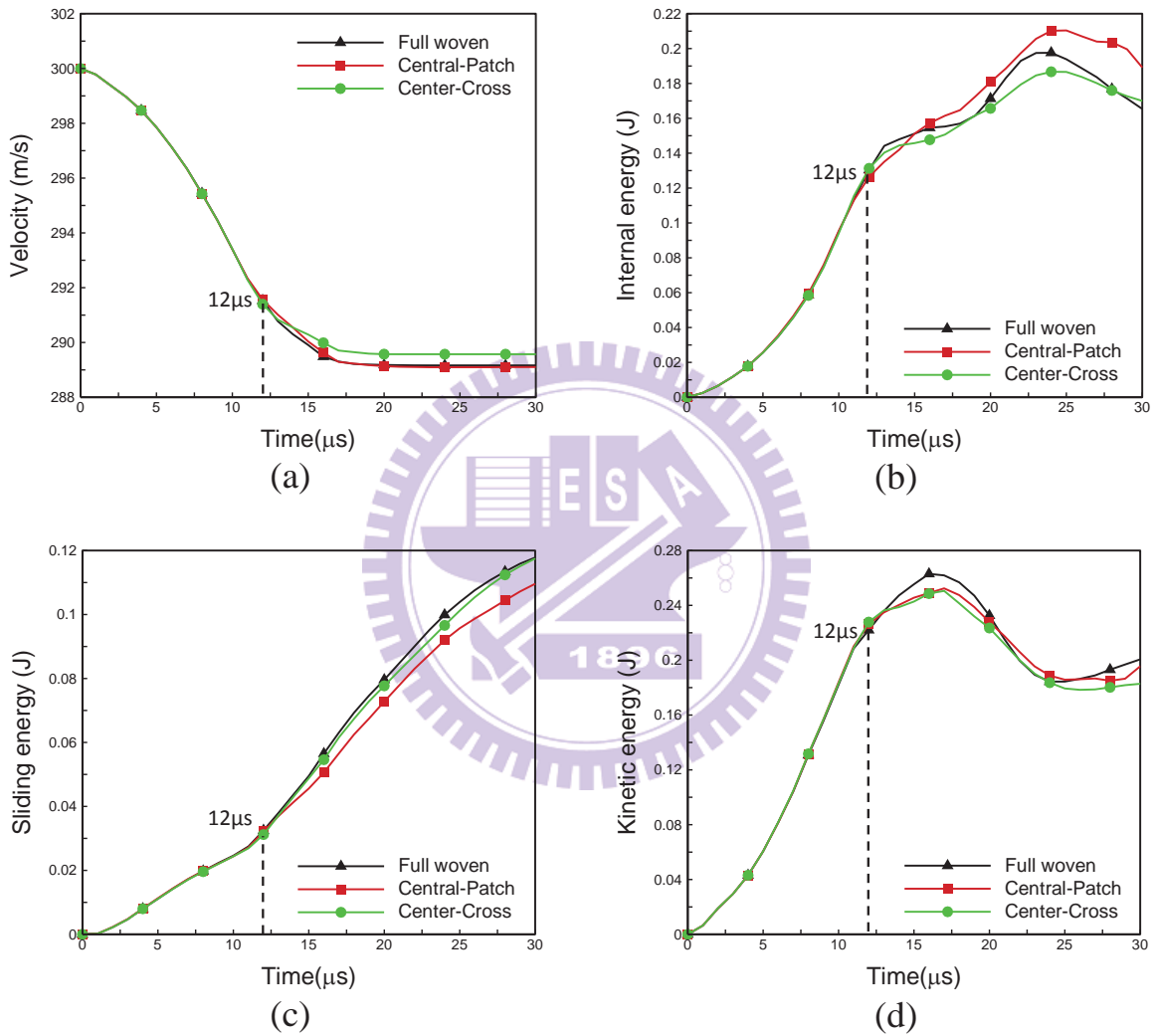


圖 3.13 比較全編織模型與 HEA 模型於 300m/s 之速度衝擊之結果(a)圓

球速度 (b)編織布應變能 (c)編織布摩擦耗能 (d)編織布動能

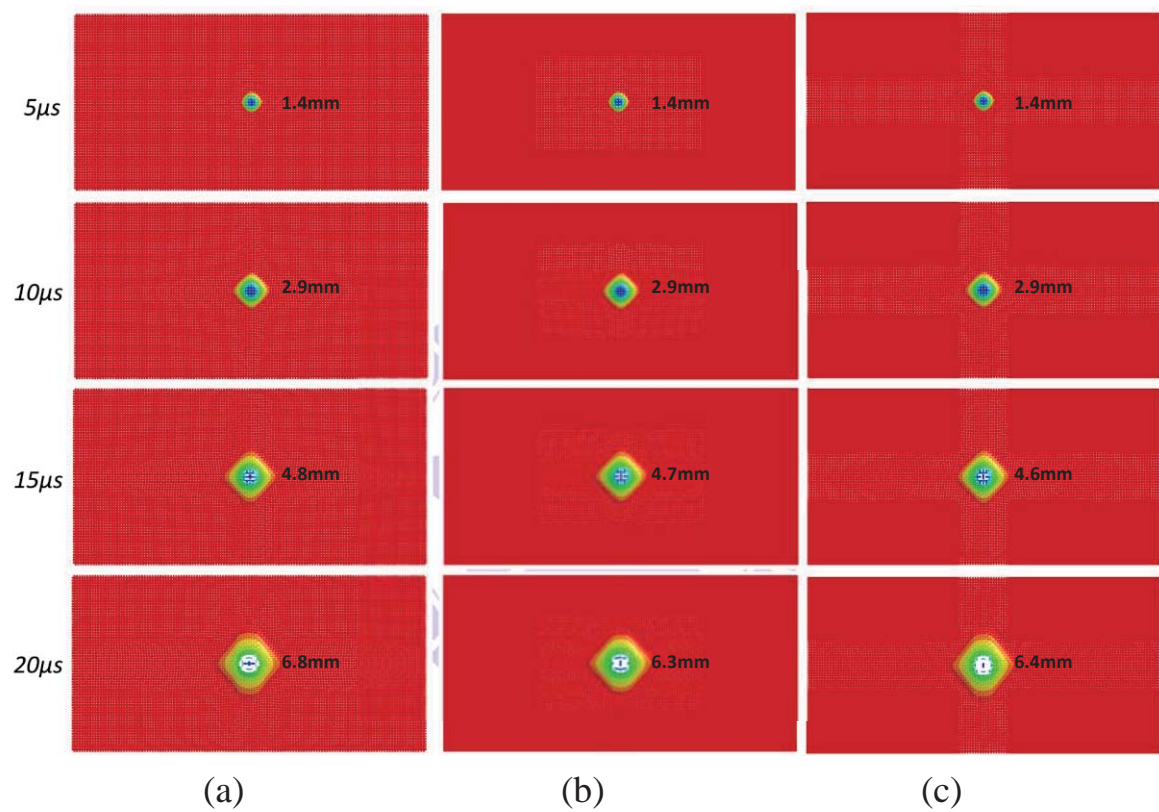


圖 3.14 全編織模型與 HEA 模型受 300m/s 圓球衝擊之變形圖(a)全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型

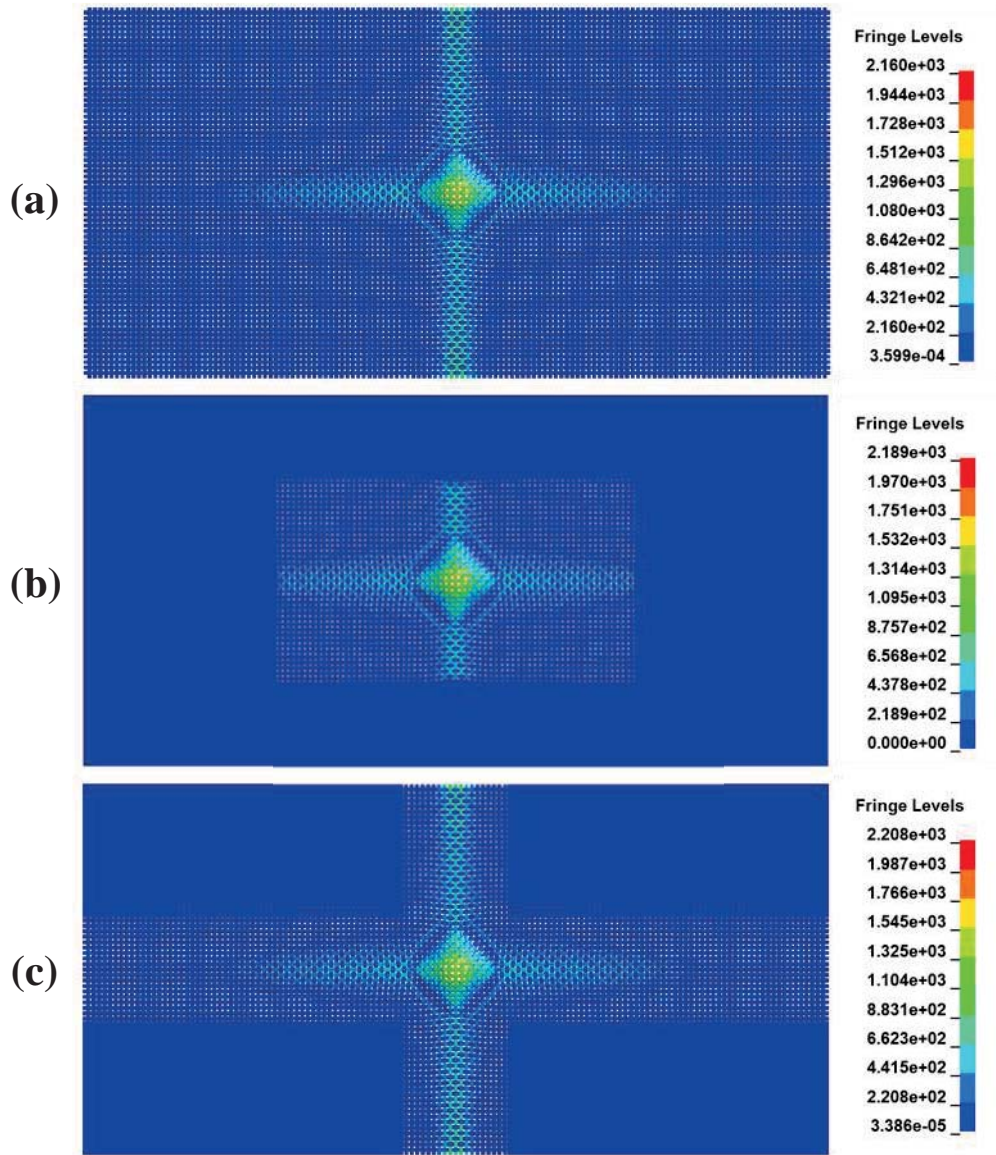
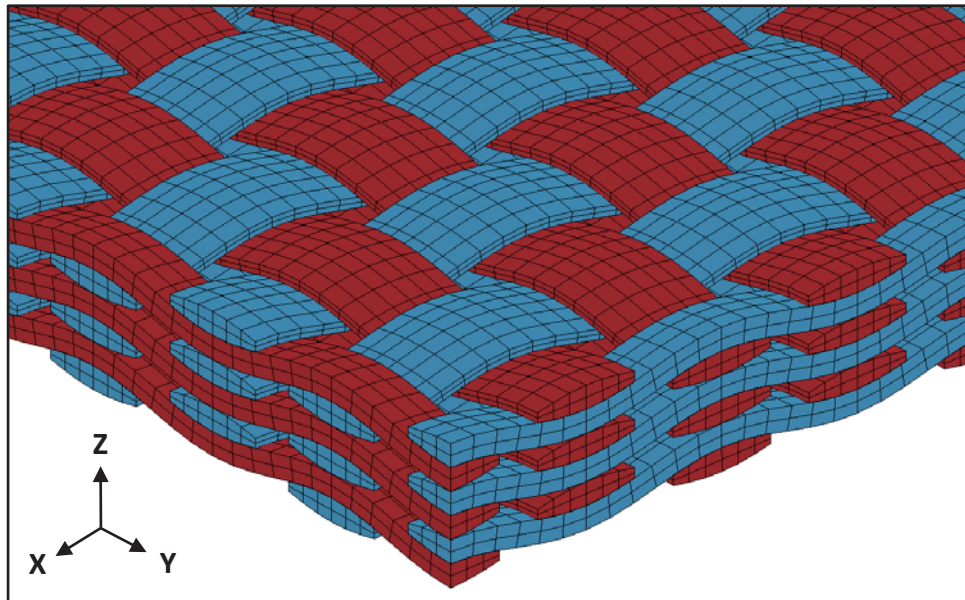


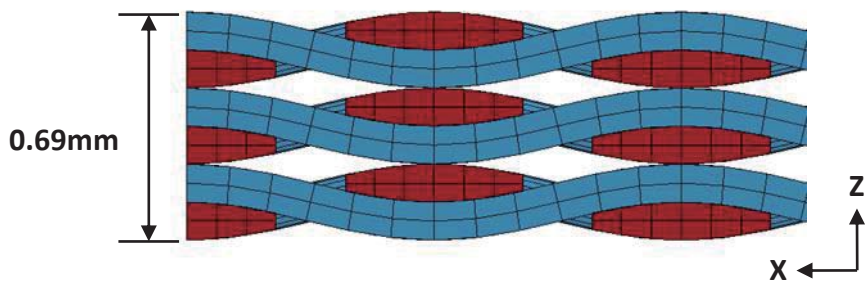
圖 3.15 全編織模型與 HEA 模型受 300m/s 圓球衝擊之主應力圖(a)全編

織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型( $t=10\mu s$ )





(a)



(b)

圖 3.16 三層編織布有限元素模型(a)等角視圖 (b)側視圖



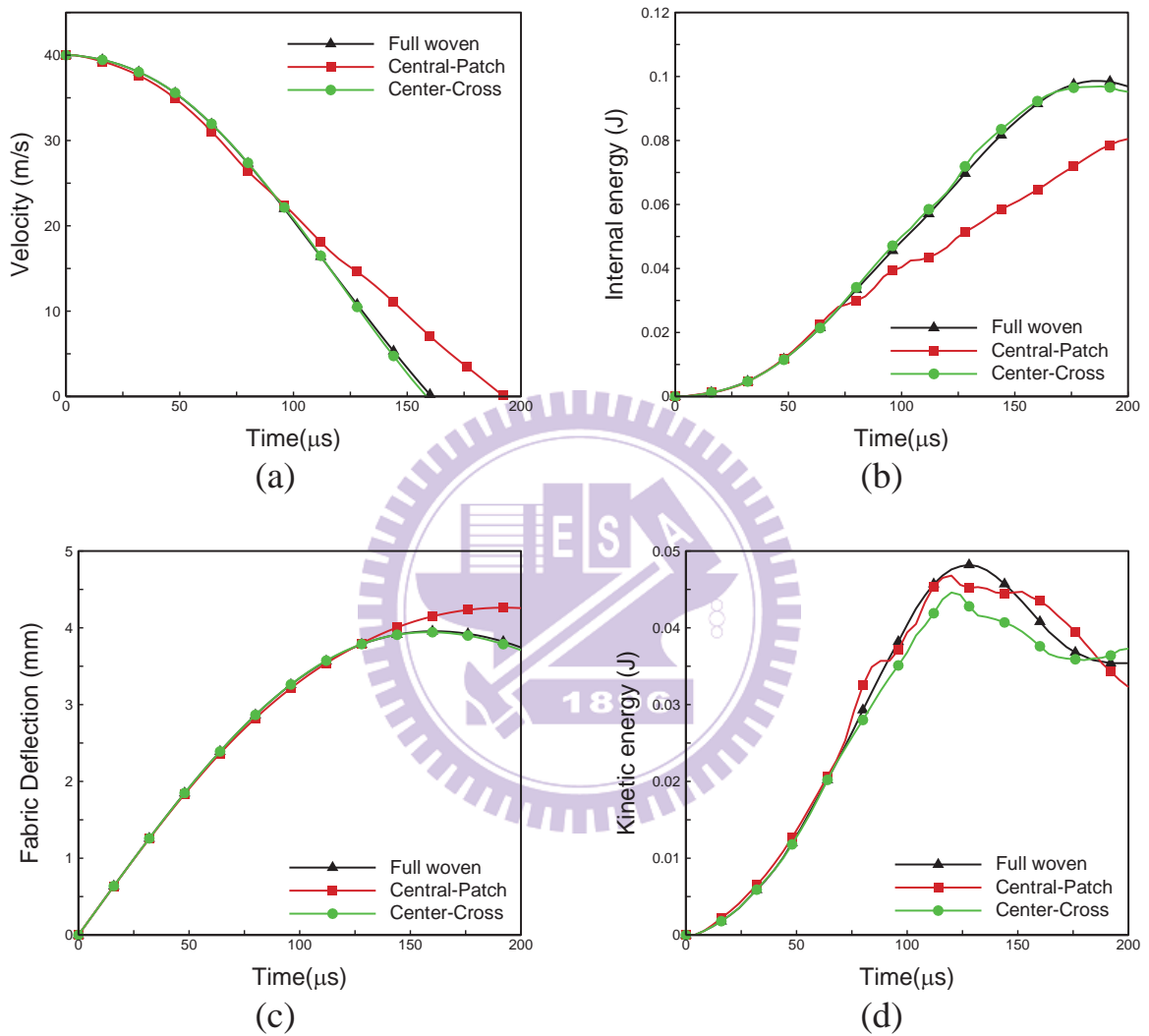


圖 3.17 比較三層全編織模型與 HEA 模型於 40m/s 之速度衝擊之結果

(a)圓球速度 (b)編織布應變能 (c)編織布摩擦耗能 (d)編織布動能

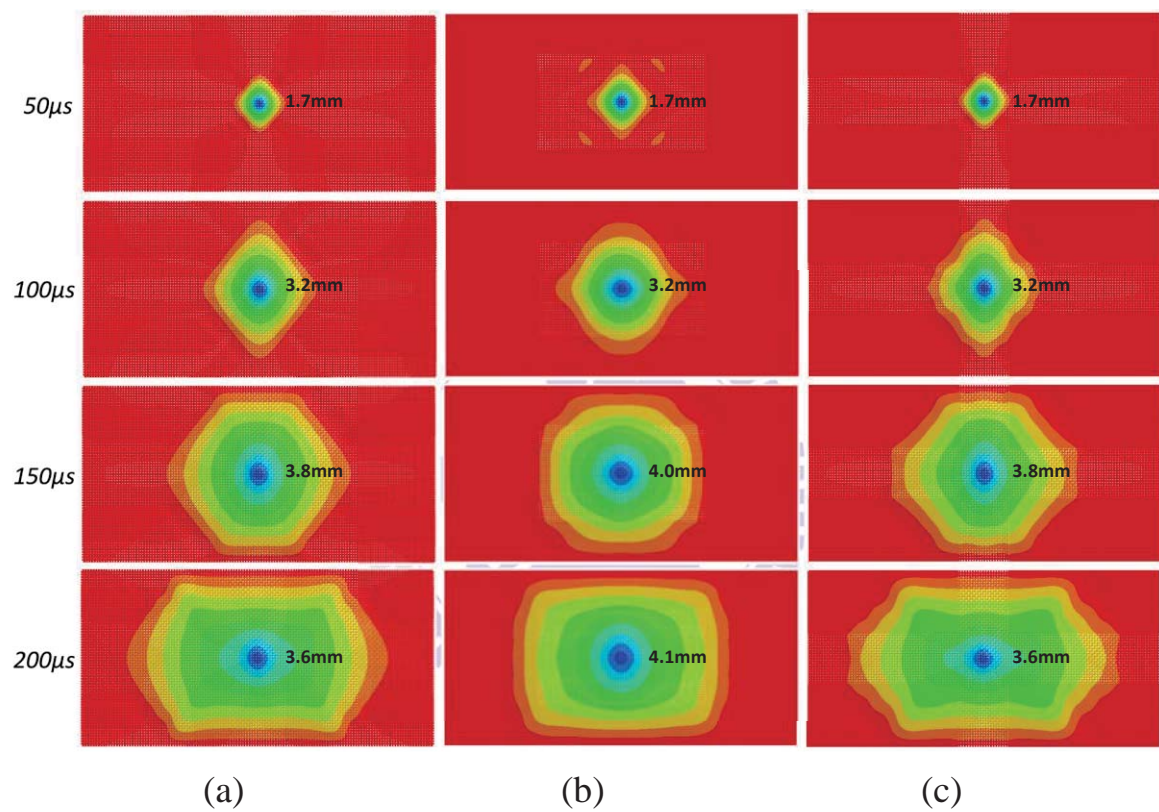


圖 3.18 三層全編織模型與 HEA 模型受 40m/s 圓球衝擊之變形圖(a)全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型

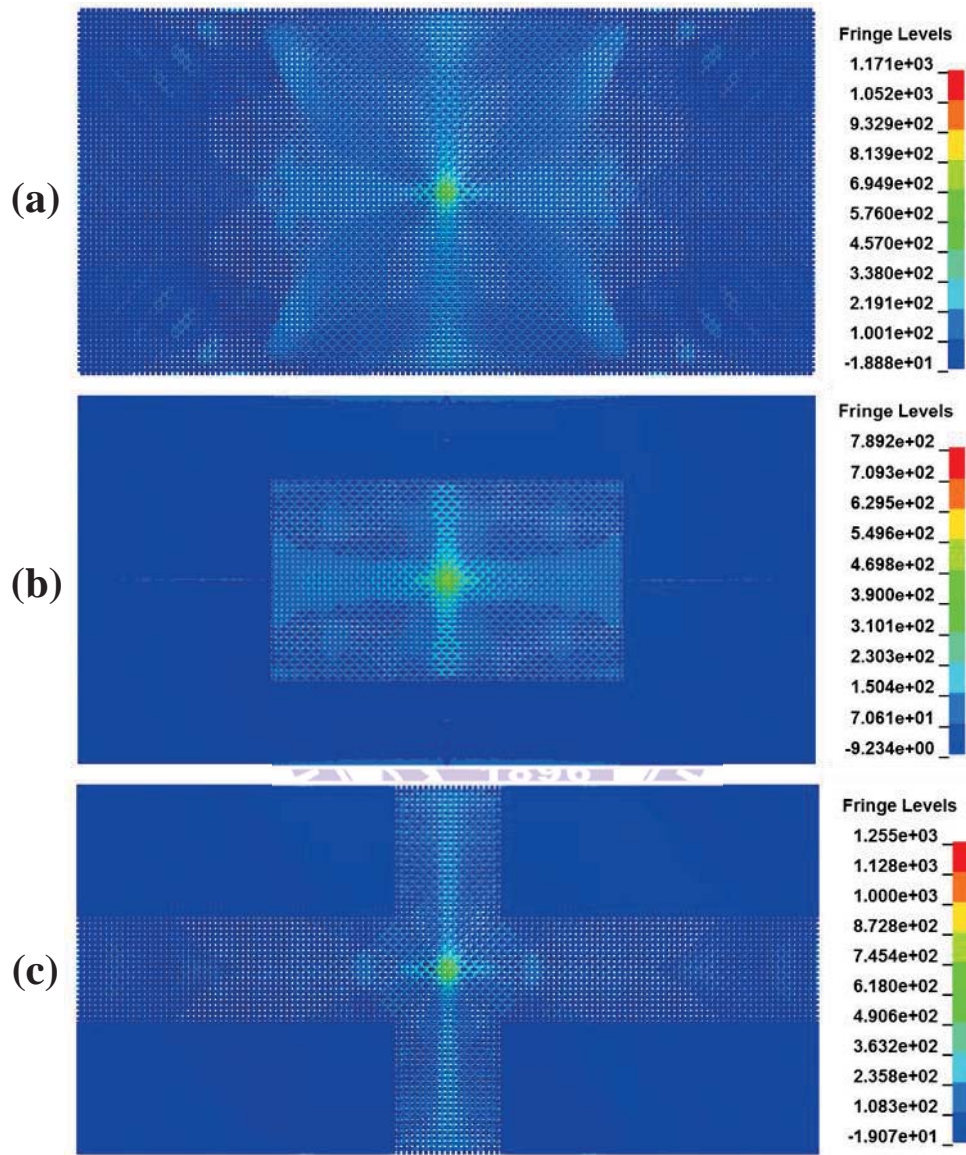


圖 3.19 三層全編織模型與 HEA 模型受 40m/s 圓球衝擊之主應力圖(a)

全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型( $t=60\mu s$ )

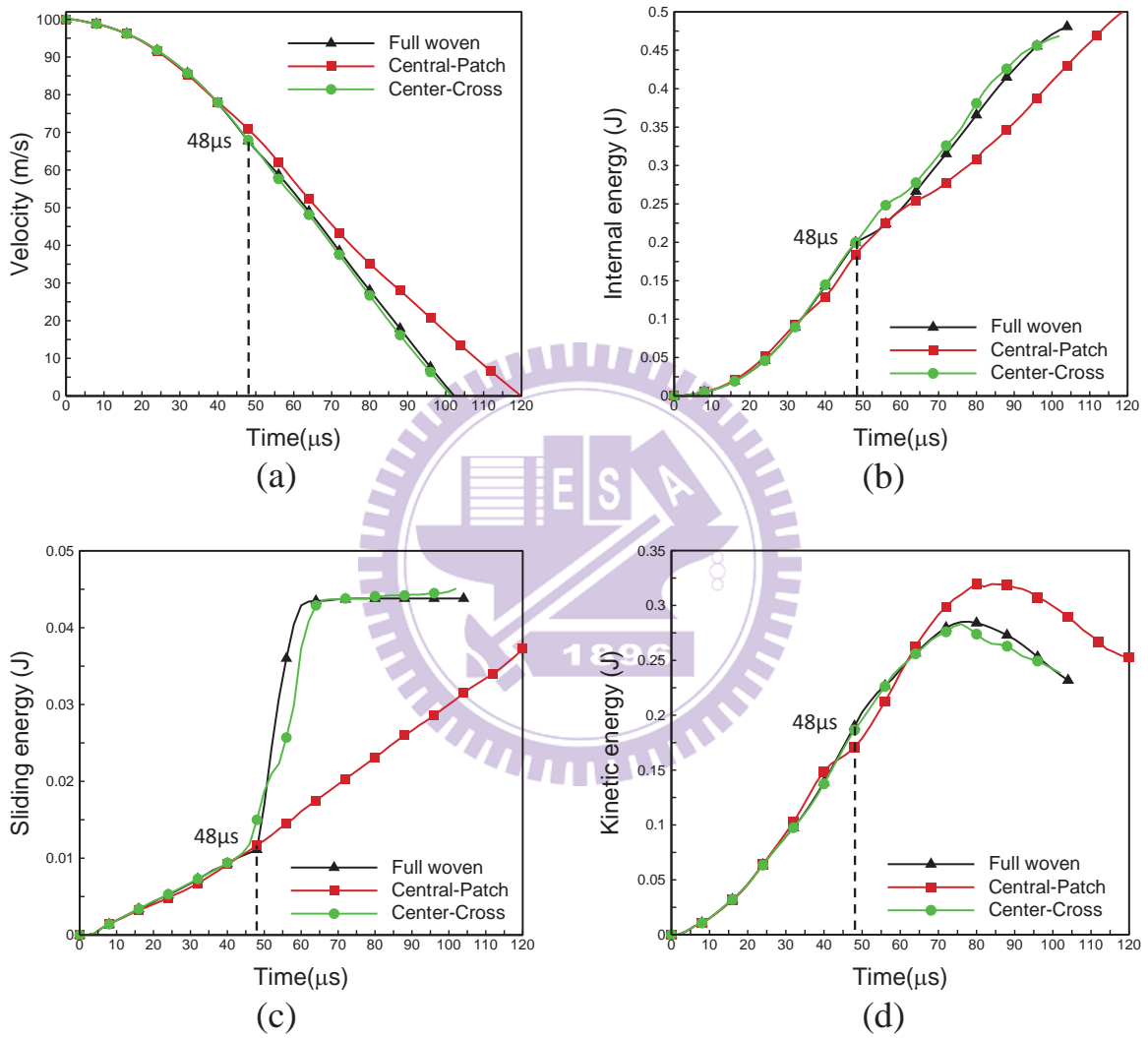


圖 3.20 比較三層全編織模型與 HEA 模型於 100m/s 之速度衝擊之結果

(a)圓球速度 (b)編織布應變能 (c)編織布摩擦耗能 (d)編織布動能



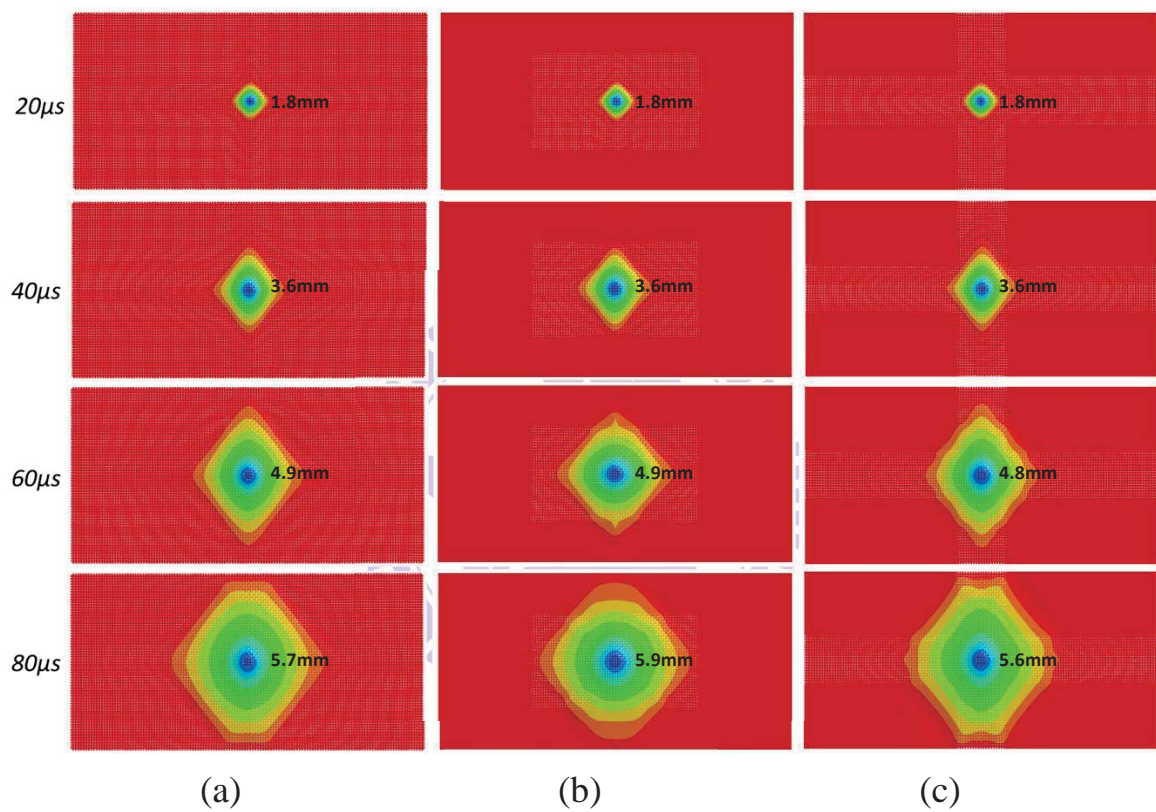
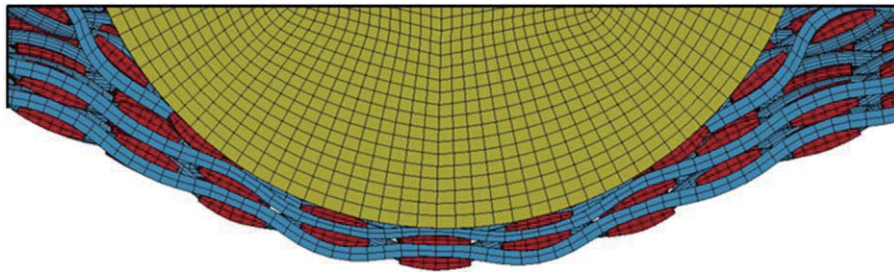
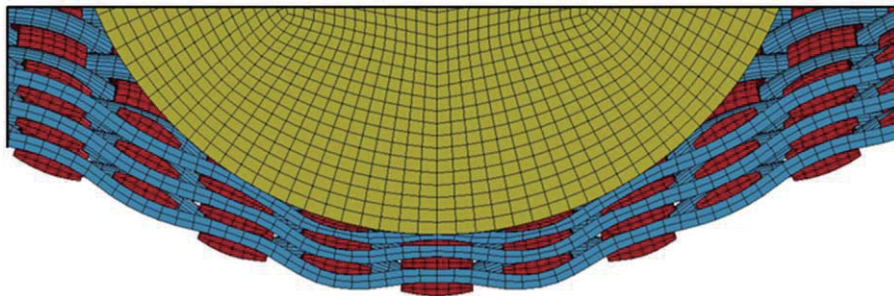


圖 3.21 三層全編織模型與 HEA 模型受 100m/s 圓球衝擊之變形圖(a)全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型

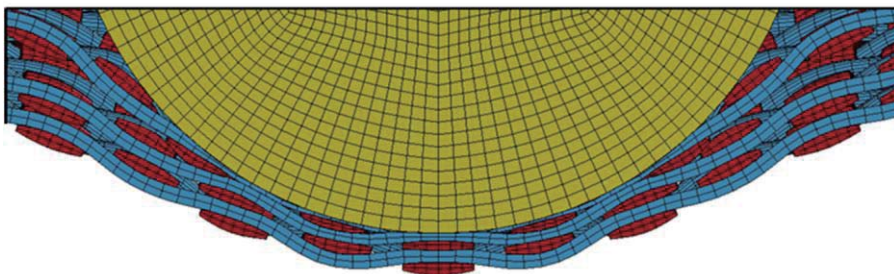




(a)



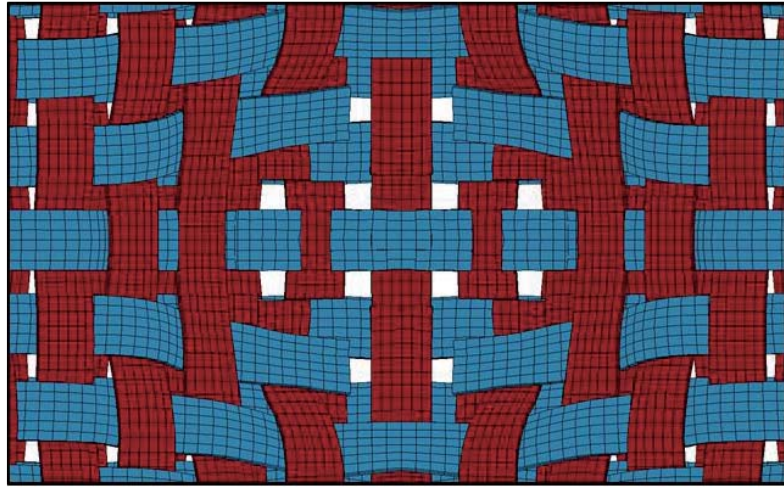
(b)



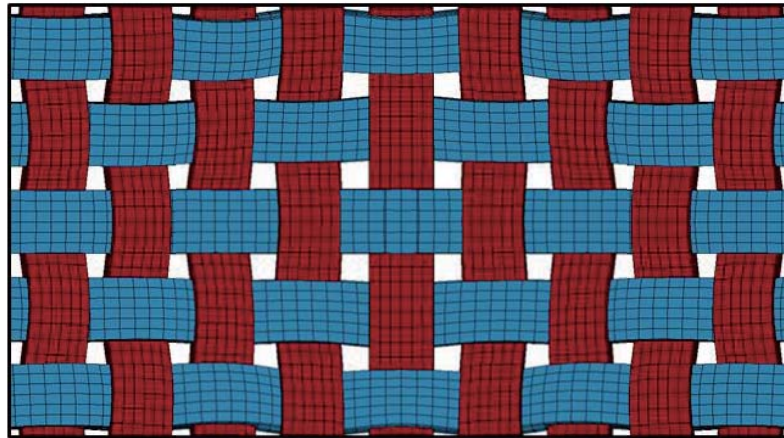
(c)

圖 3.22 三層全編織模型與 HEA 模型受 100m/s 圓球衝擊之破壞情形(a)

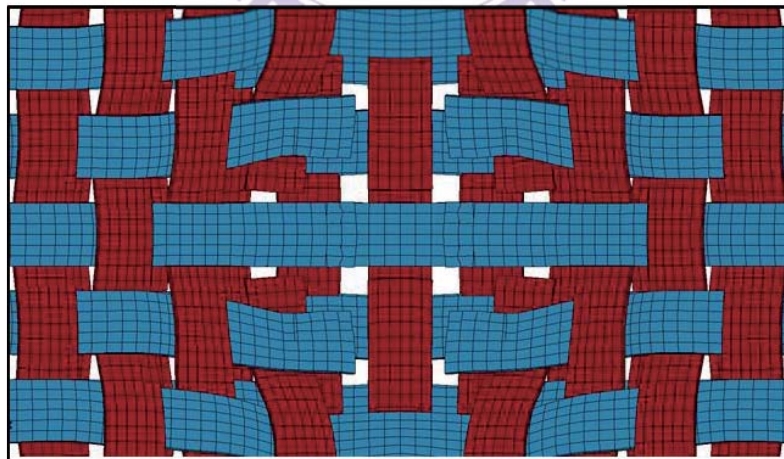
全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型(側視圖)



(a)



(b)



(c)

圖 3.23 三層全編織模型與 HEA 模型受 100m/s 圓球衝擊之破壞情形(a)

全編織模型(b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型(上視圖)



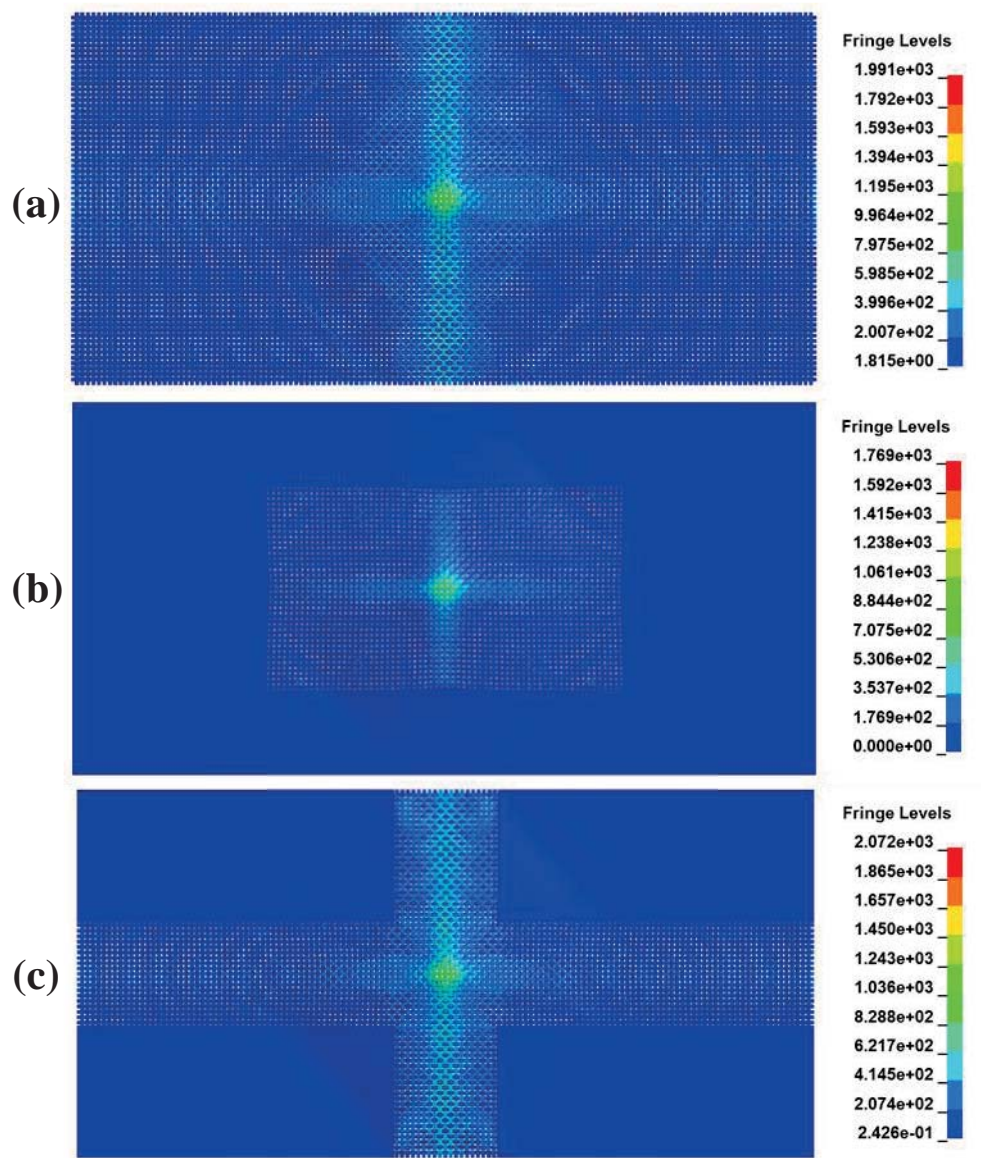


圖 3.24 三層全編織模型與 HEA 模型受 100m/s 圓球衝擊之主應力圖(a)

全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型( $t=60\mu s$ )

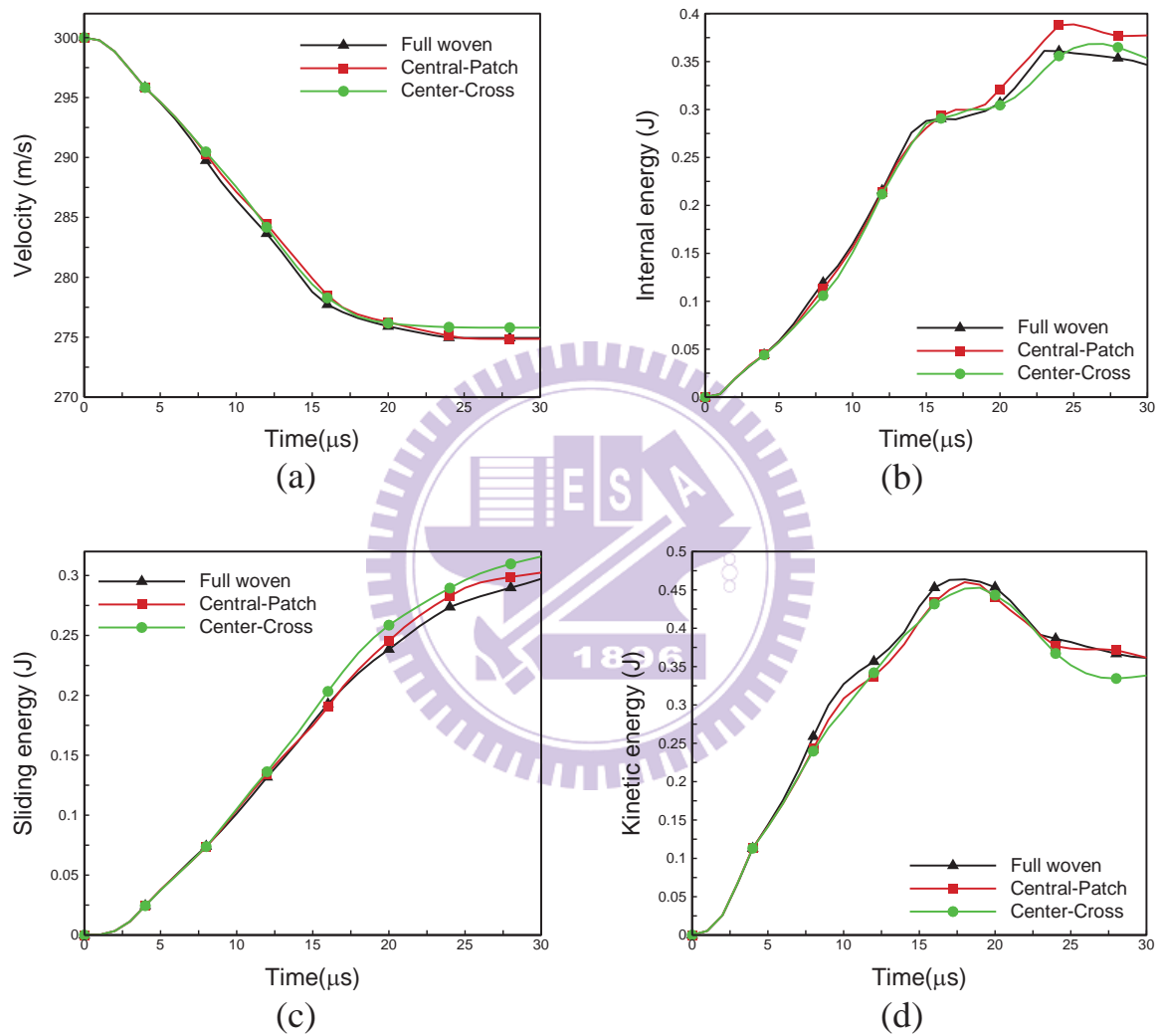


圖 3.25 比較三層全編織模型與 HEA 模型於 300m/s 之速度衝擊之結果

(a)圓球速度 (b)編織布應變能 (c)編織布摩擦耗能 (d)編織布動能

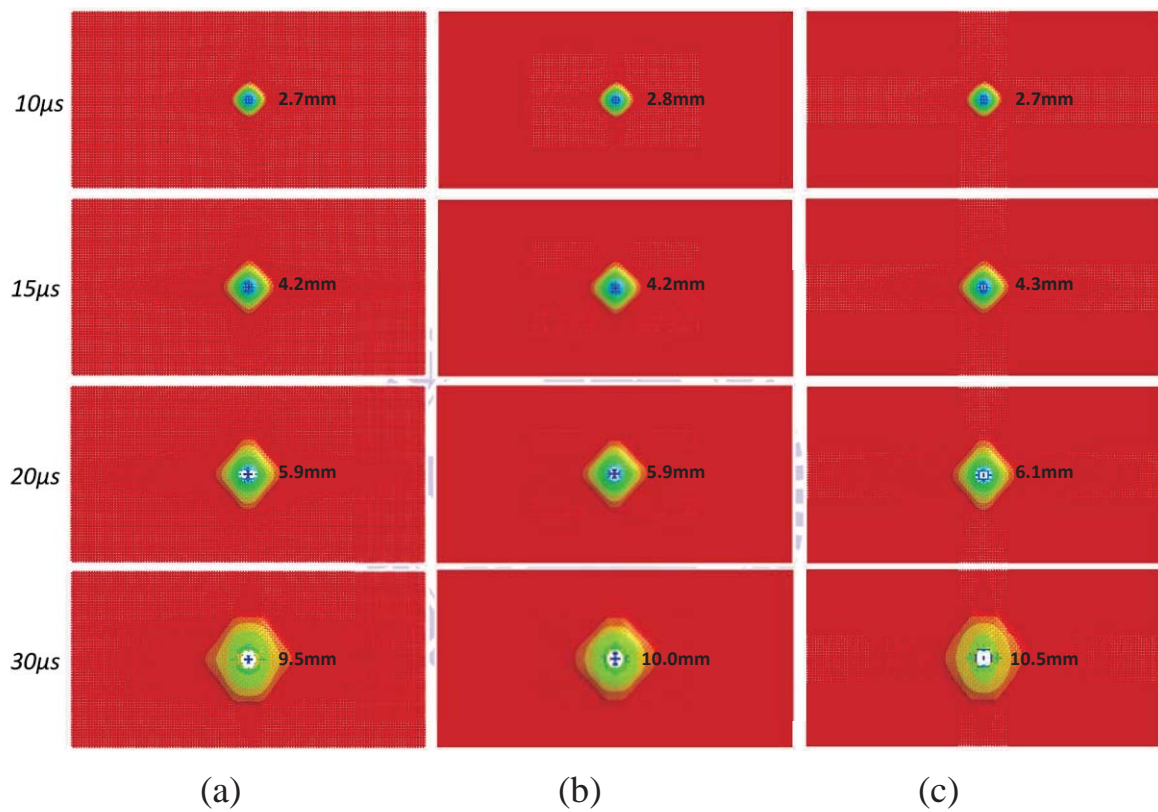


圖 3.26 三層全編織模型與 HEA 模型受 300m/s 圓球衝擊之變形圖(a)全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型



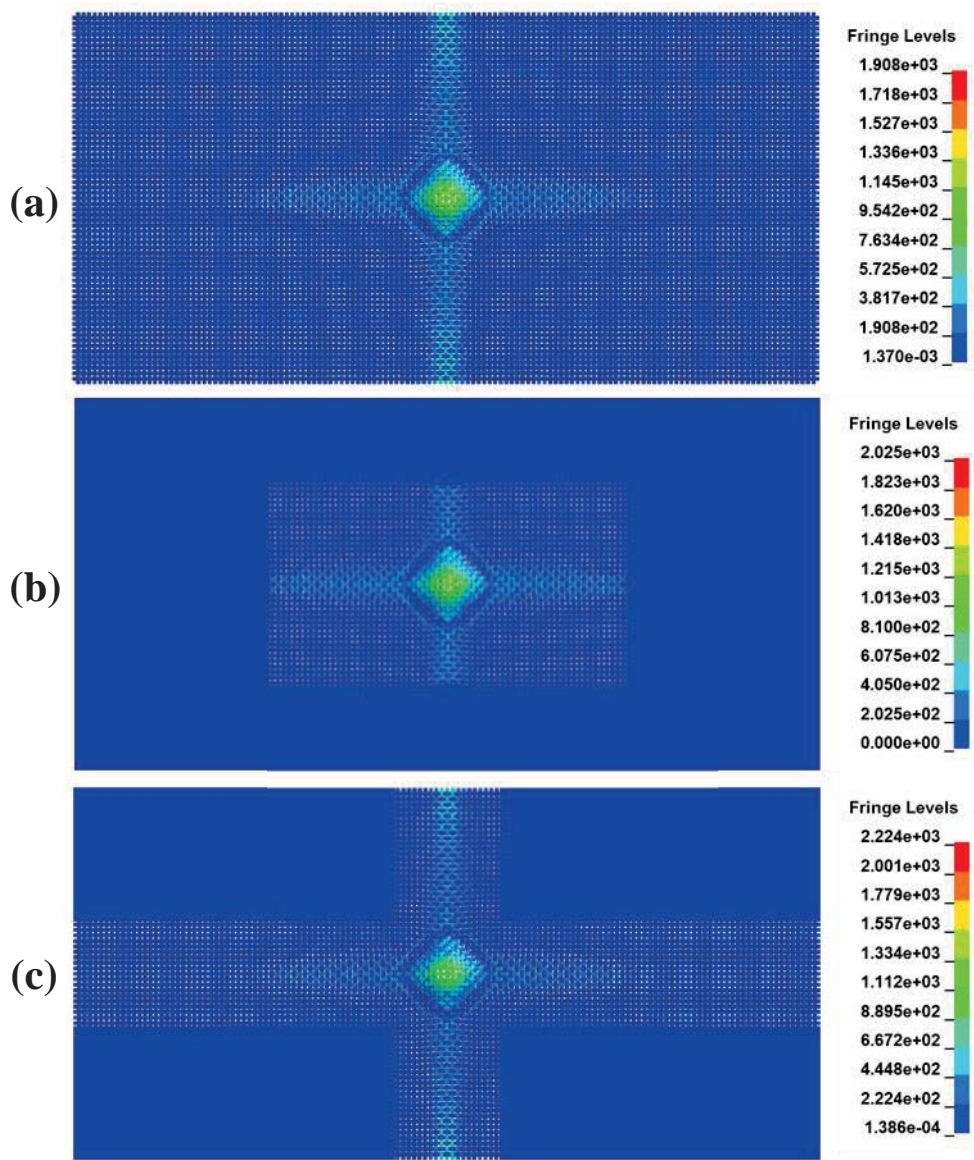
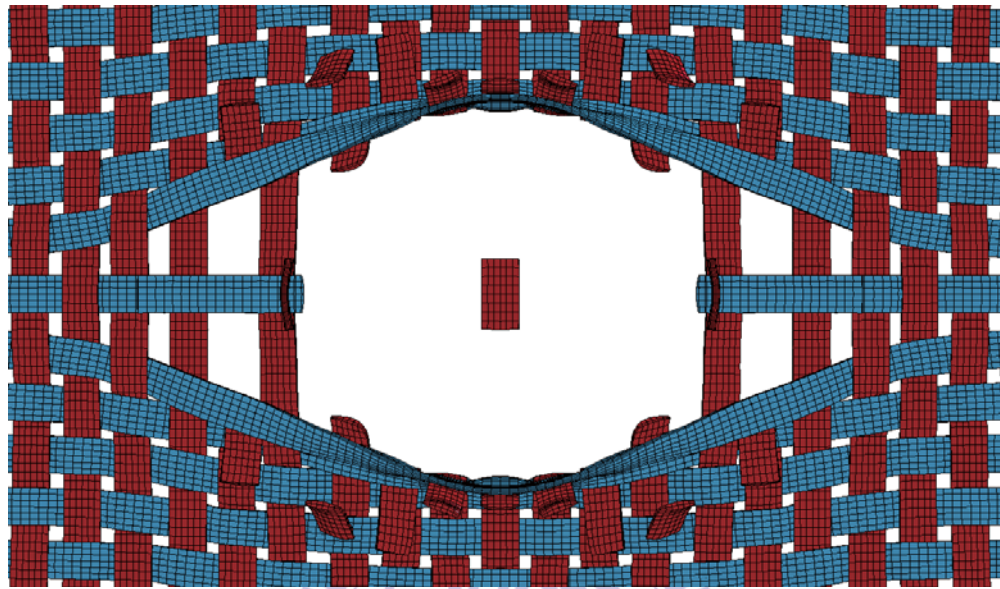
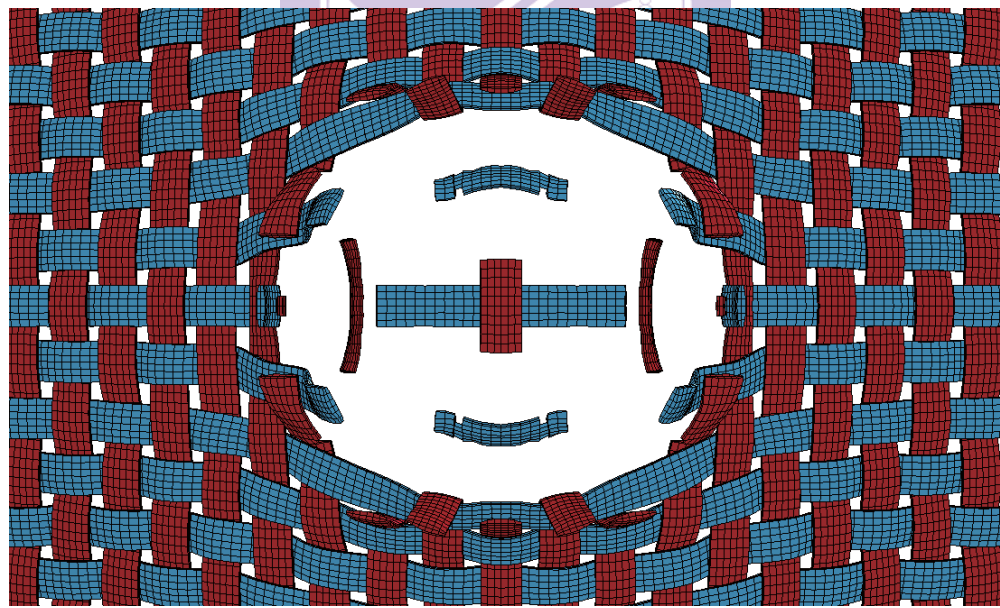


圖 3.27 三層全編織模型與 HEA 模型受 300m/s 圓球衝擊之主應力圖(a)

全編織模型 (b)矩形等效模型 (c)十字形等效模型( $t=10\mu\text{s}$ )



(a)



(b)

圖 3.28 單層編織布受圓球衝擊後之破壞及滑移情形(a)衝擊速度 100m/s

(b)衝擊速度 300m/s