

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

以有限元素法模擬

探討子彈衝擊編織布之行為

Investigating Ballistic Impact Behaviors of Woven Fabric

Using Finite Element Analysis

研究生：林子晨

指導教授：蔡佳霖 博士

中華民國一〇二年七月

以有限元素法模擬探討子彈衝擊編織布之行為

Investigating Ballistic Impact Behaviors of Woven Fabric

Using Finite Element Analysis

研究生：林子晨

Student : Tzu-Chen Lin

指導教授：蔡佳霖

Advisor : Jia-Lin Tsai

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Mechanical Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月


# 以有限元素法模擬探討子彈衝擊編織布之行為

學生：林子晨

指導教授：蔡佳霖 教授

國立交通大學機械工程系碩士班

## 摘要



本研究主要利用有限元素分析(Finite element analysis)探討纖維編織布受子彈衝擊後之行為與吸能機制。首先藉由代表性單元體來觀察纖維間摩擦力對於等效纖維紗束之剪力模數的影響，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，而當壓縮應力相同時，增加纖維間摩擦係數亦會提升等效剪力模數。根據單層編織布的衝擊模擬，觀察圓球速度歷程變化以及編織布能量吸收情形，比較編織布不同剪力模數、纖維間摩擦係數、幾何排列形狀以及邊界條件之影響。結果顯示纖維編織布材料的剪力模數愈低則較不易發生破壞，並能延遲阻擋衝擊的時間，使得抗彈能力較佳；當編織布纖維間無摩擦力亦或編織布幾何排列為雙跨距編織法時，纖維間都會容易產生滑移之現象，導致抵抗衝擊能力會較差；觀察纖維編織布在不同邊界條件之下受衝擊後之行為發現，若邊界有受

到拘束則變形波傳遞較快，不受拘束方向的變形波傳遞較慢，因此根據衝擊物之餘速發現四邊固定之編織布對於抗彈能力最佳。

為了有效率地分析多層編織布受鋼球衝擊之行為，本研究將單層以及三層全編織模型進行簡化為單尺度混合元素模型(single-scale hybrid element model)，建立矩形等效模型(central-patch model)以及十字型等效模型(center-cross model)做比較，鋼球分別以 40m/s、100m/s 及 300m/s 之速度衝擊，觀察編織布受衝擊後鋼球之速度歷程、編織布動能及應變能變化與摩擦耗能歷程，並比較全編織模型與簡化模型受衝擊後之行為及運算時間。研究結果顯示簡化模型不但可減少運算時間，其中矩形等效模型在鋼球速度 300m/s 衝擊下較能與全編織模型受衝擊結果達到一致，而十字型等效模型不論受到三種速度衝擊下皆能達到與全編織模型同樣之結果。

# Investigating Ballistic Impact Behaviors of Woven Fabric Using Finite Element Analysis

Student : Tzu-Chen Lin

Advisor : Dr. Jia-Lin Tsai

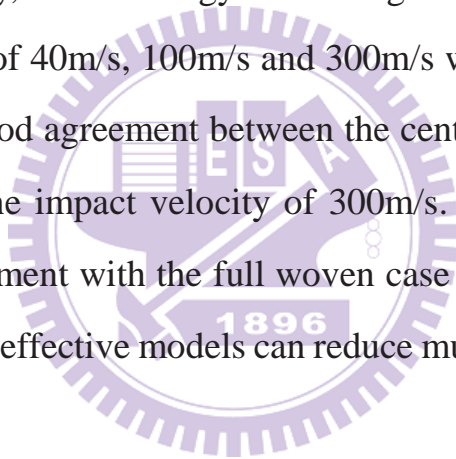
Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

This research aims to investigate the ballistic impact behaviors of woven fabric and its energy absorption using finite element analysis. The representative volume element (RVE) model was employed to observe the inter-fiber friction effect on the effective shear modulus. With the increment of the compressive stress through thickness direction, the effective shear modulus gradually enhanced. Increasing the coefficient of inter-fiber friction enhanced the equivalent shear modulus with the same compressive stress. According to the simulation of the ballistic impact of a single-ply woven fabric, the effects of the equivalent shear modulus, friction between yarns, geometry and boundary conditions of woven fabric are studied by observing the projectile velocity and energy transformation histories. Modeling results show that the lower equivalent shear modulus of the woven fabric contributed to delaying fabric failure, and caused the anti-bullet capability enhanced. In the conditions such as no inter-fiber friction or double span woven fabrics, yarns are sliding

easily and causing poor resistance against bullets. In different boundary conditions of woven fabrics during ballistic impact, the strain wave propagated faster at the constrained boundaries than at the free boundaries. Thus the fabric can effectively reduce the projectile residual velocity when four edges were clamped.

In order to analyze multilayer woven fabric during ballistic impact effectively, this research presents a single-scale hybrid element model to simulate the 1-ply and 3-ply woven fabrics. This technique involves modeling the central-patch model and center-cross model. The projectile velocity histories, internal energy, kinetic energy and sliding energy of the woven fabrics with impact velocities of 40m/s, 100m/s and 300m/s were investigated. It was found that there is a good agreement between the central-patch model and the full woven model in the impact velocity of 300m/s. The center-cross model shows very good agreement with the full woven case in three kinds of impact velocity. Moreover, the effective models can reduce much computing time than the full woven model.



## 致謝

兩年的研究生活即將進入尾聲，意味著準備踏入人生另一個階段。承蒙指導教授 蔡佳霖博士這段時間的諄諄教誨，在研究上給予許多指導與幫助，使我得到許多學習機會以及生活中待人處事的經驗及態度，在此致上由衷的感謝。同時感謝清華大學動機系葉孟考教授和工業技術研究院邱佑宗博士撥冗擔任學生口試委員，並且在研究上給予寶貴建議，使得本論文能夠更加完善。接著需要感謝實驗室裡一同奮戰的夥伴們李佳旻和聶奕心，以及實驗室學長許嵩群、劉少淇、賴彥鋇、黃健洋、王泰元、莊文彥、高德威在這兩年來給予許多幫助及建議，使我收穫良多。此外感謝羅品冠、李脩毓、唐光樾、卓星伯在研究與生活中的陪伴，使得實驗室生活更多采多姿。一路上走來更需要感謝從大學時期就一起努力的崔哲豪、卓炳勳、黃凱暉、莊柏峯、周佩儀等人，雖然大家分隔多處依然會互相加油砥礪，讓我備感窩心，未來還需要各位的協助使我更有動力面對之後的挑戰。最後，更要感謝家父林承弘先生和家母吳翠玲女士，在漫長的求學生涯中默默的鼓勵、支持與體諒，使我能夠無後顧之憂的學習，以順利完成碩士學位。如今求學生涯即將告一段落，感謝一路上支持我、幫助我以及看好我的人。

林子晨 謹誌

中華民國 102 年 7 月

# 目錄

摘要 .....	i
Abstract .....	iii
致謝 .....	v
目錄 .....	vi
表目錄 .....	ix
圖目錄 .....	x
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機與文獻回顧 .....	1
1.2 研究目標與方法 .....	11
第二章 探討單層纖維編織布受衝擊時之動態響應行為 .....	12
2.1 衝擊分析方法 .....	12
2.1.1 隱性求解法與顯性求解法 .....	12
2.1.2 時間步階控制(Time Step Control) .....	14
2.2 纖維材料剪力模數的影響 .....	15
2.3 纖維摩擦力的影響 .....	21
2.4 纖維跨距的影響 .....	24



2.5 編織布邊界條件的影響.....	27
第三章 建立簡化等效纖維編織布分析模型.....	30
3.1 單層纖維編織布簡化模型建立.....	30
3.1.1 全編織實體元素模型建立.....	30
3.1.2 等效模型建立.....	31
3.1.2.1 矩形等效模型.....	31
3.1.2.2 十字形等效模型.....	32
3.1.3 等效區域之材料參數.....	33
3.2 單層纖維編織布簡化模型結果討論.....	37
3.2.1 衝擊速度 $V_0=40\text{m/s}$ .....	37
3.2.2 衝擊速度 $V_0=100\text{m/s}$ .....	38
3.2.3 衝擊速度 $V_0=300\text{m/s}$ .....	40
3.3 三層纖維編織布簡化模型建立.....	41
3.4 三層纖維編織布模型結果討論.....	42
3.4.1 衝擊速度 $V_0=40\text{m/s}$ .....	42
3.4.2 衝擊速度 $V_0=100\text{m/s}$ .....	43
3.4.3 衝擊速度 $V_0=300\text{m/s}$ .....	44
3.5 實驗結果比較.....	46
第四章 結論與未來工作.....	48

4.1 結論.....	48
4.2 未來工作.....	50
參考文獻.....	52
附表.....	55
附圖.....	59



## 表目錄

表 2.1 纖維之材料常數[11].....	55
表 2.2 編織布之幾何參數[11].....	55
表 2.3 編織布之材料常數[11].....	56
表 2.4 鋼質圓球之材料常數.....	56
表 2.5 雙跨距編織布之幾何參數.....	56
表 2.6 編織布元素數量收斂性.....	57
表 2.7 比較不同邊界條件編織布受衝擊後圓球之末速度( $t=80\mu\text{s}$ ).....	57
表 3.1 等效模型之幾何參數與材料參數.....	58
表 3.2 單層及三層纖維編織布模型運算時間比較.....	58



## 圖目錄

圖 2.1 平織布橫截面之顯微照片圖[11].....	59
圖 2.2 編織布纖維束截面圖[23].....	59
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 .....	60
圖 2.4 編織布纖維之代表性單元體有限元素模型.....	60
圖 2.5 編織布纖維代表性單元體之邊界條件設定.....	61
圖 2.6 代表性單元體的座標系統及尺寸示意圖.....	61
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 視圖.....	62
圖 2.8 代表性單元體壓應力與壓縮位移之關係圖.....	62
圖 2.9 代表性單元體等效剪力模數與壓應力之關係圖.....	63
圖 2.10 不同摩擦係數下，等效剪力模數與壓應力之關係圖.....	63
圖 2.11 鋼球撞擊單層編織布初始狀態之幾何模型.....	64
圖 2.12 纖維編織布有限元素模型之橫截面.....	64
圖 2.13 單層編織布有限元素模型.....	65
圖 2.14 纖維束之元素座標方向.....	65
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 .....	66
圖 2.16 比較編織布四邊固定時纖維摩擦係數之變形圖( $t=80\mu\text{s}$ ).....	67

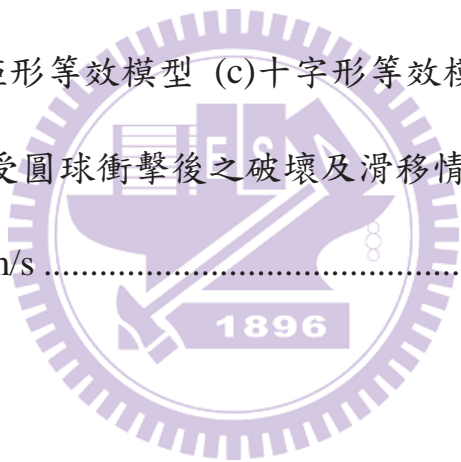
圖 2.17 不同摩擦係數的纖維編織布受衝擊後(a)圓球之速度歷程 (b)編織布應變能變化(c)編織布摩擦耗能變化 (d)編織布動能變化 .....	68
圖 2.18 編織布四邊固定受衝擊時能量轉移曲線圖， $\mu=0.5$ .....	69
圖 2.19 編織布四邊固定受衝擊時能量轉移曲線圖， $\mu=0$ .....	69
圖 2.20 鋼球撞擊單層雙跨距編織布初始狀態之幾何模型.....	70
圖 2.21 雙跨距平織布有限元素模型之橫截面.....	70
圖 2.22 單層雙跨距編織布有限元素模型.....	71
圖 2.23 比較雙跨距編織布四邊固定時纖維摩擦係數之變形圖( $t=80\mu s$ ) .....	71
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 .....	72
圖 2.25 雙跨距編織布四邊固定受衝擊時能量轉移曲線圖， $\mu_{y-y}=0.5$ ...	73
圖 2.26 比較跨距及摩擦力對於鋼球之速度-時間歷程 .....	73
圖 2.27 編織布四邊固定受衝擊之側視圖及下視圖， $\mu_{y-y}=0.5$ .....	74
圖 2.28 編織布兩邊固定受衝擊之側視圖及下視圖， $\mu=0.5$ .....	75
圖 2.29 編織布四邊無拘束受衝擊之側視圖及下視圖， $\mu=0.5$ .....	76
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 .....	77
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.....	78

圖 3.1 全編織實體元素模型上視圖(四分之一模型).....	79
圖 3.2 矩形等效模型上視圖(全模型).....	79
圖 3.3 編織區域與平板區域之交介面有限元素模型圖.....	80
圖 3.4 十字形等效模型上視圖(全模型).....	80
圖 3.5 入射波、透射波與反射波示意圖.....	81
圖 3.6 HEA 模型幾何尺寸示意圖.....	81
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.....	82
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.....	83
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( $t=200\mu s$ ).....	84
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.....	85
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 .....	86
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( $t=60\mu s$ ).....	87
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.....	88
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 .....	89
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).....	90
圖 3.16 三層編織布有限元素模型(a)等角視圖 (b)側視圖 .....	91
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	92
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 .....	93
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).....	94
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 .....	95
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 .....	96
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).....	97
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).....	98



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( $t=60\mu\text{s}$ ).....	99
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 .....	100
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 .....	101
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( $t=10\mu\text{s}$ ).....	102
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 .....	103





# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與文獻回顧

防彈衣(ballistic vest)於軍警用途中扮演著極重要的角色，其可分為硬式、軟式及軟硬複合式。硬式防彈背心通常由金屬或陶瓷組成，但質量較大且受撞擊後容易龜裂；而軟式防彈背心通常使用 Kevlar 為材料，Kevlar 具高強度之特性，且密度僅為鋼鐵的五分之一，與硬式防彈背心相比有輕巧及靈活等優勢。因此，Kevlar 纖維編織布之研究引起廣大的重視，藉由衝擊實驗可測量纖維編織布受子彈衝擊後之破壞行為以及抗彈能力，但大量衝擊實驗需花費大量時間與成本，故本研究使用有限元素分析法模擬纖維編織布受子彈衝擊之行為，將可大幅減少衝擊實驗所需之資源，並與衝擊實驗結果作比較，達到預估纖維編織布抗彈能力之效果。

在過去研究防彈衣衝擊之文獻中，學者對於單層編織布受衝擊之行為有諸多的探討。Duan 等人[1]以有限元素法(finite element analysis)建立出單層平織布模型，探討平織布受到剛性圓球的高速衝擊下，平織布不同邊界條件以及纖維束間摩擦係數對於吸收衝擊物動能多寡的影響。當不考慮平織布的破壞情形，衝擊物損失的動能(loss of projectile kinetic energy)會等於編織布本身動能(yarn kinetic energy)、應變能(yarn strain energy)及摩擦耗能(friction sliding dissipated energy)之總和。當編織布邊界條件為四

邊固定時，衝擊物損失的動能主要以轉換成編織布應變能為主；而當編織布邊界條件為四邊皆不受拘束時，衝擊物損失的動能主要以轉換成編織布動能為主。

Duan 等人[2]亦探討當考慮邊界條件為四邊固定之平織布有破壞行為時其受衝擊之現象，定義纖維的 von Mises 應力(von Mises stress)為破壞準則，因此當某一元素在計算中達到破壞準則時，此元素會在計算中被刪除，因此當編織布開始發生破壞後，編織布本身動能、應變能及摩擦耗能之總和則會小於衝擊物損失的動能。此外，當衝擊物與編織布間之摩擦係數愈大，衝擊物損失的動能亦隨之變大。

Duan 等人[3]亦探討邊界條件分別為四邊固定及兩邊固定之平織布在有破壞行為時受衝擊之現象，以纖維的 von Mises 應力為纖維之破壞準則，比較摩擦係數在兩種不同邊界條件之下編織布受衝擊的影響，探討編織布受到衝擊後剛性圓球之末速度、衝擊力及編織布吸收之總能量。結果發現，摩擦係數較大時會延緩編織布破壞的時間，並且對於圓球會造成較大的衝擊力，而當延緩編織布破壞的時間，便能增加編織布吸收之總能量，使圓球穿透編織布後之末速度較低。不同邊界條件對於增加摩擦係數之作用亦有影響，當編織布邊界條件為兩邊固定時，增加摩擦係數可使編織布吸收之能量提升較多。

Duan 等人[4]亦研究圓柱形之衝擊物對於單層編織布受衝擊之行為，

考慮當編織布有破壞行為發生時，圓柱衝擊於編織布後，衝擊物之速度變化。在低速撞擊下，編織布邊界條件為四邊固定時，衝擊物速度下降最快，但破壞現象發生最早；當編織布邊界條件為四邊皆不受拘束時，衝擊物速度下降最慢，其編織布較不容易發生破壞，因此衝擊物速度減少量較多。而在高速撞擊下，編織布之邊界條件對於衝擊物之速度則無影響。

Talebi 等人[5]建立不同角度之圓錐形子彈，探討不同子彈衝擊於編織布後，子彈損失的動能與彈頭角度之關係。結果發現，當彈頭角度較小時，編織布之破壞模式主要以穿刺型(wedging)破壞為主；而當彈頭角度較大時，編織布之破壞模式主要以剪力型(shear)破壞為主。再根據各種角度之子彈損失的動能以及編織布斷裂之數量作統整，發現角度為  $60^\circ$  之彈頭對於編織布可造成最大的破壞。

以上文獻[1-5]探討了單層纖維編織布材料性質、幾何條件、摩擦係數、邊界條件以及彈頭形狀之影響。但由於編織布的幾何形狀較複雜導致元素數量較多，在有限元素法運算中會花費許多運算時間，因此有學者提出簡化等效模型來減少分析運算時間。

Grujicic 等人[6]於有限元素法分別利用實體元素以及薄殼元素建立編織布模型，觀察子彈-編織布間摩擦係數及纖維束間摩擦係數對於子彈損失之動能的影響，並比較編織布受衝擊時之變形及破壞情形。根據能量守恆定理，衝擊物損失的動能應等於編織布本身動能、應變能及摩擦耗能

之總和。結果顯示，不論利用實體元素及薄殼元素建立編織布模型，衝擊物損失的動能與編織布本身動能、應變能及摩擦耗能三項總和之誤差皆低於 5%，表示兩模型皆可達到能量守恆。模擬結果顯示，薄殼元素模型編織布本身動能、應變能及摩擦耗能之趨勢與實體元素模型結果不太一致，原因為薄殼元素模型其網格較粗；而實體元素模型其網格較密，因此造成兩者結果之差異。此外，使用薄殼元素模擬可減低運算時間，運算量約為實體元素的五分之一。

Nilakantan 等人[7]使用有限元素法建立實體元素編織布，分別設定接觸類型為自動型單面接觸及自動型面對面接觸，以此作為比較之基準。並使用單尺度混合元素分析法(single-scale hybrid element analysis, single-scale HEA)，將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薄殼元素，兩介面之間設定拘束方程式以避免應力波傳遞時產生反射現象，模擬結果發現 HEA 模型在衝擊過程中，衝擊物之速度歷程、內能、摩擦耗能以及接觸力與實體元素編織布模型之結果相符合，且 HEA 模型可節省運算時間，做為模擬分析之方法較有效率。

然而，單尺度混合元素分析法仍然需要建立編織結構進行模擬，因此有學者將編織布模型遠離撞擊區域的部分改建為均質薄殼平板，先利用實驗結果或全編織模型作為比較基準，採用試誤法(trial-and-error approach)以得到均質平板的材料性質[8, 9]。由於試誤法必須重複進行運算找出最



接近基準值的結果，故 Nilakantan[10, 11]等人認為試誤法並非一個有效率的方法，因此提出一套方法來求得質平板的材料性質：當編織布受衝擊後，編織結構與均質平板兩介質間阻抗(impedance)應要相同，應力波在傳遞時不會產生反射波，利用此關係可得等效材料性質。Nilakantan 等人更進一步探討多尺度之混合元素分析模型(multi-scale HEA models)，將模型最靠近撞擊點之局部區域(local region)建為實體元素編織布，次要局部區域建為薄殼元素編織布，最後整體區域(global region)建為等效薄殼元素平面。同樣於實體元素編織布與薄殼元素編織布兩介面之間設定拘束方程式以避免應力波傳遞時產生反射現象，而在等效薄殼元素平面部分利用兩介面間阻抗相等為等效之依據，計算出等效平板的材料常數，建立一個多尺度之混合元素分析模型，觀察衝擊過程中衝擊物之速度歷程、內能、摩擦耗能以及接觸力，並與根據文獻[7]之模擬結果，同時比較實體元素編織布模型、單尺度 HEA 模型以及多尺度 HEA 模型，觀察三種模型的衝擊物速度歷程、內能、摩擦耗能以及接觸力。模擬結果比較顯示，單尺度 HEA 模型的結果優於多尺度 HEA 模型，但是多尺度 HEA 模型依然能表現實體元素編織布模型受衝擊之行為，且運算時間更為縮短，往後欲模擬較大尺寸的編織布模型將更為便利。

Ha-Minh 等人[12]將 Nilakantan 等人提出的多尺度混合元素分析模型進行簡化，省略了實體元素編織布，將模型最靠近撞擊點之局部區域建為

薄殼元素編織布，整體區域建為等效薄殼元素平面，並與全編織薄殼元素模型進行比較，探討等效區域面積對於衝擊物速度歷程、內能、摩擦耗能以及接觸力之影響。模擬結果比較顯示，當編織布受衝擊後之側向應變(transverse strain wave)傳遞至等效區域時，其衝擊物速度歷程及接觸力歷程便會與全編織模型之結果產生差異，因此當等效區域面積愈小，與全編織模型的模擬結果愈相近。

現實中防彈衣通常是由多層抗彈布所組成，諸多學者也利用有限元素分析法探討多層抗彈布受衝擊之行為。Chocron 等人[13]利用有限元素法建立十層實體元素編織布，藉由探討編織布受衝擊後底部之位移(Apex position)以及凹陷擴展距離(Diagonal extent)比較兩種彈頭形狀衝擊之結果，並與實驗結果作比較，結果顯示編織布受衝擊後底部之位移與凹陷擴展距離在模擬上可準確預估衝擊實驗之結果。

在多層編織布的模擬方面，Gogineni 等人[14]對於單層及多層編織布亦有深入之探討，首先定義纖維的拉伸應變(Failure strain in tension)為破壞準則，預測單層編織布受剛性圓柱體衝擊時，衝擊物在不同初速度之下穿透編織布後之末速度，並與 Tan 等人[15]文獻之實驗結果比較，結果顯示，使用有限元素法模擬可準確預測圓柱體穿透編織布後之末速度，與實驗測量之誤差皆小於 6%。其次探討衝擊物之初速度對於編織布應變能及摩擦耗能之影響，結果發現，衝擊物之初速度較小時，會延遲編織布發生

破壞的時間，造成編織布有較大的變形，故編織布應變能及摩擦耗能皆會較大。學者亦分別探討一至四層編織布受衝擊之行為，結果發現當編織布層數愈多，衝擊物穿透編織布後之末速度愈小，而由於編織布發生破壞的時間愈晚，因此編織布應變能較大。

在實驗方面，Tan 等人[15]探討不同子彈衝擊於邊界條件為兩邊固定之單層編織布後，子彈損失的動能與彈頭形狀之關係。實驗中使用彈頭形狀分別為半圓形(hemispherical)、平面形(flat)、尖頂形(ogival)及圓錐形(conical)，首先分別由 50m/s 至 700m/s 撞擊於編織布上，測量子彈穿透編織布之末速度，結果發現圓錐形彈頭穿透編織布時所需之初速度最低，其次分別為平面形彈頭與尖頂形彈頭，而半圓形彈頭穿透編織布所需之初速度最高。且子彈在相同初速度之下，當半圓形彈頭衝擊時，編織布吸收之能量最大；當圓錐形彈頭衝擊時，編織布吸收之能量最小。

Rao 等人[16]進行紗線拉伸測試(yarn pull-out test)來測量編織布間之摩擦係數，測得纖維間動摩擦係數大約介於 0.15~0.20 之間。接著利用有限元素法模擬剛性球體撞擊於編織布上，探討有無摩擦力對於球體撞擊後速度變化之影響。衝擊模擬結果發現，當編織布間有摩擦力時，球體撞擊後速度減低趨勢較快。作者更探討編織布本身材料性質對於抗衝擊之影響，藉由改變編織布纖維方向之楊氏係數(longitudinal tensile modulus)及拉伸強度(tensile strength)探討材料特性對於球體撞擊後速度變化。由模

擬結果可得知，當編織布纖維方向之楊氏係數較大時，球體撞擊後速度減低率(velocity decreasing rate)較大；當編織布纖維方向之拉伸強度較大時，由於其較不易發生破壞，因此編織布作用於球體的時間較長。

Tan 等人[17]於編織布本身之材料性質及摩擦力的影響也有相關研究，作者將欲測量的編織布浸泡於不同濃度之二氧化矽水溶液中(silica-water suspension,SWS)。首先進行紗線拉伸測試測量編織布間摩擦係數，再利用空氣槍進行子彈衝擊試驗(ballistic impact tests)，測量單層及多層編織布受子彈衝擊時，子彈可穿透之極限速度(ballistic limits)。實驗結果發現，當浸泡的二氧化矽水溶液濃度為 40%時，編織布之摩擦係數最高，子彈射擊之極限速度較大，因此抗彈能力也最為良好；而未浸泡二氧化矽水溶液的編織布摩擦係數較低，子彈射擊之極限速度較小，抗彈能力也明顯較差。

Dong 與 Sun[18]更進一步探討各種纖維編織布之機械行為：包含衝擊試驗、纖維摩擦力測試、紗線拉伸試驗及紗線拉伸模擬。首先在衝擊試驗方面，將一個直徑 7mm 的鋼球以 215m/s 之速度衝擊於兩邊固定之纖維編織布上，並比較各纖維編織布每單位重量所消耗之動能(dissipated kinetic energy)，結果發現編織愈緊密的纖維編織布其消耗鋼球之動能愈多，表示其抗彈能力愈佳。纖維摩擦力測試方面，測量各編織布的跨纖維束之摩擦係數(cross-yarn friction)及平行纖維之摩擦係數(parallel-fiber friction)，發現摩擦係數大約介於 0.2~0.39 之間。在紗線拉伸試驗方面，



分別測量各纖維編織布其經線(warp)與緯線(weft)方向的拉伸力(pull-out force)，結果發現編織愈緊密的纖維編織布其拉伸力愈大，表示其需要較大的力才能使纖維束間產生滑移，因此吸收消耗之動能亦較多，此外由於纖維編織布製程的因素，經線方向的拉伸力會大於緯線方向之力。在紗線拉伸模擬部分，依照實驗測量之纖維編織布建立 2D 模型進行分析並計算纖維編織布之拉伸力，結果發現與實驗結果相符合，接著利用有限元素法模擬進行參數研究(parametric study)，探討紗線數量(fabric count)、纖維直徑(fiber diameter)、纖維楊氏係數(fiber modulus)、紗線起伏(yarn waviness)以及摩擦力(friction)對於拉伸力之影響，最後可得知拉伸力之函數，因此利用所得到的函數即可有效率地計算出各種纖維編織布的拉伸力，且發現若須提升纖維編織布的拉伸力，增加紗線數量最有效果，其次為纖維直徑、纖維楊氏係數、紗線起伏以及摩擦力。

從上述文獻整理，對於纖維編織布抗彈能力研究，可藉由子彈損失的動能、子彈速度變化以及纖維編織布底部位移量等物理量作為比較之依據，來探討纖維編織布材料性質、幾何條件、摩擦係數、邊界條件以及彈頭形狀之影響。但在文獻中的編織布都是以紗線尺度(yarn scale)之模型作探討，紗線材料的剪力模數為一個假設之參數，尚無法提供有效完整的資訊。本研究中將對於纖維尺度(fiber scale)的纖維束加以探討，計算出簡化

為紗線尺度後之剪力模數，再依照計算出的剪力模數建立纖維編織布有限元素模型，探討幾何條件、摩擦係數、邊界條件對於抗衝擊能力之影響。

在結構方面，文獻中對於編織布的分析大多為單跨距平織法進行探討，對其他編織方法少有研究，故在本研究中特別針對雙跨距平織法模型進行衝擊分析模擬，並比較與單跨距平織法受衝擊之差異。

另一方面，文獻中對於簡化編織布模型已探討過單尺度 HEA 模型以及多尺度 HEA 模型，但上述之簡化模型皆有使用薄殼元素編織區域，而薄殼元素運用於編織布模型上會無法表示纖維束厚度方向之變形。因此本研究中將省略薄殼元素編織部分來建立簡化編織布模型，比較不同的簡化編織布模型受衝擊之行為。最後再對於已簡化之模型進行多層分析，有效地達到利用模擬來預估防彈衣受子彈衝擊之行為。

## 1.2 研究目標與方法

本研究主要以鋼製圓球與 Kevlar 材料抗彈布進行討論，首先研究纖維材料剪力模數的影響，以微觀力學的角度建立纖維模型，探討纖維束由纖維簡化為紗線尺度後之等效剪力模數，接著以有限元素分析建立紗線尺度的有限元素分析纖維編織布模型，觀察受圓球撞擊後圓球速度與時間之關係以及能量消散情形，並探討纖維編織布剪力模數、邊界條件、幾何排列及纖維束間摩擦係數對於圓球速度之影響。接著再將單層全編織模型進行簡化，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等效平板薄殼元素，利用兩介質間阻抗相同為等效依據，得到等效部分之材料常數。最後，建立多層簡化模型來模擬實際防彈衣材料，比較全編織模型與簡化模型受到鋼球衝擊後，衝擊物速度變化、纖維編織布位能變化、動能變化以及摩擦耗能變。

## 第二章 探討單層纖維編織布受衝擊時之動態響應行為

### 2.1 衝擊分析方法

在現實生活中，掉落與衝擊之現象處處可見，例如汽車碰撞、手機摔落及子彈衝擊，在工業上之領域更為廣泛，例如金屬沖壓成型、電子儀器產品掉落測試、震動問題、土木結構分析、板金成型...等。此類現象皆屬於瞬間反應，並使結構產生巨大之變形，遠超過靜力分析所及之範圍，因此需使用有限元素分析法(Finite Element Analysis)的數值分析方法進行模擬。而在子彈衝擊過程中會產生材料非線性、幾何非線性及複雜之接觸問題，其中 LS-DYNA[19]有限元素分析軟體具備龐大的材料及元素資料庫，其顯性求解法(Explicit Method)對於衝擊及碰撞問題可準確演算短時間之暫態行為，故在本研究中使用 LS-DYNA 作為分析研究之工具。

#### 2.1.1 隱性求解法與顯性求解法

在 LS-DYNA 中，採用顯性積分法處理與時間有關之積分式，適用於動態演算瞬間發生的行為，與隱性求解法(Implicit Method)相較之下，優點是不需花費大量時間計算反矩陣。方程式(2-1)為能量平衡方程式：[20]

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = [P] \quad (2-1)$$

其中  $M$  為質量， $C$  為阻尼係數， $K$  為彈性係數， $P$  為外力負載。在隱性求解法中，當時間為  $t + \Delta t$  時其描述方式如方程式(2-2)所示：

$$[M]\ddot{x}_{t+\Delta t} + [C]\dot{x}_{t+\Delta t} + [K]x_{t+\Delta t} = [P]_{t+\Delta t} \quad (2-2)$$

可發現隱性求解法所描述之位移、速度及加速度在時間為  $t + \Delta t$  時會互相影響，因此在計算中必須重複疊代使得外力負載與位移、速度及加速度平衡或收斂，以進行下一個時間步階之運算。而在顯性求解法中，當時間為  $t + \Delta t$  時其描述方式如方程式(2-3)所示：

$$[M]\ddot{x}_{t+\Delta t} = [P]_t - [C]\dot{x}_t - [K]x_t \quad (2-3)$$

可發現顯性求解法所描述之加速度是由時間為  $t$  時之位移、速度及外力負載所得，不需作重複疊代之運算，只要時間步階夠小則計算誤差即可減少，因此顯性求解法與隱性求解法相較之下可減少許多運算時間。因此顯性求解法可先求得各節點在時間為  $t$  時之加速度如方程式(2-4)：[19]

$$\{a_t\} = [M]^{-1} \left( [F_t^{ext}] - [F_t^{int}] \right) \quad (2-4)$$

其中  $[F_t^{ext}]$  為外力及慣性力， $[F_t^{int}]$  為內部應力及接觸力等內力。接著可求解速度值如方程式(2-5)以及位移值如方程式(2-6)：

$$\{v_{t+\Delta t/2}\} = \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\}\Delta t_t \quad (2-5)$$

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} \Delta t_{t+\Delta t/2} \quad (2-6)$$

最後可藉由位移求得各節點在時間為  $t + \Delta t$  時之幾何位置如方程式(2-7)：

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\} \quad (2-7)$$

其中  $\{x_0\}$  為各節點之初始位置。

### 2.1.2 時間步階控制(Time Step Control)

由於隱性積分法為無條件式穩定，即使時間步階極大亦會收斂；反之，顯性積分法為有條件式穩定，必須時間步階非常小時才會穩定。在 LS-DYNA 中，時間步階的控制是由軟體自行選取最小元素所決定，其最小時間步階  $\Delta t$  公式計算如方程式(2-8)所示：

$$\Delta t = k \frac{\Delta l}{C} = k \frac{\Delta l}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (2-8)$$

其中  $\Delta l$  為最小元素之最大對角線長度， $C$  為彈性波在介質中之波速， $E$  為材料之楊氏係數， $\rho$  為材料之密度。為了避免時間步階過大，故乘上一個安全係數(Safe factor)為  $k$  ( $k < 1$ )，預設值為 0.9 以確保在模擬分析中可穩定。本研究中為了求解更精確之分析結果，在此將安全係數縮小為 0.6。



## 2.2 纖維材料剪力模數的影響

一般軟式防彈衣通常為多層平織布所組成，圖 2.1 為單層 Kevlar 平織布橫截面之顯微照片圖[10]。由圖中可觀察平織布的編織法為許多上下起伏的經線(warp yarns)及緯線(fill yarns)相互垂直排列而成，而每一束紗線是由無數根纖維所組成，其截面形狀為橢圓狀，並且沿著正弦波之路徑延伸。為了探討纖維束由纖維簡化為紗線尺度後之等效剪力模數，首先本研究使用有限元素分析套裝軟體 ANSYS[21]以微觀力學的角度建立纖維模型。圖 2.2 為編織布纖維束截面圖[22]，可觀察纖維的排列情形近似為緊密排列狀，因此假設纖維排列為六角形排列如圖 2.3(a)所示，因此取其代表性單元體(representative volume element, RVE)如圖 2.3(b)所示，纖維直徑為 0.025mm，依照圖 2.3(b)所建立之有限元素模型如圖 2.4 所示，主要使用的元素為 SOLID185，纖維長度為 0.05mm，根據文獻[10]中纖維方向之材料性質，在此設纖維為等向性材料如表 2.1，並建立接觸元素 (TARGE170 及 CONTA173)以防止纖維間發生穿透現象。

由於編織布的纖維束為縱橫交錯並上下起伏，因此就單束纖維來觀察，會受到沿厚度方向壓縮之力量，而隨著此壓縮力的不同，其機械行為亦有所差異，故在此分析中分為兩個步驟：第一步先給定 Y 方向之位移於上下表面，其邊界條件示意圖如圖 2.5(a)所示，當第一步驟到達平衡後即對代表性單元體做週期性邊界條件之處理，其座標系統及示意圖如

圖 2.6 所示。

在  $x=0$  及  $x=a$  之平面上之節點：

$$u(0, y, z) - u(a, y, z) = \text{constant} \quad (2-9a)$$

$$v(0, y, z) - v(a, y, z) = \text{constant} \quad (2-9b)$$

$$w(0, y, z) - w(a, y, z) = \text{constant} \quad (2-9c)$$

在  $y=0$  及  $y=b$  之平面上之節點：

$$u(x, 0, z) - u(x, b, z) = \text{constant} \quad (2-10a)$$

$$v(x, 0, z) - v(x, b, z) = \text{constant} \quad (2-10b)$$

$$w(x, 0, z) - w(x, b, z) = \text{constant} \quad (2-10c)$$

在  $z=0$  及  $z=c$  之平面上之節點：

$$u(x, y, 0) - u(x, y, c) = \text{constant} \quad (2-11a)$$

$$v(x, y, 0) - v(x, y, c) = \text{constant} \quad (2-11b)$$

$$w(x, y, 0) - w(x, y, c) = \text{constant} \quad (2-11c)$$

接著開始進行第二步驟，將下表面角落四個節點分別拘束，其自由度示意圖如圖 2.5(b)所示，並將上表面給定 Z 方向之微小位移量，藉由計算上表面之面積以及節點力總和，即可求得代表性單元體模型之剪應力。



$$\tau = \frac{\sum F}{A} \quad (2-12)$$

其中  $\sum F$  為代表性單元體模型上表面節點力總和， $A$  為上表面之面積， $\Delta z$  為上表面 Z 方向之微小位移量。而圖 2.7(a) 為代表性單元體模型節點 Z 方向位移分布圖及變形後之側視圖，在此將模型簡化如圖 2.7(b) 所示，計算上表面節點之位移量即可求得代表性單元體模型之剪應變，其關係式如下：

$$\gamma = \frac{\Delta z}{h} \quad (2-13)$$

其中  $\Delta z$  為上表面 Z 方向之微小位移量， $h$  為代表性單元體模型之高度。由式(2-12)及式(2-13)可計算出纖維束由纖維尺度簡化為紗線尺度後之等效剪力模數：

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2-14)$$

藉由改變第一步驟之壓縮位移量，即可探討單束纖維沿厚度方向壓縮力的不同，對於紗線尺度之等效剪力模數的影響，首先觀察等效單元體受到壓縮位移量後的壓應力如圖 2.8，可發現當纖維束壓縮位移由 0.6nm 增加至 10nm 時，則壓應力會由 0.64MPa 逐漸上升為 8.52MPa。接著觀察

不同壓應力下的等效剪力模數，其元素收斂性結果如圖 2.9 所示。根據收斂之分析結果可發現當纖維束壓應力為 0.64MPa 時，等效剪力模數約為 0.43GPa，而纖維束壓應力由 0.64MPa 增加至 8.52MPa，其計算出等效剪力模數會由 0.43GPa 增加至 5.22GPa，表示壓應力對於等效剪力模數之影響可達到 10 倍差異。若比較纖維間摩擦係數對於等效剪力模數之影響如圖 2.10，可發現當纖維間摩力愈大，計算出等效剪力模數亦隨之增加。因此在本節中將繼續探討纖維編織布在紗線尺度下，剪力模數對於編織布受衝擊時的影響。

本研究以參數化建立鋼球撞擊單層單跨距編織布之有限元素模型，圖 2.11 為圓球與單跨距編織布初始狀態之幾何模型：一個半徑為 4mm 之鋼球垂直入射於正方形編織布的中心點上，編織布尺寸為 52.04mm × 52.04mm，平織布有限元素模型之橫截面如圖 2.12 所示，其截面之幾何參數如表 2.2 所示。每一束紗線沿著餘弦波之路徑延伸，其相鄰兩束纖維的函數如方程式(2-15)及方程式(2-16)所示：

$$z = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} y\right) \quad (2-15)$$

$$z = -A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} y\right) \quad (2-16)$$

其中  $A$  為餘弦波之振幅，在此與纖維厚度相同； $\lambda$  為正弦波之波長，在

此為跨度的兩倍。

根據圖 2.11 及圖 2.12 基本尺寸所建立的有限元素模型如圖 2.13 所示，由於纖維束沿著餘弦波之路徑延伸，因此需定義元素座標方向如圖 2.14 所示。邊界條件為編織布四邊固定，由於此模型對稱於 x-z 平面以及 y-z 平面，因此只須建立四分之一來模型進行分析。此模型採用適用於顯性動態分析之一階八節點實體元素(SOLID164)作為分析元素類型，每個節點有 9 個自由度( $u_x, u_y, u_z, v_x, v_y, v_z, a_x, a_y, a_z$ )，編織布性質為正交線彈性材料(Orthotropic elastic material)，材料常數列於表 2.3 中，其中垂直纖維方向的楊氏係數  $E_{22}$  與  $E_{33}$  較小，假設為纖維方向楊氏係數  $E_{11}$  的百分之一。為了探討紗線尺度下之剪力模數對於編織布受衝擊時的影響，且由代表性單元體模擬得到之結論，在此剪力模數分別設為 0.328GPa 以及 3.28GPa 做比較。並使用 \*MAT\_ADD\_EROSION 來定義材料之破壞行為，由於纖維方向的楊氏模數( $E_{11}$ )較其他兩方向的楊氏模數高出許多，因此最大主應力(Maximum principle stress)會趨近於纖維方向之應力，故在此將破壞準則設定為最大主應力，若某一元素在計算中之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。圓球只允許沿著 z 方向移動，材料為鋼材，初速度設為 100m/s，其材料常數列於表 2.4 中。

此外，物體在接觸碰撞類型之設定分為兩部分：圓球與編織布間摩擦

以及編織布經線與緯線之間摩擦使用自動型單面接觸(Contact Automatic Single Surface)來定義接觸行為。本研究將圓球與編織布間摩擦係數以及編織布纖維之間摩擦係數設為 0.5，觀察纖維編織布受圓球衝擊後，圓球之速度歷程、編織布動能及應變能變化與摩擦耗能，探討編織布纖維材料剪力模數之影響。首先本研究針對編織布進行模型網格收斂性驗證，以剪力模數為 3.28GPa 的編織布為分析模型，藉由鋼球衝擊編織布後之餘速作為判斷是否達到元素收斂之依據，表 2.6 為不同元素數量下的收斂性結果，當元素數量為 173,052 時，由表中可發現鋼球衝擊編織布後之餘速與元素數量為 288,420 的編織布誤差為 0.18%，故在此判斷元素已達到收斂，在本研究中將選取元素數量為 173,052 的纖維編織布模型進行比較分析。

纖維編織布受衝擊後之圓球之速度歷程、編織布應變能變化、編織布摩擦耗能變化以及編織布動能變化如圖 2.15 所示，圖中顯示當剪力模數為 3.28GPa 時，圓球會於衝擊後 40 $\mu$ s 時穿透編織布；而當剪力模數為 0.328GPa 時，圓球會於衝擊後 67 $\mu$ s 時穿透編織布，可明顯發現當剪力模數較低時，纖維編織布發生破壞的時間點較晚，因此剪力模數較低時，圓球穿透編織布後之末速度較低，如圖 2.15(a)所示，且由於編織布作用時間增長許多，故摩擦耗能亦提升許多，如圖 2.15(c)所示。此外由於較低的剪力模數其編織布抗彎矩能力較差，因此受衝擊後變形量也會較大，故

編織布的應變能及動能會提升許多，如圖 2.15(b)與圖 2.15(d)所示。

根據本節探討剪力模數對於編織布受衝擊時的影響，結果發現剪力模數會對於破壞發生時間產生影響，由於實際編織布之抗彎能力極弱，因此在此之後的研究中，將取剪力模數之值為 0.328GPa，並探討其他參數之影響。

## 2.3 纖維摩擦力的影響

為了探討編織布摩擦係數之影響，本研究中將圓球與編織布間摩擦係數以及纖維之間摩擦係數分別同時設為 0 與 0.5，並將破壞準則移除以便觀察衝擊過程能量守恆之現象，比較編織布邊界條件為四邊固定之下，受衝擊時纖維間摩擦係數對於編織布變形、衝擊物速度變化，以及衝擊物能量轉移之情形。

當一個衝擊物撞擊於編織布上，會使編織布產生變形，因而消耗衝擊物之動能使其速度降低，若在整個衝擊過程中未受到其他外力作用，能量系統應為守恆。本研究中衝擊物為鋼球，圓球變形之能量可忽略，且不考慮溫度之影響，因此圓球損失的動能(Loss of projectile kinetic energy,  $\Delta E_{pk}$ )應被編織布的三種能量完全吸收：編織布應變能(Yarn strain energy,  $\Delta E_{ys}$ )、編織布動能(Yarn kinetic energy,  $\Delta E_{yk}$ )以及摩擦耗能(Frictional sliding dissipated energy,  $\Delta E_f$ )。能量方程式如下：



$$\Delta E_{pk} = \Delta E_{ys} + \Delta E_{yk} + \Delta E_f \quad (2-17)$$

圓球損失的動能  $\Delta E_{pk}$  定義為

$$\Delta E_{pk} = \frac{1}{2} m(v_i^2 - v_r^2) \quad (2-18)$$

其中  $m$  為圓球的質量， $v_i$  為圓球初速度， $v_r$  為圓球餘速度。為了取得圓球損失的動能與時間關係，將圓球餘速度改寫為時間  $t$  的函數，因此方程式(2-18)可改寫為：

$$\Delta E_{pk} = \frac{1}{2} m[v_i^2 - v(t)^2] \quad (2-19)$$

其中  $v(t)$  為任一時間圓球之速度，因此利用圓球之速度變化便可得到其損失的動能與時間之關係。而在 LS-DYNA 3D 計算中，為了節省數據儲存和減少運算次數，通常會在實體元素使用單點高斯積分運算，但若應力集中加載於某一元素上，卻可能形成沙漏模態(Hourglassing mode)，因此會使用沙漏控制來增加局部模型剛度來避免產生此現象，當顯性動態分析時，沙漏能量不超過應變能的 10% 即被認為是可接受的分析結果[23]，故在本研究中沙漏能量皆控制在合理範圍之內。

在此探討四邊固定之邊界條件下纖維間摩擦係數之影響，圖 2.16 為時間  $80\mu s$  瞬間，纖維間摩擦係數分別為 0 及 0.5 的編織布受到圓球衝擊

之變形圖。發現當  $\mu=0.5$  時，由於纖維間摩擦力較大，因此受衝擊後纖維不易發生滑移現象；當  $\mu=0$  時，由於纖維間無摩擦力作用，因此受衝擊後中心部分纖維明顯向兩側滑移。

若比較纖維間摩擦係數對於圓球衝擊速度之影響，編織布四邊固定受衝擊時圓球速度-時間圖如圖 2.17(a)所示。圖中顯示圓球之初速度為 100m/s，垂直於編織布平面方向編織布中心點衝擊，接觸到編織布後圓球速度開始下降。當摩擦係數  $\mu=0.5$  時，編織布纖維間不易受圓球衝擊而滑移，因此圓球速度減少趨勢較明顯；反之當  $\mu=0$  時，編織布纖維間容易受圓球衝擊而滑移，因此圓球速度減少量較低。在能量方面，由圖 2.17(c)可發現無摩擦力作用時不會有摩擦耗能，而比較編織布受衝擊後之應變能及動能如圖 2.17(b)及圖 2.17(d)所示，可發現當纖維間有摩擦力作用時的能量皆比較大，代表編織布受衝擊後會吸收較多能量，因此抗彈能力較佳。根據 Tan 等人[17]之實驗結果，測量編織布受子彈衝擊時，將子彈可完全穿透編織布的速度定義為極限速度，實驗結果表示摩擦係數較高的編織布，其子彈射擊之極限速度較大，因此抗彈能力也最為良好。本研究分析中探討相同初速度的圓球衝擊於編織布後的速度歷程，在不考慮編織布破壞的情況下，得知摩擦係數較高的編織布其圓球速度減低情形較明顯，表示抗彈能較佳，故在本研究分析中與實驗結果的趨勢達到一致，而在未來將考慮編織布受衝擊後會發生破壞的情況下，摩擦係數對於

抗彈能力的影響。

當  $\mu=0.5$  時，編織布受衝擊時能量轉移曲線圖如圖 2.18 所示，所有能量皆對於圓損失動能的最大值作標準化，由圖中顯示在衝擊過程中，時間  $0\sim 40\mu\text{s}$  時編織布動能與應變能吸收能量所占比例相近，接著編織布會因邊界條件四邊固定而使其開始發生更大應變，導致編織布應變能吸收能量所占比例開始上升至 66.8%，編織布動能所占比例為 29.5%，而摩擦耗能所占比例最小，約為圓球損失動能的 4.5%。

當  $\mu=0$  時，編織布受衝擊時能量轉移曲線圖如圖 2.19 所示，發現若編織布纖維間無摩擦力作用，編織布動能與應變能吸收能量所占比例相近之時間提前至  $0\sim 30\mu\text{s}$  時，接著編織布會因邊界條件四邊固定而使其開始發生更大應變，因此編織布應變能吸收能量所占比例開始上升，達到 68.7%，而編織布動能所占比例為 28.5%。因此可發現當沒有摩擦力作用時，纖維編織布容易產生滑移且變形量較大，導致應變能吸收能量升高的時間提前，抗衝擊之能力也因此較差。

## 2.4 纖維跨距的影響

本節將探討編織布幾何排列對於抗彈效果之影響，觀察雙跨距編織布在受衝擊過程中，與單跨距編織法的差異。同樣地，探討編織布邊界條件纖維之間摩擦係數之影響，利用有限元素法模擬，觀察編織布在三種不同邊界條件之下，受衝擊時纖維間摩擦係數對於編織布變形、衝擊物速度



變化，並比較邊界條件對於衝擊物能量轉移之情形。

圖 2. 20 為圓球與編織布初始狀態之幾何模型：一個半徑為 4mm 之鋼球垂直入射於正方形編織布的中心點上，編織布尺寸為 52.04mm × 52.04mm，雙跨距平織布有限元素模型之橫截面如圖 2.21 所示，其截面之幾何參數如表 2.5 所示，其跨度為單跨距編織布的兩倍。每一束紗線沿著餘弦波之路徑延伸，其相鄰兩束纖維的函數如同方程式(2-15)及方程式(2-16)所示，其中  $A$  為餘弦波之振幅，在此與纖維厚度相同； $\lambda$  為正弦波之波長，在此為跨度的兩倍。

根據圖 2. 20 及圖 2. 21 基本尺寸所建立的有限元素模型如圖 2. 22 所示，邊界條件為四邊固定。此模型雖對稱於  $x-z$  平面以及  $y-z$  平面，但由於對稱軸不在纖維上，若撞擊區域之纖維往中心方向位移，會造成模擬與實際結果不符合之情形，因此須建立全模型進行分析，編織布總計 342,720 個實體元素，首先測量編織布單位面積之重量做比較，單跨距編織布模型為  $171.85\text{g/m}^2$  而雙跨距編織布模型為  $168.47\text{g/m}^2$ ，發現由於雙跨距編織布的纖維束上下起伏情形較平緩，因此重量會較輕。本研究中將圓球與編織布間摩擦係數以及編織布纖維之間摩擦係數假設為 0.5，探討編織布纖維跨距之影響。

為了探討在此邊界條件下纖維間摩擦係數之影響，圖 2. 23 為時間  $80\mu\text{s}$  瞬間，不同摩擦係數的編織布受到圓球衝擊之變形圖。發現當  $\mu=0.5$

時，由於纖維間跨距較大，因此受衝擊後纖維已經發生滑移現象；當  $\mu=0$  時，由於纖維間無摩擦力作用，因此受衝擊後纖維明顯向兩側滑移。再與圖 2.16 單跨距編織布變形相比，可發現當  $\mu=0$  時，雙跨距編織布纖維滑移之情形更為明顯。

若同時比較單跨距與雙跨距編織布受衝擊後，圓球之速度歷程如圖 2.24(a) 所示，可明顯看出單跨距編織布受衝擊後圓球速度減少趨勢較為明顯，其次為雙跨距編織布，且有摩擦力作用時其圓球速度減少趨勢又會較多。在能量方面，由圖 2.24(c) 可發現在撞擊初期摩擦耗能幾乎相同，由於雙跨距編織布較易產生滑移，因此後期摩擦耗能較單跨距編織布小許多。而比較編織布受衝擊後之應變能及動能如圖 2.24(b) 及圖 2.24(d) 所示，可發現當單跨距編織布的能量皆比較大，由此可知單跨距編織布受衝擊後會吸收較多能量，因此抗彈能力會比雙跨距編織布增強許多。

雙跨距編織布受衝擊時能量轉移曲線圖如圖 2.25 所示，所有能量表示皆對於圓球損失動能的最大值作標準化，由圖中顯示在衝擊過程中，編織布動能與應變能吸收能量所占比例相近，分別為 40.2% 及 54.4%，而摩擦耗能所占比例較小，約為 0.2%。由於雙跨距編織布受衝擊後較容易發生滑移，圓球衝擊於編織布後會直接由纖維間隙中穿透，反而不會對編織布造成大量變形，因此與圖 2.18 單跨距編織布能量轉移曲線圖相比，編織布應變能所占比例會略小許多。比較跨距及摩擦力對於鋼球之速度-時

間歷程如圖 2.26，綜合比較發現，單跨距無摩擦力(Single span,  $\mu=0$ )之編織布的抗彈能力會優於雙跨距有摩擦力(Double span,  $\mu=0.5$ )之編織布，因此纖維跨距對於抗彈能力之影響會優於摩擦力之影響。

## 2.5 編織布邊界條件的影響

為了探討編織布邊界條件之影響，本節中將三種邊界條件分別應用於單跨距編織布上：分別為四邊固定、兩邊固定以及四邊無拘束。觀察編織布受衝擊時編織布邊界條件對於其變形、衝擊物速度變化，並比較邊界條件對於衝擊物能量轉移之情形。首先，圖 2.27 為編織布邊界條件為四邊固定，纖維間摩擦係數為 0.5，受衝擊時側視圖以及下視圖，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，由於其四邊自由度受拘束，受衝擊後之側向變形會呈現金字塔形狀逐漸向外延伸至邊界。

圖 2.28 為編織布邊界條件為兩邊固定，纖維間摩擦係數為 0.5，受衝擊時側視圖以及下視圖，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，由於其兩邊自由度受拘束，受衝擊後不受拘束方向的變形波傳遞較慢，因此由上視圖觀察側向變形區域，受拘束方向變形區域對角線長度較大，不受拘束方向變形區域對角線長度較小。

圖 2.29 為編織布邊界條件為四邊無拘束，纖維間摩擦係數為 0.5，受衝擊時側視圖以及下視圖，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，由於其四邊不受拘束，故變形波傳遞較慢，與圖 2. 27 四邊固定之變形圖比較可發現在相同時間下，四邊固定之編織布側向變形範圍較大，四邊無拘束之編織布側向變形範圍較小。而當變形波傳遞至編織布四周時，邊界會受圓球衝擊而向中心移動。

為了探討編織布不同邊界條件影響對於圓球速度影響之程度，不同邊界條件的編織布受衝擊時圓球之速度歷程如圖 2. 30(a)所示，由圖中可明顯看出四邊固定之編織布受衝擊後圓球速度下降最快，而四邊無拘束之編織布受衝擊後圓球速度下降最慢。當編織布受衝擊後變形波傳遞至邊界之時間約為  $80\mu\text{s}$ ，比較此時各模型圓球速度如表 2. 7 所示，可發現當編織布邊界條件為四邊固定、兩邊固定以及四邊無拘束時，衝擊物在  $80\mu\text{s}$  之餘速分別為  $51.9\text{m/s}$ 、 $75.9\text{m/s}$  以及  $90.6\text{m/s}$ ，表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。接著觀察能量趨勢，圖 2. 30(c)為不同邊界條件的纖維編織布受衝擊後之摩擦耗能歷程，同樣可發現在撞擊初期摩擦耗能相近，由於拘束較少的編織布較易產生滑移，因此到撞擊後期四邊固定之摩擦耗能最高，其次為兩邊固定及四邊無拘束。而比較編織布受衝擊後之應變能及動能如圖 2. 30(b)及圖 2. 30(d)所示，亦可發現愈容易產生滑移的編織布其能量愈小，因此四邊無拘束的編織布受衝擊後吸收能量較少，因此抗彈能力最差，而此趨勢亦與 Duan 等人[1]以有限元素法探討纖維不同邊界



條件下受衝擊之行為達到一致。

在編織布四邊固定時，受衝擊時能量轉移曲線圖已於 2.3 節探討，如圖 2.18 所示，而編織布兩邊固定及四邊無拘束時能量轉移曲線圖如圖 2.31 所示，可發現當編織布的邊界條件不同時，其能量轉移曲線亦不相同。兩邊固定的編織布能量轉移曲線圖如圖 2.31(a)所示，由於編織布只有兩邊受拘束，受衝擊後容易向編織布中心滑移，因此編織布動能吸收能量所占比例較大，而編織布應變能略小，摩擦耗能所占比例最小。當變形波傳遞至四周邊界上後，編織布的變形逐漸變大，因此應變能所占比例超過編織布動能。四邊無拘束的編織布能量轉移曲線圖如圖 2.31(b)所示，顯示在衝擊過程中，由於編織布四邊皆未受拘束，受衝擊後容易向編織布中心滑移，因此在整個衝擊過程中，編織布動能吸收能量所占比例較大，而編織布應變能與摩擦耗能所占比例較小。

在本章節中，探討了單層纖維編織布之性質受衝擊後的影響，分別為纖維材料剪力模數、纖維編織布摩擦力、纖維跨距以及編織布邊界條件，可發現纖維編織布本身材料性質及幾何形狀等皆會對於抗彈能力產生影響，因此在實彈射擊時，這些參數都會是決定防彈衣構造的重要因素。為了更進一步於有限元素分析中，將防彈衣受衝擊行為做進一步的探討，本文將繼續研究單層纖維編織布的簡化模型，再對於多層纖維編織布進行探討分析。