

大 葉 大 學

機械與自動化工程學系碩士班

碩士論文

自行車安全帽新型內襯材料之分析
Analysis of New Liner Material
for Bicycle Helmet

研 究 生：李鈞翔

指 導 教 授：鄧作樑

林海平

中 華 民 國 1 0 3 年 6 月

大葉大學機械與自動化工程學系碩士班

李鈞翔碩士論文

自行車安全帽新型內襯材料之分析
Analysis of New Liner Material
for Bicycle Helmet

經考試合格特此證明

學位考試委員

王滄平

孫文忠

徐慶桐

蔡耀文

史建中

指導教授

王滄平

孫文忠

研究所所長

蔡耀文

(簽章)

中華民國 103 年 7 月 29 日

中文摘要

自行車在台灣是極為普遍之交通工具，與國人之日常生活關係極為密切。騎乘自行車發生事故時，嚴重的頭部外傷是常見主因之一，每年在美國造成約 800 人死亡及 17,000 人住院，在台灣則平均每年有 304 件頭部外傷案例，故配戴安全帽防止頭部損傷對騎乘自行車是重要的。為評估安全帽吸收撞擊能量的性能，自行車安全帽必須進行相關的撞擊測試，並量測頭模加速度值以評估撞擊吸收的性能，確保安全帽符合安全標準。本論文首先使用 LS-DYNA 軟體依據歐盟 EN 1078:2006、美國 CPSC 及澳大利亞 SNELL B95 自行車安全帽標準所規範的條件建構安全帽撞擊測試有限元素模型及模擬分析，並且為確認所建構有限元素模型的正確性，模擬分析結果並與實驗測試結果進行比較，結果顯示所建構的安全帽衝擊測試模型可應用於安全帽安全性能的評估。由於自行車安全帽主要係由內襯吸收大部份的撞擊能量，為設計高防護性的安全帽內襯結構，本論文針對新型內襯材料依據三種標準規範使用數值模擬進行安全帽性能比較，研究結果顯示發泡聚丙烯(EPP)內襯材料安全帽的防護性高於其他形式的內襯。本論文提出的安全帽新型內襯材料顯示具高能量吸收的特性，可提供國內自行車廠商參考，並且所建構的安全帽撞擊測試數值模型可提供為自行車安全帽安全性評估的工具。

關鍵詞:自行車安全帽，安全帽撞擊測試，EN 1078 標準，CPSC 標準，SNELL B95 標準，內襯，LS-DYNA

ABSTRACT

Bicycle is extremely popular and provides a very important means of transportation in Taiwan. The biggest threat to bicyclist is the head injury in a bicycle accident. Annually, there were 800 deaths and 17 000 hospitalizations resulting from bicycle accidents in USA. In Taiwan, there were around 304 head injury cases related to bicycle accidents every year. Bicyclists are urged to protect themselves in the event of a bicycle accident by wearing helmets. A bicycle helmet should maintain the desirable performance, which is reducing the head acceleration during impacts. Therefore, bicycle helmets are tested to ensure a minimum level of performance by the helmet for a range of criteria that affect safety. To test the energy absorbing capabilities of helmet, the results of the linear acceleration of the headform is measured during the impact test. Firstly, this study constructs a finite element model of helmet impact test using LS-DYNA software based on the EN 1078:2006、CPSC and SNELL B95 standard. To verify the accuracy of the proposed numerical model to simulate impact test, simulation results are compared with those obtained from experimental tests. The comparison results indicate that the proposed numerical model of impact test has considerable potential for evaluating the performance and safety effectiveness of helmet. During an accident, the main part of a helmet responsible for shock absorption is the energy absorbing liner. To determine a structure of liner that reaches high effective protection, helmet models with new liner material were considered. A comparative study of different liner materials on the impact performance has been performed using FE simulation based on three standards. The analyzed results indicated that the Expanded Polypropylene(EPP) liner material dominates over other liner materials. This new helmet liner material demonstrated high energy-absorbing capabilities. The design guideline obtained in this study may serve as a useful reference for designers on future development of helmet safety technologies. Furthermore, the finite element model of helmet impact test can be

useful to evaluate the shock-absorption abilities.

Keywords: Bicycle helmet, Helmet impact test, EN 1078 standard, CPSC standard,
SNELL B95 standard , Liner, LS-DYNA

誌謝

本論文承蒙指導教授鄧作樑教授及梁卓中教授殷切指導，並不時給予殷切的導正，於寫作學業與論文研究上諸多啟迪，稿成之後又蒙多次閱改逐字斧正，使本論文終能順利完成。在日常生活裡的處事態度更受益良多，老師對學生的時刻關心、在學生遇到挫折時耐心的給予關懷與支持、細心輔導學生解決困難，浩瀚師恩永銘於心，謹誌於此，以申由衷之敬意與謝忱。

本論文承蒙口試委員：淡江大學史建中教授、海軍軍官學校徐慶瑜教授與本校林海平教授對本文不吝指正並提供寶貴的建議，使本論文更加完善與充實，謹致上誠摯之感謝。

在學期間，感謝系上所有教導和照顧我的老師、志賢大哥和淑芬姐及怡婷姐對我的照顧與協助，在此致上誠摯謝意。

對於同窗好友家瑋、品呈等在求學過程彼此鼓勵與課業研究上的砥礪，將永難忘懷。謝謝學長孝文、紹峰、天宏、妍葦、憲聰、惠民、朝鈞、嘉雄以及外籍生文海、瑛琇、青松、海瑛不斷給我建議指導與幫助，使研究過程得以順利進行。另外特別感謝學弟凱誠、文彥等關心我的學弟，使得論文得以順利完成，此心此情，將永遠銘記在心。

最後，感謝撫育我、鼓勵我的父母、弟妹與默默支持我的親友，及關心我的女友淑燕，沒有您們不斷鼓勵與精神上的支持，我可能永遠沒有機會踏實而用心的度過這段對我而言最有意義的人生階段，家人的親情與師長、朋友的關懷，永遠將是自己在人生大道上最大的依靠，謹以此文獻給所有關心我的人。

李鈞翔
謹誌大葉大學
2014.07

目錄

封面內頁	
簽名頁	
中文摘要.....	iii
ABSTRACT.....	iv
誌謝	vi
目錄	viii
圖目錄	xii
表目錄	xvi
第一章 前言	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 論文目的.....	10
1.4 論文架構.....	12
第二章 自行車安全帽標準	13
2.1 歐盟 EN 1078:2006 標準	14
2.1.1 安全帽撞擊測試程序.....	15
2.1.2 安全帽撞擊測試規範.....	16
2.1.3 安全帽撞擊測試標準.....	17
2.2 美國 CPSC:16 CFR Part 1203 標準	17
2.2.1 安全帽撞擊測試程序.....	18
2.2.2 安全帽撞擊測試規範.....	18
2.2.3 安全帽撞擊測試標準.....	19

2.3 澳大利亞 SNELL B95 標準	20
2.3.1 安全帽撞擊測試程序.....	20
2.3.2 安全帽撞擊測試規範.....	21
2.3.3 安全帽撞擊測試標準.....	22
第三章 自行車安全帽數值分析之理論基礎.....	34
3.1 自行車安全帽碰撞之數值分析理論	35
3.1.1 運動方程式.....	35
3.1.2 時間積分(Time Integration).....	36
3.2 數值分析流程與設定	37
3.2.1 前處理.....	37
3.2.2 LS-DYNA3D 主程式處理	42
3.2.3 後處理.....	42
第四章 EN 1078 自行車安全帽撞擊測試有限元素模型	47
4.1 安全帽有限元素模型.....	48
4.1.1 內襯.....	49
4.1.2 外殼.....	49
4.1.3 下巴繫帶.....	49
4.2 頭模有限元素模型.....	50
4.3 鋼鉗有限元素模型.....	50
4.3.1 平鉗(flat anvil).....	51
4.3.2 路邊石鉗(curbstone)	51
4.4 EN 1078 標準之安全帽撞擊測試模型	51
4.5 安全帽撞擊測試模擬結果	52
4.6 安全帽撞擊測試模型驗證	52

4.6.1 撞擊測試步驟.....	53
4.6.2 撞擊測試結果.....	55
4.6.3 安全帽撞擊測試數值模擬驗證	56
第五章 CPSC 及 SNELL B95 自行車安全帽撞擊測試有限元素模型....	71
5.1 CPSC 標準安全帽撞擊測試數值模型	71
5.1.1 安全帽有限元素模型	71
5.1.2 半頭模有限元素模型.....	72
5.1.3 鋼鈷有限元素模型.....	72
5.1.4 安全帽撞擊測試模型	73
5.2 CPSC 標準安全帽撞擊測試模擬結果	74
5.3 SNELL B95 標準安全帽撞擊測試數值模型	75
5.3.1 安全帽有限元素模型	75
5.3.2 半頭模有限元素模型.....	75
5.3.3 鋼鈷有限元素模型.....	76
5.3.4 安全帽撞擊測試模型	77
5.4 SNELL B95 標準安全帽撞擊測試模擬結果.....	78
第六章 自行車安全帽新型內襯材料之分析	90
6.1 發泡聚丙烯(EPP)內襯材料分析	91
6.1.1 EPP 材料特性	91
6.1.2 EPP 內襯材料安全帽撞擊測試模型.....	91
6.1.3 EPP 內襯材料安全帽撞擊測試模擬結果.....	92
6.2 發泡聚氨酯(EPU)內襯材料分析.....	93
6.2.1 EPU 材料特性.....	94
6.2.2 EPU 內襯材料安全帽撞擊測試模型	94

6.2.3 EPU 內襯材料安全帽撞擊測試模擬結果	95
6.3 新型內襯材料安全帽撞擊測試模擬結果之比較	96
6.3.1 EN1078 標準	97
6.3.2 CPSC 標準	97
6.3.3 SNELL B95 標準	99
6.3.4 撞擊測試模擬結果之比較	100
第七章 結論與未來展望	110
參考文獻	113

圖目錄

圖 2.1 三軸碰撞測試機.....	23
圖 2.2 全頭部模型.....	24
圖 2.3 A、E、J、M、O 頭部模型.....	24
圖 2.4 EN 1078:2006 測試區域.....	25
圖 2.5 三軸碰撞測試平鉗.....	25
圖 2.6 三軸碰撞測試路邊石鉗.....	25
圖 2.7 單軌碰撞測試機.....	26
圖 2.8 半頭部模型.....	27
圖 2.9 CPSC 5 歲以上配戴者撞擊測試區域.....	27
圖 2.10 CPSC 4 歲以下配戴者撞擊測試區域.....	28
圖 2.11 單軌碰撞測試平鉗.....	28
圖 2.12 單軌碰撞測試路邊石鉗.....	29
圖 2.13 單軌碰撞測試圓鉗.....	29
圖 2.14 SNELL B95 5 歲以上配戴者撞擊測試區域.....	30
圖 2.15 SNELL B95 4 以下戴者撞擊測試區域.....	30
圖 3.1 LS-DYNA3D 數值模擬分析流程.....	43
圖 3.2 殼元素示意圖.....	43
圖 3.3 固體元素示意圖.....	44
圖 3.4 彈塑性材料示意圖.....	44
圖 3.5 低密度泡沫塑性材料示意圖.....	45
圖 3.6 主區域及次區域示意圖.....	45
圖 4.1 捷安特(GIANT) 自行車安全帽.....	58

圖 4.2 安全帽 3D 掃描數位模型.....	58
圖 4.3 安全帽幾何圖形.....	59
圖 4.4 安全帽有限元素模型.....	59
圖 4.5 安全帽內襯有限元素模型.....	60
圖 4.6 發泡聚苯乙烯(EPS)應力應變曲線.....	60
圖 4.7 安全帽外殼有限元素模型.....	61
圖 4.8 聚氯乙烯(PVC)應力應變曲線.....	61
圖 4.9 下巴繫帶有限元素模型.....	62
圖 4.10 頭模幾何封閉圖形.....	62
圖 4.11 頭模有限元素模型.....	63
圖 4.12 平鈹有限元素模型.....	63
圖 4.13 路邊石鈹有限元素模型.....	63
圖 4.14 安全帽撞擊平鈹有限元素模型.....	64
圖 4.15 安全帽撞擊路邊石鈹有限元素模型.....	64
圖 4.16 安全帽撞擊平鈹模擬之頭部加速度歷時圖.....	65
圖 4.17 安全帽撞擊路邊石鈹模擬之頭部加速度歷時圖.....	65
圖 4.18 自行車安全帽撞擊實驗機台.....	66
圖 4.19 自行車安全帽墜落釋放裝置.....	66
圖 4.20 安全帽撞擊平鈹測試之頭部加速度歷時圖.....	67
圖 4.21 安全帽撞擊路邊石鈹測試之頭部加速度歷時圖.....	67
圖 4.22 安全帽撞擊平鈹測試與模擬之加速度歷時比較圖.....	68
圖 4.23 安全帽撞擊路邊石鈹測試與模擬之速度歷時比較圖.....	68
圖 5.1 半頭模幾何封閉圖形.....	79
圖 5.2 半頭模有限元素模型.....	79

圖 5.3 CPSC 標準平鈹有限元素模型	80
圖 5.4 CPSC 及 SNELL 標準路邊石鈹有限元素模型	80
圖 5.5 CPSC 及 SNELL 標準圓鈹有限元素模型	80
圖 5.6 CPSC 標準安全帽撞擊平鈹有限元素模型	81
圖 5.7 CPSC 標準安全帽撞擊路邊石鈹有限元素模型	81
圖 5.8 CPSC 標準安全帽撞擊路邊石鈹有限元素模型	82
圖 5.9 CPSC 安全帽撞擊平鈹模擬之頭部加速度歷時圖	82
圖 5.10 CPSC 安全帽撞擊路邊石鈹模擬之頭部加速度歷時圖	83
圖 5.11 CPSC 安全帽撞擊圓鈹模擬之頭部加速度歷時圖	83
圖 5.12 SNELL B95 標準平鈹有限元素模型	84
圖 5.13 SNELL B95 標準安全帽撞擊平鈹有限元素模型	84
圖 5.14 SNELL B95 標準安全帽撞擊路邊石鈹有限元素模型	85
圖 5.15 SNELL B95 標準安全帽撞擊圓鈹有限元素模型	85
圖 5.16 SNELL B95 安全帽撞擊平鈹模擬之頭部加速度歷時圖	86
圖 5.17 SNELL B95 安全帽撞擊路邊石鈹模擬之頭部加速度歷時圖	86
圖 5.18 SNELL B95 安全帽撞擊圓鈹模擬之頭部加速度歷時圖	87
圖 6.1 發泡聚丙稀(EPP)材料	101
圖 6.2 發泡聚丙稀(EPP)應力應變曲線	101
圖 6.3 EN1078 標準安全帽撞擊平鈹模擬之頭部加速度歷時圖	102
圖 6.4 EN1078 標準安全帽撞擊路邊石鈹模擬之頭部加速度歷時圖	102
圖 6.5 CPSC 標準安全帽撞擊平鈹模擬之頭部加速度歷時圖	103
圖 6.6 CPSC 標準安全帽撞擊路邊石鈹模擬之頭部加速度歷時圖	103
圖 6.7 CPSC 標準安全帽撞擊圓鈹模擬之頭部加速度歷時圖	104
圖 6.8 SNELL B95 標準安全帽撞擊平鈹模擬之頭部加速度歷時圖	104

圖 6.9 SNELL B95 標準安全帽撞擊路邊石鈎模擬之頭部加速度歷時圖..	105
圖 6.10 SNELL B95 標準安全帽撞擊圓鈎模擬之頭部加速度歷時圖...	105
圖 6.11 發泡聚氨酯(EPU)材料.....	106
圖 6.12 發泡聚氨酯(EPU)應力應變曲線.....	106
圖 6.13 EN1078 標準三種內襯材料頭部加速度峰值比較圖.....	107
圖 6.14 CPSC 標準三種內襯材料頭部加速度峰值比較圖.....	107
圖 6.15 SNELL B95 標準三種內襯材料頭部加速度峰值比較圖.....	108
圖 7.1 複合式材料模型示意圖.....	111
圖 7.2 新型安全帽內襯模型示意圖.....	111
圖 7.3 新型安全帽內襯模型示意圖.....	112

表目錄

表 2.1 歐盟、美國及澳洲衝擊測試標準相關資料	31
表 2.2 EN960 頭部模型尺寸	31
表 2.3 ISO/DIS 6220-1983 頭部模型尺寸	32
表 2.4 CPSC 5 歲以上配戴者測試區域尺寸對應表	32
表 2.5 CPSC 4 歲以下配戴者測試區域尺寸對應表	32
表 2.6 SNELL B95 5 歲以上配戴者測試區域尺寸對應表	33
表 2.7 SNELL B95 4 歲以下配戴者測試區域尺寸對應表	33
表 3.1 顯性與隱性積分法優缺點之比較	46
表 4.1 安全帽撞擊測試有限元素模型各部件詳細資料	69
表 4.2 安全帽撞擊測試模型之材料特性	69
表 4.3 安全帽撞擊平鉛測試與模擬值之頭部加速度與損傷指標值比較	70
表 4.4 安全帽撞擊路邊石鉛測試與模擬值之頭部加速度與損傷指標值比較	70
表 5.1 安全帽撞擊測試有限元素模型各部件詳細資料	88
表 5.2 安全帽撞擊測試模型之材料特性	88
表 5.3 安全帽撞擊測試模擬之頭部加速度值比較	89
表 6.1 內襯之材料特性	109

第一章 前言

1.1 研究動機

全球高油價時代來臨，其所衍生的交通、運輸問題已成為大家共同關注的焦點，自行車因兼具節能、環保、便利、健康等功能，已成為通勤族及假日休閒活動必備工具，自行車運動更成為國人最喜愛的戶外休閒活動之一。根據交通部統計處2010年「自行車使用狀況調查」摘要分析顯示[1]，臺灣地區使用自行車人口推估已達1,030萬人，其中騎乘自行車之主要目的以「休閒、運動、旅行」佔比例60.5 % 為最高。以騎乘頻率來看，每週騎乘自行車者比例最高佔40.4%，每週平均騎2.2次；另外，每天騎乘自行車者也有26.5%，可見國內民眾對自行車休閒運動的愛好與普及。

據估計在美國5至14歲的孩童中，有72.7%會使用自行車為交通工具，使用相當頻繁。而騎乘自行車發生事故時，嚴重的頭部外傷是常見的死因之一，每年在美國造成約800人死亡及17,000人住院，在臺灣則平均每年有304件頭部外傷案例[2]，可見頭部防護對騎乘自行車之重要。自行車並不像機車或汽車有駕駛執照的規定來限制騎乘者年齡，使用者為兒童或青少年佔大多數，當事故發生後，若推估其潛在生命損傷必定比以成人為駕駛者的機車及汽車來的更為重大，加上頭部外傷所造成的醫療資源損失、社會成本損失及平均餘命下降更是不容忽視，並且意外其所造成死亡、殘障與後遺症的撞擊，對家庭、社會與國家的負擔，比起其他的疾病更為嚴重。

自行車被發明以來，就逐漸成為人們代步、休閒的工具，特別是自行車運動作為一項競技體育項目之後，人們對它更是喜愛有加。但是作為一項以速度決勝的運動項目，安全便成了一個重要的問題。自行車安全帽的使用保障了騎乘者的安全，消費者騎乘自行車活動時，為避免頭部因外來撞擊而受傷害，配戴自行車安全帽為必要裝備。有多篇國外研究顯示，配戴安全帽者發生腦外傷之比率明顯較未戴安全帽者低，證實安全帽在自行車事故中有其保護效果。為了預防騎乘者的頭部傷害及社會成本的損失，強制配戴自行車安全帽的立法是刻不容緩。

為保證安全帽受到撞擊時的緩衝效果，安全帽在出廠前都要經過一系列的試驗，其中最為重要即是安全帽撞擊測試。撞擊測試可以量測頭模重心位置的加速度曲線，用以評估安全帽結構的撞擊吸收性能。為了確保安全帽保護頭部的安全性考量，各國都有制訂相關標準來規範各國生產的安全帽。本文將針對騎乘人數較多的國家所制訂的自行車安全帽標準進行探討，包括：歐盟 EN 1078:2006[3]、美國 CPSC:16 CFR Part 1203[4]和澳大利亞 SNELL B95[5]。三項安全帽標準所規範的內容包括：撞擊吸收試驗、保持裝置強度試驗、保持性(脫離)試驗、視野之測定等方面，此三種標準對自行車安全帽撞擊測試較為詳盡。國內也於民國九十二年一月十三日起實施自行車安全帽標準，其制訂內容規範係參考歐盟 EN1078:2006標準。目前國內外在提高安全帽結構撞擊吸收性能的研究上，通常從內襯材料、尺寸、外型結構等著手，其中內襯的形狀及材料特性是影響撞擊緩衝性能的主因之一。由於內襯發泡材料有許多種類，如何選擇一撞擊吸收性能強與重量輕且具環保效能的

內襯材料是自行車安全帽未來主要重點設計項目之一。

1.2 文獻回顧

自行車安全帽的研究內容包括安全帽設計與頭部損傷分析及測試標準發展等，而研究方法則包括交通事故統計法(statistical methods)、撞擊器測試(impactor test)與電腦輔助工程方法(computer-aided engineering)等。其中統計法係從各大醫院急診室針對各年齡層及騎乘自行車損傷部位作統計，缺點需花費較多人力及時間，而統計出來的數據僅只能供參考，並無法證實實際事故上的結果。撞擊測試為使用不同種類的撞擊裝備，將安全帽固定在上方以自由落體方式撞擊鋼釘，其缺點需花費較多成本及時間。電腦輔助工程方法係以數值方法為理論，並藉由電腦程式計算，以模擬真實撞擊測試。與其他方法相較，模擬方法較為節省成本，但前提是電腦分析模型須是正確且經過驗證。以下就國內外相關安全帽撞擊測試之數值模擬的研究與分析等重要文獻，簡述如下：

1. 安全帽材料

1988年 Kostner and Stocker[6]首先建立一個有限元素電腦數值模型，以 150J 的能量衝擊安全帽頂部，而安全帽使用較市面為低的保麗龍密度 32kg/m^3 (一般密度使用 60kg/m^3) 及較薄的外殼厚度 3mm (一般使用 4mm)，其數值模型模擬的結果顯示，降低材料的強度，反而頭部可以獲得較低的加速度峰值。

1989 年 Hopes and Chinn[7]實驗研究顯示，以 6.7m/s 的速度撞擊安全帽，在選擇內襯材料密度為 25kg/m^3 時可以獲得最低的 HIC 值。1991 年 Mills and Gilchrist[8]針對內襯材料進行探討，建立一簡單的數值模型並與實驗比較後得知，安全帽若是撞擊平面剛體，應使用較低密度的內襯及較薄的外殼。1994 年 Yettram 等人[9]建立一簡單幾何形狀的三維機車安全帽有限元素模型，將帽殼的楊氏係數與材料實驗所獲得的數種墊料密度做不同組合，進行材料參數上的探討，其模擬結果顯示，較低密度的吸收衝擊墊料搭配較低強度的帽殼，可使頭型在撞擊時具有較低的 HIC 值。1996 年范志銘[10]建立一 Hybrid III 50% (包括頭、頸、胸部)人偶的三維有限元素模型，頭上並配戴顏重岳[22]研究所建立的機車安全帽有限元素模型，予以碰撞剛體平面，以探討安全帽測試法規標準的容許度，另一方面也探討加入人偶頭、頸、胸部後，考慮以上部位在碰撞過程中所產生的慣性能量，是否會使安全帽的保護性能不足，結果顯示目前各國的現行法規似乎太過寬鬆。此外也發現帽殼若適當降低其材料強度，可使頭部的最大加速度值及 HIC 值降低。2000 年張立東[11]以一三維有限元素模型，模擬機車騎士於事故發生時，安全帽護顎及頭部配合度的影響，發現降低帽殼的剛性結構及吸收衝擊墊料的密度，可減少頭部之受力。2000 年張嘉原[12]以一 Hybrid III 人偶模擬機車騎士於真實事故中受傷害的情形，同時探討機車安全帽於不同環境(溫度、溼度)材料性質的變化。2002 年 V.Kostopoulos 等人[13]探討複合材料外殼的強度及頭部損傷的發展，並利用 LS-DYNA 有限元素軟體分析

安全帽模型在撞擊過程中，複合式安全帽的參數分析可以在其他安全帽設定時當成一種工具，可降低檢測的需求。從模擬中探討其動態響應及頭部損傷標準的最大值及最大加速度。2003 張立東等人[14]利用電腦斷層掃描機車安全帽再導入有限元素分析軟體(LS-DYNA)，建構安全帽有限元素模型，模擬不同撞擊速度的動態響應，探討頭部模型的加速度峰值及頭部損傷標準與外殼的機械性能及內襯能量吸收。以低速度撞擊時，安全帽外殼的硬度及內襯的密度應該是相對較低的，可減少頭部在撞擊時的接觸力；以高速度撞擊時，較硬的外殼及密度高的內襯可提供較好的保護，防止頭部受傷。2003 年劉德騏等人[15]提出溫度可能造成安全帽中內襯熱漲冷縮，並採用高精度微力壓縮試驗對安全帽內襯進行實驗，並記錄壓縮材料應力應變曲線，再導入有限元素模型做自由落體撞擊模擬探討頭模的最高加速度及頭部損傷指標(HIC)，分析結果得到壓縮過後的內襯材料大幅地降低其能量吸收特性，最大壓縮應變只允許到 10%。2006 年 Asiminei 等人[16]使用 MSC 有限元素分析軟體探討發泡具苯乙烯內襯自行車安全帽，依據 SNELL B95 和 EN 1078 自行車安全帽標準測試模擬分析並進行驗證，並使用聚醚砜樹脂(PES)內襯材料進行模擬，得到頭部加速度可減少 80% 以上，產生的應力也可以減少 65% 以上，證明聚醚砜樹脂(PES)材料優於發泡具苯乙烯(EPS)。2007 年 Shuaeib 等人[17]使用發泡聚丙烯 (EPP) 泡沫材料進行機車安全帽內襯優化，並探討發泡聚丙烯 (EPP) 材料特性，利用非線型有限元素分析軟體 (LS-DYNA) 作為安全帽驗證並模擬分析，及採用響應曲面法

(RSM) 提供數據優化安全帽，得到使用發泡聚丙烯 (EPP) 作為安全帽內襯材料是可行的，且透過有限元素分析軟體模擬來研究各種因素的影響來優化安全帽設計。2009 年 Rueda 等人[18]採用有限元素分析軟體(ABQUS)建立安全帽有限元素模型並進行計算及與實驗的結果進行驗證，取得內襯在安全帽最適當的位置。並設計由三種不同密度的內襯材料組合與單一密度的內襯進行比較，探討其材料應力的分布及塑形能量密度。2010 年 Pinnoji 等人[19]利用泡沫金屬材料替代常見塑性外殼進行試驗，透過實驗數值及有限元素分析探討新材料安全帽的動態反應；並分別進行剛性及變形的頭模，和泡沫金屬及苯乙烯共聚物兩種材料的外殼有限元素分析模擬，比較其頭部損傷指標(剛性頭模)及大腦應力、變形量(變形頭模)。2011 年 V.Tinard 等人[20]使用有限元素分析軟體(LS-DYNA)建構一個由不同複合材料堆疊的安全帽外殼進行模擬，依據模擬中複合式材料的彈性及斷裂性能與實驗做比較，探討安全帽有限元素模型外殼的彈性及斷裂性能並進行驗證。2012 年 Blanco 等人[21]提出一種可以降低頭部損傷的創新結構，安全帽的內襯由丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)材料組成錐形設計，這種內襯主要優點可以導入聚苯乙烯(EPS)材料進行不同能量的位置配置；依據歐盟滑雪帽標準 EN 1077 進行試驗並驗證有限元素模型，利用有限元素分析優化其性能。

2. 安全帽結構

1995 年顏重岳[22]建立一具有通風孔與不含護顎的機車安全帽三維有限元素碰撞模型，用以探討不同型式通風孔的效應，並與實驗結果比較後，結果發現雖然通風孔會降低保護的能力，但以適當大小的通風口，還是能使安全帽符合安全標準規範。1998 年王秋華[23]首先建立一包含護顎的三維機車安全帽有限元素模型，探討護顎結構強度對臉部碰撞的能量吸收機制；但護顎對帽體結構上影響並沒加以討論，有護顎的安全帽對碰撞帽體的影響，也是一個可以探討的重點。2000 年 Bosch 等人[24]提出一個使用目前安全帽認證測試的改進頭部模型，並在頭模導入頭骨及大腦結構。在撞擊試驗中比較 Hybrid-III 皮膚材料內襯及較擬真的橡膠內襯的加速度值，探討並驗證頭模的可行性。2003 年曾文龍[25]將數值動態模擬軟體 (MADYMO) 運用於自行車與車輛碰撞後剛體人偶之分析中，目的在於了解自行車騎士碰撞過程中之動態反應，分析騎士頭部之運動學參數，並探討此碰撞模擬模型之可行性與合理性，以及模型之改進之道。2007 年洪興林等人[26]依據 E.C.E. 機車安全帽標準撞擊測試程序，利用有限元素分析軟體 (ANSYS/LS-DYNA) 研究安全帽在撞擊發生時之動態行為，並找出最適當的頭型、墊料及帽殼三者之間的設計間隙，及驗證電腦撞擊模擬的可靠性分析各種不同的安全帽間隙之撞擊結果的頭部傷害指數(HIC)及最大加速度值，以便評估於各種不同的安全帽間隙時，安全帽所承受撞擊時吸收動態能量及撞擊加速度值的能力。最後，經由分析結果和探討其間隙組合影響

的趨勢，並考量鈷墊及合理密合度情況下，建議較適當的設計間隙組合為頭型和墊料之設計間隙大約是 5mm，而墊料和帽殼之設計間隙大約是 7mm。2008 年 Afshari[27]針對有無配戴機車安全帽之人體頭部模型進行有限元素模型分析，比較模擬中頭部傷害指數、頭部加速度曲線及大腦中產生的壓力等運動學參數，並優化頭部模型以達到更精確及仿真的結果。2008 年洪興林[28]利用有限元素分析軟體(LS-DYNA)執行模擬分析安全帽墊料受撞擊時之能量，研究安全帽在接受 E.C.E.標準撞擊測試程序時之動態行為。根據電腦模擬結果，探討各種不同的安全帽墊料外型之撞擊頭部傷害指數(HIC)及撞擊加速度峰值。2009 年 L.Cui 等人[29]使用有限元素分析軟體(ABQUS)建立機車安全帽有限元素模型並進行優化及驗證，探討泡沫內襯的材料應變應力值影響撞擊時的頭部的最大加速度值，得到內襯應力分布的面積及厚度和塑性能量密度是影響頭部最大加速度的原因。2009 年洪興林等人[30]針對機車安全帽殼表面附加肋條時，探討安全帽受撞擊時之防護力及吸收能量能力，並對安全帽帽殼之設計與開發提供有價值的建議。該研究主要利用有限元素分析軟體(LS-DYNA)執行模擬安全帽在承受 E.C.E.標準撞擊測試程序時之動態行為，並找出能保護安全帽及吸收此撞擊能量之最佳肋條外型與個數。利用實驗及電腦模擬比對法找出帽殼及安全帽墊料之材料參數。再根據電腦模擬結果，分析各種不同的肋條外型與個數承受撞擊時之頭部傷害指數(HIC)及最大加速度值。

3. 安全帽其它數值研究

2008 年 Mills 等人[31]使用有限元素軟體(ABAQUS)分析自行車安全帽及路面傾斜度的關係，來評估頭模的線性和旋轉加速度，並進行斜向撞擊試驗及驗證比較數值分析結果，該頭部最大速度設計方法得到證實其不受撞擊速度的切向分量影響；且摩擦係數較高的安全帽在一般道路上是不太影響頭部安全的，頭部壓力分佈的旋轉加速度不通過重心會直接影響到測試。2009 年龔純等人[32]依據歐盟自行車安全帽標準 EN1078:2006 針對一款中國製造的自行車安全帽，使用有限元素分析軟體(RADIOSS)進行分析建模與驗證，並說明使用有限元素分析替代測試實驗對安全帽進行優化的可行性。2010 年 Cernicchi 等人[33]使用有限元素分析軟體(LS-DYNA)驗證機車安全帽作為優化的工具，有效的替代使用測試的試驗方式，並在分析過程可以更簡易的進行修正並開始測試，並依據歐盟標準 ECE22.05 做測試實驗並與分析結果做驗證。2010 年陳祥和等人[2]依據 CNS 機車用安全帽撞擊實驗規範利用有限元素模型模擬金屬頭模戴安全帽墜落情況，模擬人類頭戴安全帽同樣的撞擊下，腦組織所承受之加速度遠小於金屬頭模值，顯示金屬頭模過於剛硬，以合成塑料之改良頭模較假人 Hybrid-III 頭模進行試驗，碰撞時間縮短且量測之撞擊加速度提高，可成為改善假人頭模替代材料之選擇。2013 年 Hansen 等人[34]利用角度撞擊減緩(AIM)系統去測試安全帽有限元素模型去比較，並進行普通撞擊試驗測量頭部線性加速度值，及斜向撞擊試驗測量頸部負載及頭部線性加速度值，最後將模擬結果進行驗證

比較，探討角度撞擊減緩(AIM)系統對於安全帽減緩程度。2013年 Fanta 等人[35]利用多剛體動力學分析軟件(MADYMO)設計三種不同汽車前面部分及三種不同騎乘方式的人偶與自行車進行撞擊模擬分析，探討撞擊之後人體頭部損傷值(HIC)。

1.3 論文目的

為了確保安全帽能有效保護頭部的安全，英國、美國及日本等國家都制訂相關檢測標準來規範其生產之安全帽。為能充分了解各國安全帽檢測標準，本論文首先將針對騎乘率較廣泛的國家與制訂標準較為詳盡的自行車安全帽標準進行研究，包括：歐盟EN 1078:2006、美國CPSC:16 CFR Part 1203和澳大利亞SNELL B95。

自行車安全帽標準的執行一般多採用實驗方法進行撞擊測試，然而撞擊測試實驗過程複雜、測試費用高，因此利用有限元素分析方法模擬安全帽撞擊試驗，近年來已成為評估自行車安全帽性能的趨勢。利用數值模擬方法具節省成本、縮短研發時程及重覆性高等優點，所以使用有限元素方法探討安全帽結構的撞擊吸收性能已成為現今可行分析方法之一。目前應用於碰撞分析的軟體有LS-DYNA、ABQUS、RADIOSS、MADYMO、ADAMS等，唯LS-DYNA使用率佔全世界46%居於最高位[36]，特別適用於非線性問題（幾何非線性及材料非線性）及接觸性等撞擊問題的求解。為了節省測試的成本與繁雜的實驗檢測工作，本論文採用有限元素方法依據EN 1078:2006、CPSC:16 CFR Part 1203和SNELL B95三種安

全帽標準建構撞擊測試數值模型及模擬分析。首先使用電腦輔助工程繪圖軟體CATIA以及3D逆向工程繪圖軟體Rapidform來建立頭部及自行車安全帽3D實體幾何模型，且應用有限元素前處理軟體HyperMesh將幾何模型進行網格劃分，其次依據EN1078:2006自行車安全帽標準之規範使用LS-DYNA有限元素分析軟體進行撞擊測試模型的建構與分析。為確認安全帽撞擊測試數值模型之正確性，並以頭部重心位置的加速度值及頭部損傷結果與實際試驗結果進行比對。接著以EN1078:2006標準建構安全帽撞擊測試數值模型的經驗，再依據CPSC:16 CFR Part 1203和SNELL B95標準建構安全帽撞擊測試模型，並以相同之安全帽模型進行撞擊吸收性能分析與比較。最後為了提高安全帽撞擊吸收性能，並採用發泡聚丙烯(Expanded Polypropylene, EPP)及發泡聚氨酯(Extruded Polyurethane, EPU)兩種新型內襯材料以所建構三種自行車安全帽標準之撞擊測試模型進行數值模擬，並以頭部重心位置之加速度值探討兩種新型內襯材料與原內襯材料發泡聚苯乙烯(Expandable PolyStyrene, EPS)內襯材料的差異性。本論文所探討的自行車安全帽內襯材料可以提供台灣未來設計新型安全帽設計之參考，且本研究所建構之自行車安全帽撞擊測試模型，亦可作為安全帽結構改良及安全防護配備研發之工具。

1.4 論文架構

本論文分為七章，第一章為前言，主要在說明整個研究的動機，蒐集國內外相關文獻以及論文研究之目的。第二章將介紹目前較具代表性的自行車安全帽標準:EN 1078:2006、CPSC:16 CFR Part 1203 和 SNELL B95。第三章為基本理論，說明本論文採用的有限元素分析軟體 LS-DYNA 3D 之基本理論。第四章主要內容在於介紹 EN 1078:2006 自行車安全帽標準的相關試驗及安全帽撞擊測試有限元素等相關模型建構與模擬分析驗證。第五章敘述 CPSC 和 SNELL B95 的自行車安全帽標準的相關試驗及安全帽有限元素等相關模型建構與模擬分析。第六章將針對兩種內襯材料在三種撞擊測試標準下進行比較。第七章將本研究結果做一結論，並提出未來相關研究之建議。

第二章 自行車安全帽標準

自行車安全帽標準中的撞擊吸收測試主要是評估安全帽在受到外力時對頭部的保護測試，測試方式是以配戴安全帽的頭部模型受到撞擊時，頭模重心位置加速度是否符合標準所規範的，以評估事故發生時，騎乘者頭部是否能受到安全帽的保護。為了在騎乘自行車發生意外時可降低頭部損傷的發生，安全帽販售的國家會擬定一套適用的安全性檢測標準，目的是檢測每個販售的安全帽可保護配戴者發生意外時降低傷害。意外發生時，由於撞擊能量的一部分被安全帽吸收，因而減少了頭部所承受的撞擊力；但安全帽所提供的保護，依意外發生的環境而定，配戴安全帽無法保證可完全避免損傷的發生。

國際市場上的安全帽須通過生產國家標準的檢驗方可販售，目前全球自行車安全帽標準包括以下幾項:[37]

1. 歐洲地區:歐洲標準委員會(CEN) EN 1078:2006、EN 1080、英國標準協會 (BSI) BS 6863:1987、瑞典董事會消費政策 KOVFS 1985:6。
2. 美洲地區:美國消費者產品安全委員會(CPSC) 16 CFR Part 1203、美國國家標準學會(ANSI) Z90.4-1984、美國材料與試驗協會 (ASTM) F1447-12，F-1446-11A、加拿大標準協會 CAN-CSA-D113.2-M。
3. 澳洲地區:澳大利亞標準/紐西蘭標準 AS / NZS 2512.1:1996、澳大利亞斯內爾紀念基金會(SNEL) B90、B95。
4. 亞洲地區: 日本工業標準(JIS) T 8134-1982、中華民國國家標準

(CNS) 13371:2005、中華人民共和國國家標準(GB) 6675-1986。

為保證安全帽的性能品質，安全帽在出貨前都要經過一系列的試驗，最為重要的就是撞擊測試。撞擊測試可以計算頭模重心位置的加速度曲線，用以評估安全帽結構的撞擊吸收性能，測試標準是以放置在安全帽的頭部模型，經撞擊後量測頭部加速度值是否符合自行車安全帽標準的規範。在自行車安全帽標準的撞擊測試中，首先是將頭部模型套入安全帽內結合其他組件組裝在一個自由落體或軌道的機台上，垂直落下撞擊一個模擬道路表面異物形狀的鉗座，並以頭模的加速度峰值，來評估安全帽的撞擊吸收性能。

本章節僅就歐盟 EN 1078:2006 [3]、美國 CPSC:16 CFR Part 1203 [4]及澳大利亞 SNELL B95 [5]三種自行車安全帽標準作說明。

2.1 歐盟 EN 1078:2006 標準

本標準規範由歐洲標準化委員會 CEN(European Committee for Standardization)/TC 158《頭部保護》負責編製，該委員會之秘書處由英國標準協會 BSI(British Standards Institution)擔任。依據 CEN/CENELEC 內部法規的規範，歐洲各國之國家標準局應執行本歐盟標準規範，包括奧地利、比利時、丹麥、芬蘭、法國、德國、希臘、冰島、愛爾蘭、義大利、盧森堡、荷蘭、挪威、波蘭、西班牙、瑞典、瑞士與英國等歐洲國家。

負責編撰本標準規範的技術委員會，深知安全帽的通風設計對配戴人的舒服感與乾濕調整功能有重要的影響，但本標準規範編撰期間，尚無已認可之安全帽通風性能測試方法，基於此一理由，本

標準規範並未引用任何與通風或熱傳遞有關的要件。腳踏車騎士、滑板手和滑輪手所配戴的安全帽，基本上都配備了一個圍護系統(包含下巴繫帶、下巴蓋)，以便將安全帽保持在配戴人的頭部；然而，此一設計仍有導致孩童遭致卡緊與勒頸的傷害風險。在此一情況下，應改用有防撞擊設計的孩童用安全帽。根據標準 EN 1078:2006 所規範測試中，安全帽中與皮膚有接觸的部分，其材料不得因接觸汗水或化妝品等相關物質，而發生明顯之變化；該接觸部份不得使用會造成皮膚敏感的材料。安全帽的設計和造型，應使其零件應不致使配戴人在正常使用情況下受傷為主。且安全帽需應輕量、通風、脫戴容易、可配戴眼鏡、不嚴重干擾配戴者聽到交通噪音。以下僅針對歐盟 EN1078:2006 標準中對安全帽撞擊吸收性能的測試程序、規範與標準進行說明。

2.1.1 安全帽撞擊測試程序

歐盟自行車安全帽標準 EN 1078:2006 標準所規範的動態撞擊測試是使用三軸碰撞測試機，如圖 2.1 所示，測試係以一個繫上測試安全帽的頭部模型放在在試驗台的籃圈上，分別將其放置在 1.5 公尺的高度以自由落體的方式撞擊平鉛及放置在 1.06 公尺的高度以自由落體的方式撞擊路邊石鉛，再量測放置在安全帽內頭部模型重心位置的加速度峰值是否符合標準要求範圍內，其相關資料如表 2.1。

2.1.2 安全帽撞擊測試規範

1. 頭部模型規範

使用之頭模須符合BS EN 960:2006[38]的規定，如圖2.2所示。測試頭模應使用表2.2中的尺寸，但為判定吸震能力時，僅有A、E、J、M 與O 項可使用，如圖2.3所示。

2. 測試區域規範

- 取一個適當尺寸的頭模，在BS EN 960:2006定義的A 點與F 點中間標示一個B 點(參閱圖2.4)。
- 把安全帽置放在頭模上。將一個50N 的垂直載重施加在安全帽的冠部，以便將安全帽穩定在頭模上面。將安全帽的前緣放置在規定的仰視範圍。
- 在安全帽(AA'平面內)畫一條AA"線。
- 在安全帽上的AA"線上方畫一條約成20mm 的平行線(或做為一條角度測量基準線)。
- 在安全帽上標出B1點和B2點。這兩點是B 點以側向水平，在安全帽外表面上投射出來的。
- 沿著B1點和B2點畫一條RR'線，使RR'線與安全帽前方的基準線依上述第四點中所畫成的線成10°仰角。

3. 測試剛鉗規範

- 平鉗

直徑為(130±3)mm 的圓形撞擊面的鋼鉗，如圖2.5所示[39]。

- 路邊石鈔

鋼鈔具有兩個垂直傾斜(52.5 ± 2.5)°的表面、且與撞擊邊接觸半徑為(15 ± 0.5)mm。鋼鈔的高度不得低於50mm，且其長度不低於125mm，如圖2.6所示[39]。

2.1.3 安全帽撞擊測試標準

安全帽須能保護配戴人的前額、頭部後側、兩側和頭頂等部位。在1.5公尺與1.06公尺的高度落下分別撞擊平鈔與路邊石鈔下，每一次撞擊的頭部重心位置加速度值皆不得超過250g。

2.2 美國 CPSC:16 CFR Part 1203 標準

本標準規範由美國國會授命於消費者安全委員會 CPSC(Consumer Product Safety Commission)在1994年負責編製美國國家自行車安全帽標準。並與美國材料和試驗協會 ASTM(American Society for Testing and Materials)合作提出兩個草案並公開徵求意見，並在1998年2月發布此標準的各項規範。該標準規範涵蓋1999年3月10日以後美國國家所生產的安全帽。以下僅針對美國 CPSC 標準中對安全帽撞擊吸收性能的測試程序、規範與標準進行說明。

2.2.1 安全帽撞擊測試程序

美國CPSC:16 CFR Part 1203標準所規範的動態撞擊測試是使用單軌碰撞測試機，如圖2.7所示，測試係以一個繫上測試安全帽的頭部模型固定在試驗台上的球臂/卡圈組件，分別將其放置在2公尺的高度沿著軌道撞擊平鉗、在1.2公尺的高度沿著軌道撞擊路邊石鉗及在1.2公尺的高度沿著軌道撞擊圓鉗，量測放置在安全帽的頭部模型重心位置之加速度值可否符合標準要求範圍內，其相關資料如表2.1。

2.2.2 安全帽撞擊測試規範

1.頭部模型規範

使用之頭模須符合ISO/DIS 6220-1983[40]的規定，如圖2.8所示。測試頭模時，應使用表2.3中的尺寸，但為判定吸震能力時，5歲以上配戴者之頭部模型有ISO A、ISO E、ISO J、ISO M 與ISO O項可使用，而4歲以下配戴者之頭部模型僅有ISO A及ISO E 可使用。

2.測試區域規範

- 依照安全帽尺寸選擇適當的ISO頭部模型，把安全帽放置在頭部模型上。
- 圖2.9為5歲以上配戴者之測試區域示意圖，在安全帽上畫上測試線，其對應之尺寸如表2.4所示。

- 圖2.10為4歲以下配戴者之測試區域示意圖，在安全帽上畫上測試線，其對應之尺寸如表2.5所示。
- 測試線以上的區域可以任意選擇撞擊鈗座的點。

3.測試剛鈗規範

- 平鋼鈗

直徑為 (125 ± 3) mm 的圓形撞擊面的鋼鈗，如圖2.11所示[39]。

- 路邊石鈗

路邊石鈗是兩個垂直傾斜 $(52.5\pm 2.5)^\circ$ 的表面、且以 (15 ± 0.5) mm 半徑與撞擊邊接觸的鋼鈗。鋼鈗的高度不得低於50mm，且其長度不低於125mm，如圖2.12所示[39]。

- 圓鈗

圓鈗是一個半徑 (48 ± 1) mm半球形撞擊平面的剛鈗，如圖2.13所示[39]。

2.2.3 安全帽撞擊測試標準

安全帽須能保護配戴人的前額、頭部後側、兩側和頭頂等部位。在2公尺、1.2公尺及1.2公尺的高度落下分別撞擊平鈗、路邊石鈗及圓鈗下，每一次撞擊的頭部重心位置加速度值皆不得超過300g。

2.3 澳大利亞 SNELL B95 標準

本標準規範由SNELL紀念基金會(Snell Memorial Foundation)所編製，在1995年發布此標準各項規範，為滿足成人及年齡較大的兒童的安全帽防護性能並於1998年修訂本標準。該基金會是一個致力於安全帽標準的研究、測試和研發的非營利性組織。此標準比其他國家標準都較為嚴苛，其損傷規範標準也較其他標準高，SNELL基金會檢測過程是先要安全帽製造商送上五頂安全帽作檢測，其中四頂在檢測過後會被破壞，剩餘一頂會被SNELL基金會留存作為樣品。廠商送來的樣品即使通過SNELL的檢證，SNELL基金會還會定期在市面抽樣購買安全帽作抽樣檢查，以確保產品能一直符合此標準。以下僅針對澳大利亞SNELL B95標準中對安全帽撞擊吸收性能的測試程序、規範與標準進行說明。

2.3.1 安全帽撞擊測試程序

澳大利亞SNELL B95標準所規範的動態撞擊測試是使用單軌碰撞測試機，如圖2.7所示，測試係將一個繫上測試安全帽的頭部模型固定在試驗台上的球臂/卡圈組件，分別將其放置在2.2公尺的高度沿著軌道撞擊平鉗、在1.3公尺的高度沿著軌道撞擊路邊石鉗及在1.3公尺的高度沿著軌道撞擊圓鉗，量測放置在安全帽內頭部模型重心位置之加速度值可否符合標準要求範圍內，其相關資料如表2.1。

2.3.2 安全帽撞擊測試規範

1. 頭部模型規範

同樣使用與CPSC標準規定相同的頭模，須符合 ISO/DIS 6220-1983 的規範。測試頭模時，應使用表2.3中的尺寸，但為判定吸震能力時，5歲以上配戴者之頭部模型有ISO A、ISO E、ISO J、ISO M 與ISO O 項可使用，而4歲以下配戴者之頭部模型僅有ISO A及 ISO E 可使用。

2. 測試區域規範

- 依照安全帽尺寸選擇適當的ISO頭部模型，把安全帽放置在頭部模型上。
- 圖2.14為5歲以上配戴者之測試區域示意圖，在安全帽上畫上測試線，其對應之尺寸如表2.6所示。
- 圖2.15為4歲以下配戴者之測試區域示意圖，在安全帽上畫上測試線，其對應之尺寸如表2.7所示。
- 測試線以上的區域可以任意選擇撞擊鉗座的點。

3. 測試剛鉗規範

- 平鉗

直徑為 (127 ± 3) mm 的圓形撞擊面的鋼鉗，如圖2.11所示[39]。

- 路邊石鉗

路邊石鉗是兩個垂直傾斜 $(52.5\pm 2.5)^\circ$ 的表面、且以 (15 ± 0.5) mm 半徑與撞擊邊接觸的鋼鉗。鋼鉗的高度不得低於50mm，且其

長度不低於125mm，如圖2.12所示[39]。

- 圓鈎

圓鈎是一個半徑 (48 ± 1) mm半球形撞擊平面的剛鈎，如圖2.13所示[39]。

2.3.3 安全帽撞擊測試標準

安全帽須能保護配戴人的前額、頭部後側、兩側和頭頂等部位。在2.2公尺、1.3公尺及1.3公尺的高度落下分別撞擊平鈎、路邊石鈎及圓鈎下，每一次撞擊的頭部重心位置加速度值皆不得超過300g。



圖 2.1 三軸碰撞測試機[39]



圖 2.2 全頭部模型[39]



圖 2.3 A、E、J、M、O 頭部模型[39]

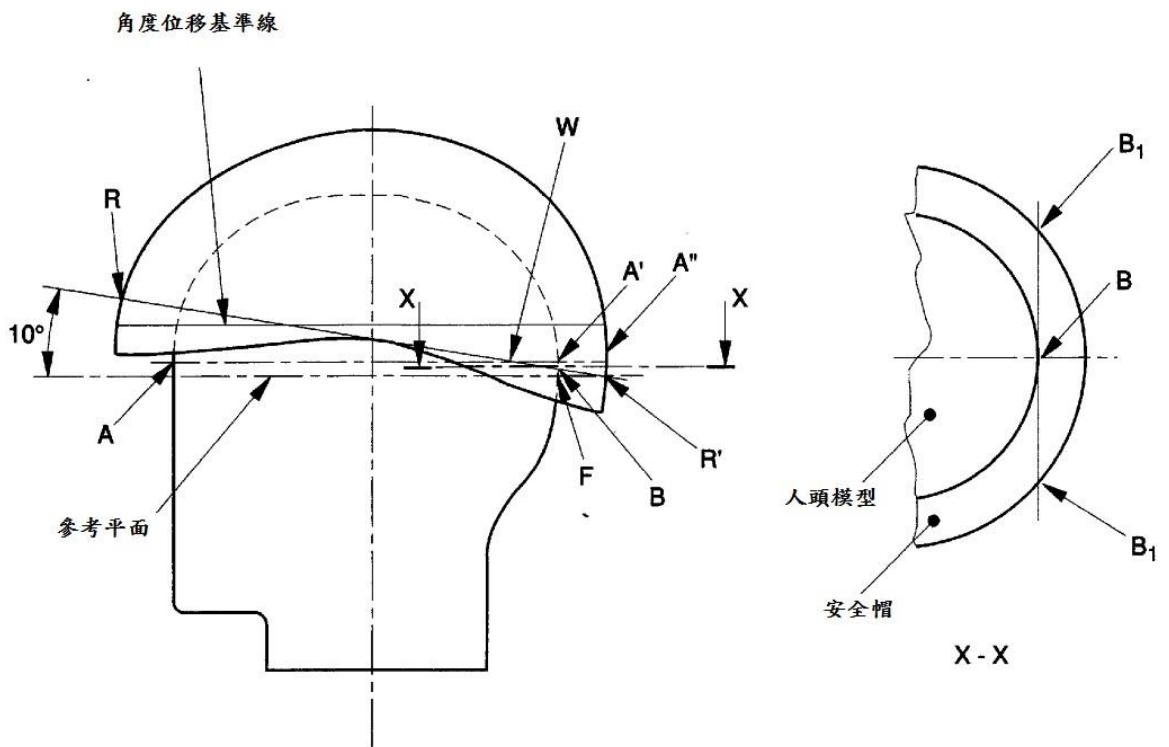


圖 2.4 EN 1078:2006 測試區域[3]



圖 2.5 三軸碰撞測試平鉗[39]



圖 2.6 三軸碰撞測試路邊石鉗[39]



圖 2.7 單軌碰撞測試機[39]



圖 2.8 半頭部模型[39]

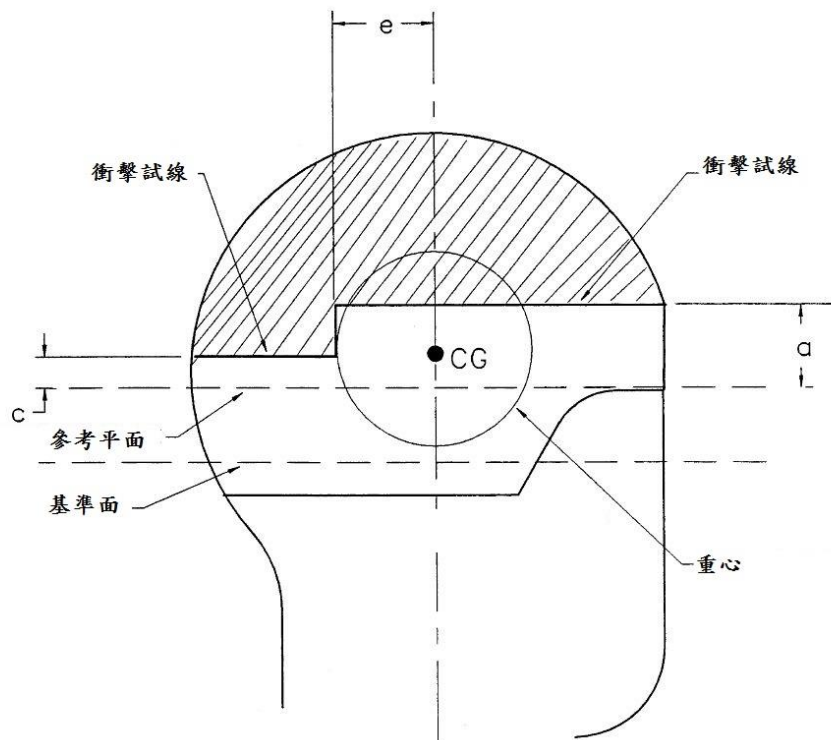


圖 2.9 CPSC 5 歲以上配戴者撞擊測試區域[4]

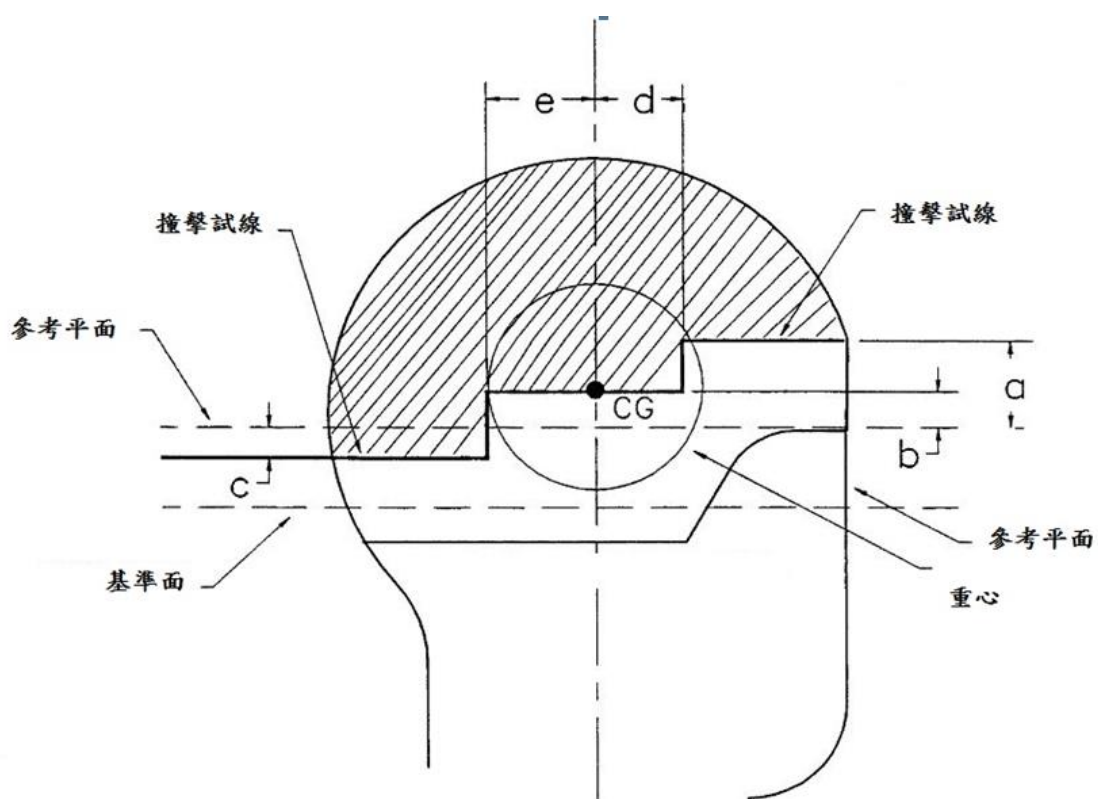


圖 2.10 CPSC 4 歲以下配戴者撞擊測試區域[4]



圖 2.11 單軌碰撞測試平鉗[39]



圖 2.12 單軌碰撞測試路邊石鈎[39]



圖 2.13 單軌碰撞測試圓鈎[39]

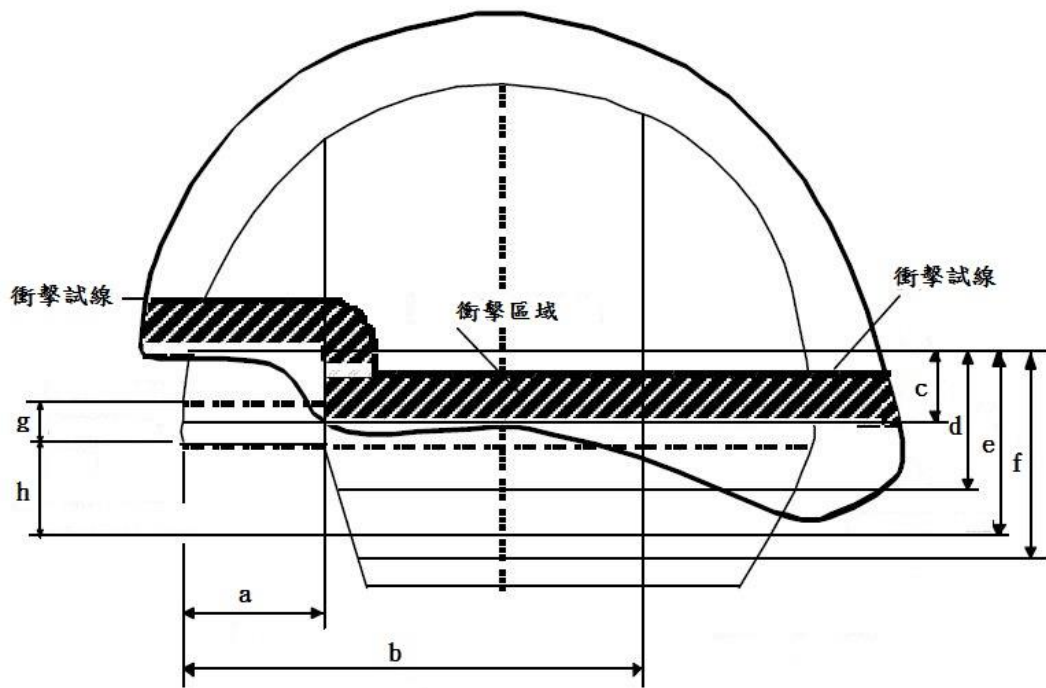


圖 2.14 SNELL B95 5 歲以上配戴者撞擊測試區域[5]

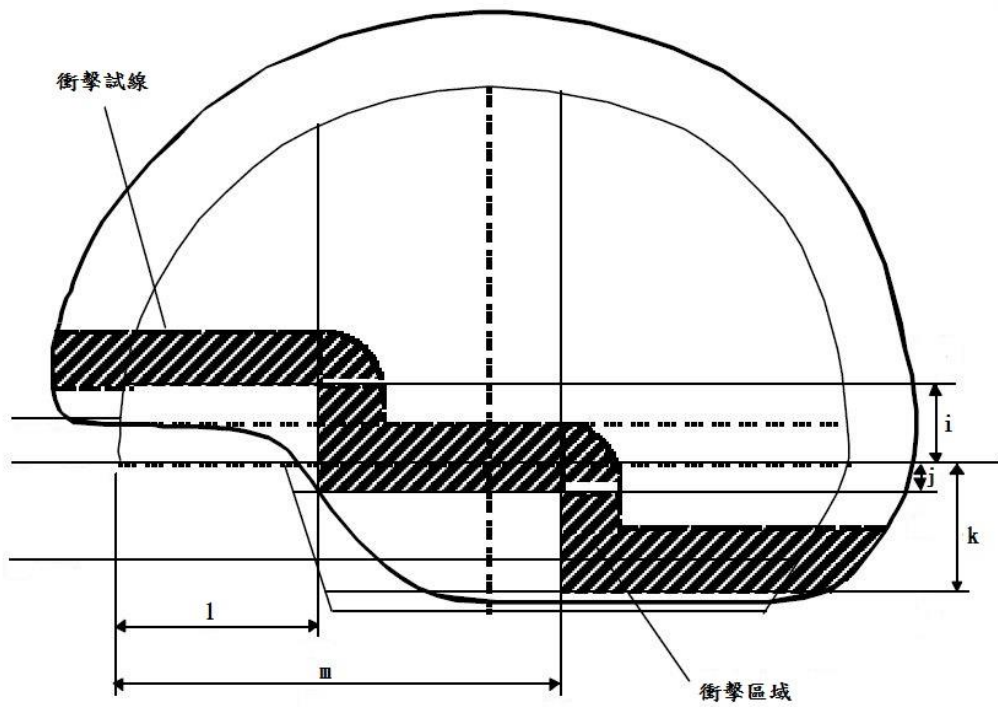


圖 2.15 SNELL B95 4 以下戴者撞擊測試區域[5]

表 2.1 歐盟、美國及澳洲衝擊測試標準相關資料

衝擊標準		EN1078	CPSC	SNELL B95
測 試 方 法	衝擊 速度	Flat:5.42 m/s Curbstone:4.57 m/s	Flat:6.2m/s Curbstone:4.8m/s Hemi:4.8 m/s	Flat:6.63 m/s Curbstone:5.37m/s Hemi:5.37 m/s
	衝擊 高度	Flat:1.50 m Curbstone:1.06 m	Flat:2.0 m Curbstone:1.2 m Hemi:1.2 m	Flat:2.2 m Curbstone:1.3 m Hemi:1.3 m
	衝擊 儀器	三軸撞擊試驗機	單軌撞擊試驗機	單軌撞擊試驗機
頭 模	形式	全頭模	半頭模	半頭模
	規範	EN 960	ISO-DIS 6220:1983	ISO-DIS 6220:1983
損 傷 標 準	頭部 加速度 (G)	Flat:250 G Curbstone:250 G	Flat:300 G Curbstone:300 G Hemi:300 G	Flat:300 G Curbstone:300 G Hemi:300 G

表 2.2 EN960 頭部模型尺寸

頭部模型種類	頭部模型圓周(mm)
A	500
E	540
J	570
M	600
O	620

表 2.3 ISO/DIS 6220-1983 頭部模型尺寸

頭部模型種類	頭部模型圓周(mm)
ISO A	500
ISO E	540
ISO J	570
ISO M	600
ISO O	620

表 2.4 CPSC 5 歲以上配戴者測試區域尺寸對應表

頭部模型種類	尺寸(mm)		
	a	c	e
ISO A	38	27	49
ISO E	39	27	52
ISO J	41	27	54
ISO M	41	27	55
ISO O	42	27	56

表 2.5 CPSC 4 歲以下配戴者測試區域尺寸對應表

頭部模型種類	尺寸(mm)				
	a	c	c	d	e
ISO A	30	12.7	15	25	30
ISO E	32	12.7	16	27	32

表 2.6 SNELL B95 5 歲以上配戴者測試區域尺寸對應表

頭部模型種類	尺寸(mm)							
	a	c	c	d	e	f	g	h
ISO A	39.0	128.6	17.4	34.8	46.8	52.2	24.0	12.7
ISO E	42.2	139.0	18.8	37.6	50.0	56.4	26.0	12.7
ISO J	45.2	148.4	20.0	40.0	53.0	60.0	27.5	12.7
ISO M	47.4	155.8	21.0	42.0	55.2	63.0	29.0	12.7
ISO O	49.2	161.5	21.7	43.5	57.2	64.5	30.0	12.7

表 2.7 SNELL B95 4 歲以下配戴者測試區域尺寸對應表

頭部模型種類	尺寸(mm)				
	I	J	K	L	m
ISO A	15	3	30	48	103
ISO E	17	3	32	52	111

第三章 自行車安全帽數值分析之理論基礎

本論文以自行車安全帽為研究對象，主要探討碰撞分析為大位移及大變形之瞬時、動態、非線性(含幾何非線性及材料非線性)之問題，且必須考量安全帽撞擊後頭部模型加速度及損傷情形等，另靜態分析為小變形及小位移之線性靜態問題，必須考慮其垂直位移量、扭轉角度以及重量負載力，故本論文採用 LS-DYNA3D[41]軟體進行研究。

LS-DYNA3D 為一套泛用型有限元素分析軟體，最早起源於 1976 年，由 J. O. Hallquist 博士在美國勞倫斯實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory ; LLNL)開發此套軟體，早期研究主要在計算結構物受衝擊負荷時的應力分析，而後 J. O. Hallquist 博士成立了 Livermore Software Technology Corp.(LSTC)，經過歷年的發展，LS-DYNA3D 強大功能已廣為世界各地使用者的認同，它同時包含了顯性求解法 (Explicit Method) 與隱性求解法 (Implicit Method) 兩種求解模式，顯性求解法特別適合於非線性及接觸性 (Contact) 等問題的求解，以多種的碰撞模式更能提供高度的準確性，可以模擬現實生活中的複雜碰撞問題，並提供 140 種以上的材料模型資料庫與狀態方程式，再配合功能完備之前後處理器，使得在處理自行車安全帽受到撞擊後的安全帽潰縮及頭模的加速度值 (力量)、貫穿、爆炸等數值模擬上具有相當多元化的實用性。亦可應用於掉落、衝擊模擬分析與模擬(如掉落/震動測試模擬、汽車防撞模擬、乘客安全分析、包裝材料設計)、靜態力學及自然頻率分析、製造成型分析(如鈹金成型、玻璃成型)、飛彈穿透及炸藥爆炸

等國防航太分析、生物力學分析、地震工程分析等問題。且 LS-DYNA 可針對不同作業系統(Windows XP、Windows 7)進行平行處理運算，故採用 LS-DYNA 有限元素分析軟體可適用模擬自行車安全帽分析之工具。

3.1 自行車安全帽碰撞之數值分析理論

LS-DYNA3D 軟體應用有限元素法將實際的物理系統數學模型化，得到偏微分方程式、初始條件及邊界條件予以求解。在標準的有限元素法當中，空間與時間的離散是分開的，首先，偏微分方程式藉由積分轉換得到二階常微分方程式加上起始條件的離散化系統，再由逐步的時間積分而求得近似解。

本文採用 LS-DYNA3D 有限元素分析軟體進行自行車安全帽碰撞測試之加速度值分析。以下將針對本論文採用的 LS-DYNA3D 之基本理論與應用技巧進行簡要說明。

3.1.1 運動方程式

連體之運動以質量、動量及能量等三大守恆方程式加以描述，其表示法有Lagrangian、Eulerian、ALE三種描述方式，但尚不足求解車輛碰撞之動態問題，因其變數比方程式多如材料應力應變關係、應變率效應、工作硬化、邊界條件等，故尚須針對材料組構關係以及運動方程式，如此才能求解。由於數值模擬分析軟體於固體力學及碰撞問題分析是採用Lagrangian描述法，因為觀察重點於結

構之變形過程，因此使用Lagrangian描述法，其將元素網格定義在物體上，隨著物體移動而變形，各網格質量保持守恆，但體積是可以隨時間改變。優點為物體邊界、自由面及元素邊界一致，且邊界較易被描述而定義出較複雜之邊界，具有追蹤節點隨時間歷程變化之能力；缺點為處理大變形問題時，網格會嚴重扭曲甚至產生負體積(negative volume)或使得時間步幅(time step)變得過小，終使得程式發生數值錯誤而無法收斂。為避免這些現象可採用侵蝕法(erosion algorithm)，當元素變形達到元素破壞準則(failure criteria)時，程式則會啟動破壞模式將元素刪除，如此可避免元素網格發生嚴重扭曲致使步幅變小之現象發生。一般碰撞及固體力學問題多採用此種方法，而本文的觀察重點在於自行車安全帽衝擊之過程，因此選用Lagrangian描述法較為適宜。

3.1.2 時間積分(Time Integration)

一般時間積分可歸納為隱性(implicit)積分法和顯性(explicit)積分法，如表 3.1 為顯性與隱性積分法優缺點之比較；靜態分析為小位移及小變形之線性靜態問題，因而適用隱性積分法來處理此問題，隱性積分法是一種無條件式穩定，即使時間步幅很大亦會穩定，所以與時間無太大關係，其過程以非線性疊代解法(iterative method)來計算，由疊代計算而達到收斂；自行車安全帽之碰撞動態反應分析為大位移及大變形之非線性暫態動力問題，其所有微分方程均與時間及空間之導數有關，因而適用顯性積分法來處理此問題，顯性積分法是一種有條件式穩定，即須採用很小之時間步幅才

會穩定。但在處理非線性疊代解法過程中，為了避免非線性數值解之收斂問題，對於暫態有限元素問題，宜採用顯性積分法較妥。此法雖然須採用較小之時間步幅，通常需花費較多之計算時間，但因其處理之問題本身時間通常也很短暫，故可採用更小之時間步幅來處理，如撞擊、貫穿和爆炸等問題。故本文使用之 LS-DYNA3D 軟體則採用顯性(explicit)積分法。

3.2 數值分析流程與設定

本論文使用軟體為 LS-DYNA3D 套裝程式，包含前處理、主程式處理、後處理三大部分，以 FEMB(Finite Element Builder)以及 HyperMesh 為前處理器，LS-Post 為後處理器與 LS-DYNA3D 為主程式求解器之計算單元(Solver)，圖 3.1 為[41]LA-DYNA3D 數值分析之流程。以下為自行車安全帽運用於程式系統之前、後處理及主程式之計算單元逐一說明。

3.2.1 前處理

本論文採用 FEMB(Finite Element Builder)以及 Hypermesh 為前處理，由於 Hypermesh 在劃分網格的功能較 FEMB 更為完善，且 Hpermesh 及 FEMB 也一併支援其他 CAD 或前處理軟體(如 Pro/E、Solidworks、ANSYS、MADYMO 等)進行資料連結和轉換之工作，故在網格劃分、有限元素情境建構等方面採用 Hypermesh。而材料性質及元素屬性之設定、邊界條件之定義，並設定自行車安全帽碰

撞後之動態反應分析現象(如內能、動能、位移變形量、加速度、作用力等)的輸出是採用 FEMB，最終將.Dyn 檔匯入 LS-DYNA3D 計算單元(Solver)來進行計算。

1. 網格劃分

自行車安全帽分析中之襯墊、外殼及下巴繫帶是使用面劃分方式進行，將幾何圖形之每一個面進行幾等份劃分，亦可進行多面劃分，而劃分網格時可按照所需尺寸進行劃分工作。切格完成後須檢查節點是否有重複或網格破裂之情形，以避免後續設定之問題。故網格變形量過大或嚴重扭曲時，易造成數值誤差或負體積(negative volumn)及不穩定外，並使得程式計算的時間增量過小而無法進行計算，最後使得程式發生數值錯誤而停止計算，因而將元素網格扭曲嚴重之區域，進行元素網格重新細分，使得時間增量增加，以繼續程式的計算。

而 Hypermesh 軟體具有元素網格再細分之功能，使用者可以選定元素網格扭曲嚴重的區域，將元素網格重新劃分(調整該區域邊界上的節點間距並重新劃分該區的元素網格)後，再檢查同位置共點問題，經過元素網格重劃後，程式計算的時間增量因元素特徵長度增長而增加，使得程式可以重新進行計算。

2. 元素選擇

LS-DYNA 程式中，常用的元素可大致分為五種種類: 1D 線元素:樑元素及桿元素; 2D 殼元素(Shell):四邊形元素、三角形元

素； 3D 固體元素:四面體元素、五面體元素、六面體元素；OD 純量元素:彈簧元素、阻尼元素；其他元素:質量元素(Mass)、約束元素(Spotweld、nodal rigid body)等。本論文採用之元素型式說明如下:

- (1) 殼元素(Shell)如圖 3.2 所示，殼元素在本論文中使用在外殼及下巴繫帶，依其性質介紹兩種常用殼元素：(a) Belyschko-Tsay 殼元素，屬於單積分點，每個節點分別有三個平移及三個旋轉的自由度，電腦運算速度快，適合用於大變形及抵抗彎曲作用，本論文採用此種殼元素做為外殼及下巴繫帶之元素。(b) Hughes-Liu 殼元素: 有四個積分點，每個節點分別有三個平移及三個旋轉的自由度，元素上之厚度可為非等厚度。
- (2) 固體元素(Solid)如圖 3.3 所示，以其性質介紹兩種常用固體元素：(a)Constant Stress Solid 固體元素:屬於單點積分，每個節點有三個自由度，可以承受大量非線性變形，本論文採用此種固體元素做為引擎及模擬乘客重量之元素。(b)Fully Integrated S/R Solid 固體元素:元素有 8 個積分點對於線性材料來說太硬較不適合，電腦運算時間也增加許多。

3. 材料模式選擇

在LS-DYNA中有超過140多種材料模型並建立成資料庫，包含剛體、彈性體、彈塑性體、黏彈性體、橡膠、複合材料、玻璃、土壤等，同時也加入了材料的應變率、破壞、狀態方程及熱效應等。由於在有限元素分析上要提高模擬問題之準確性，獲得材料

類型及參數是必要的，並且根據元素的形式選擇，使用者可依問題分析之需求來選用適合之材料。本論文所採用之材料類型如下：
(1)彈塑性材料，如圖3.4所示：用於外殼及下巴繫帶結構；(2) 剛性材料：用於頭部模型及測試鉗等結構；(3)低密度泡沫材料，如圖3.5所示：用於襯墊結構。

4.邊界條件設定

- (1) 自由度設定：可將模型上之節點平移(U_x , U_y , U_z 方向)及旋轉(θ_x , θ_y , θ_z)限制方向，依照外在環境狀況考慮模擬分析時刻狀況之設定。在設定欄中 0 代表方向沒有受到限制、1 代表方向受到限制，本論文在設定上限制了測試鉗的節點平移(U_x , U_y , U_z 方向)及旋轉(θ_x , θ_y , θ_z)。
- (2) 負載設定：可輸入速度、加速度、集中力、均佈力、重力等初始條件進行模擬分析。

5.接觸面處理

LS-DYNA程式內建超過40多種接觸型態供使用者選擇，接觸型態可分為下列幾種模式：Auto、Eroding、Forming、Tiebreak、Sliding、Single、Constraint等方式，每種接觸型態都有面對面、點對點、自身面的接觸設定。在LS-DYNA程式中處理撞擊問題時，會以滑動線(Slide Line)作為撞擊物(如自行車安全帽及頭部模型結構)及被撞擊物(如測試鉗)之參考依據，且在軟體中將撞擊問題分為主區域(Master)及次區域(Slave)，在每一段時間步階均要檢查次區域(Slave)上節點是否穿透主區域(Master)之節點，圖3.6

所示主區域及次區域示意圖。此外對於接觸還需要考量摩擦力及自身接觸的問題，若主次區域之間無摩擦力將會產生滑動的現象，故依據材料及元素性質給予摩擦力以符合現實世界中之情形，此外在自身接觸問題上也需考量，撞擊為複雜的大變形行為，自身面也會因扭曲而接觸，故在設定接觸時必須一併考量。適用於碰撞問題之接觸有Auto、Tiebreak、Constraint等，但以Auto方式設定最為方便，也可避免對某構件設定方式有錯誤，因此本論文處理接觸問題時將採用 Automatic-surface-to-surface 模式為主。

6.時間步數控制(Time Step Control)與收斂準則

在LS-DYNA軟體中，時間步數控制是以元素中最小值來決定步數的大小，內建預設範圍為0.67~0.9，若使用者不設定時間步數控制，LS-DYNA將會採取默認值根據元素中最小時間步數來決定。而顯性積分法與隱性積分法分別為有條件式穩定及無條件式穩定，顯性積分法必須採用很小的時間步數才會穩定；而隱性積分法即使時間步數設定很大也會穩定。但在處理非線性疊代解法(iterative method)過程中，為了避免非線性數值解之收斂問題，對於暫態有限元素問題，宜採用顯性積分法較妥。此法雖然採用較小之時間步幅，通常會花費較多之計算時間，但因其處理碰撞過程之問題其本身時間通常也很短暫，故可採用更小之時間步幅來處理收斂。

3.2.2 LS-DYNA3D 主程式處理

LS-DYNA 處理階段是將在前處理編輯好之.DYN 檔匯入並進行求解計算，在 LS-DYNA 所應用到之方程式包括了質量守恆、動量守恆、能量守恆、運動方程式等，經由繁複的計算且透過有限元素法對時間積分，將邊界條件及初始條件代入計算，得到系統編排輸出的資料，可得到變形、速度、加速度、內能、動能、撞擊力、應力、應變等在某一時間或整體分析時間歷程之資料。

3.2.3 後處理

透過 LS-DYNA 計算完成後將 d3Plot 檔案匯入 LS-Post 後處理軟體，在此可觀測包含幾何圖形、動能、內能、速度、加速度、變形、節點位移等相對於時間歷程之曲線圖、等高應變圖、變形圖等。此軟體亦提供動畫及圖片檔錄製，藉由上述功能可觀測整體碰撞分析時測試鈎以及自行車安全帽其應力波之傳遞，軟體並具有部分結構隱藏功能，以突顯重要結構之相對作用並有利於觀察。

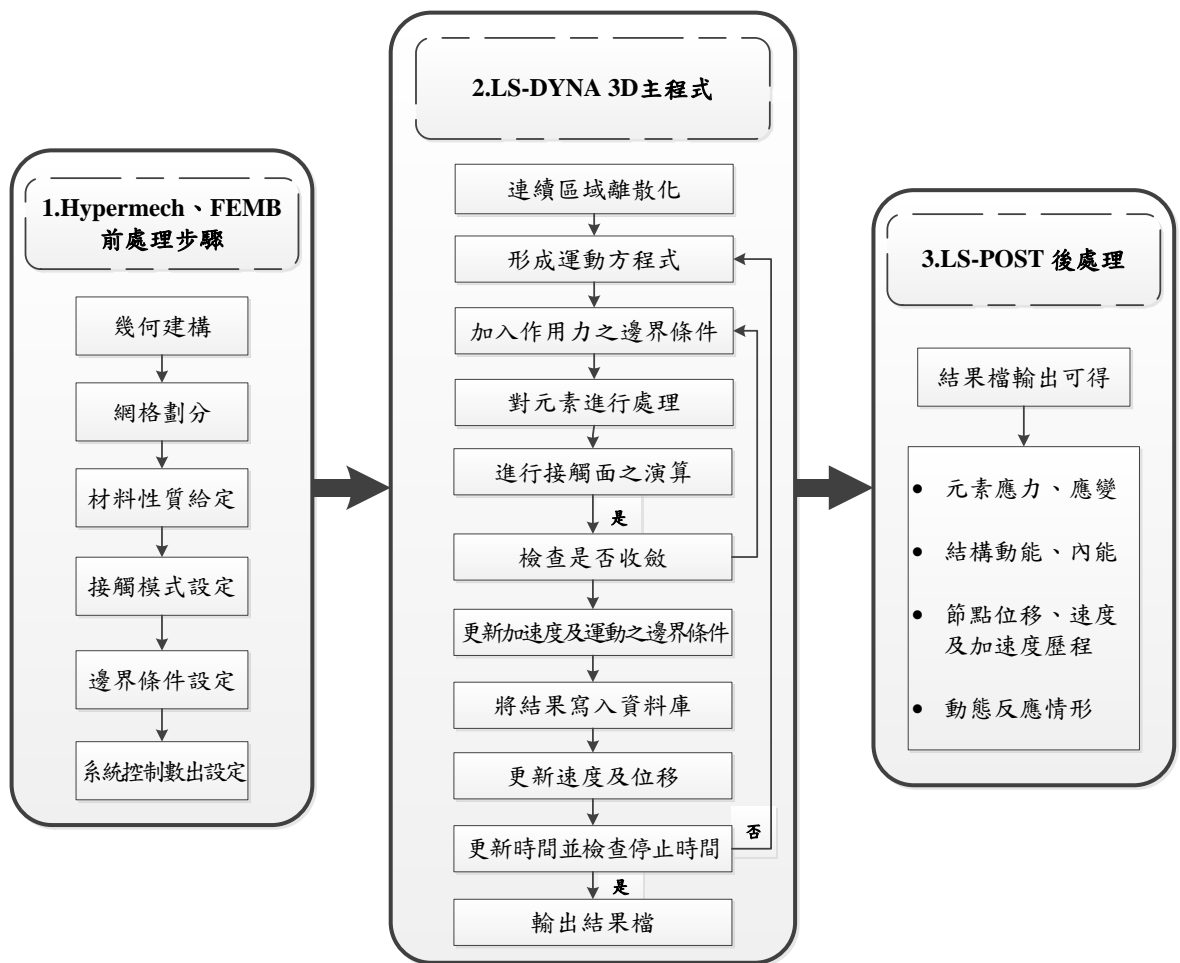


圖 3.1 LS-DYNA3D 數值模擬分析流程[41]

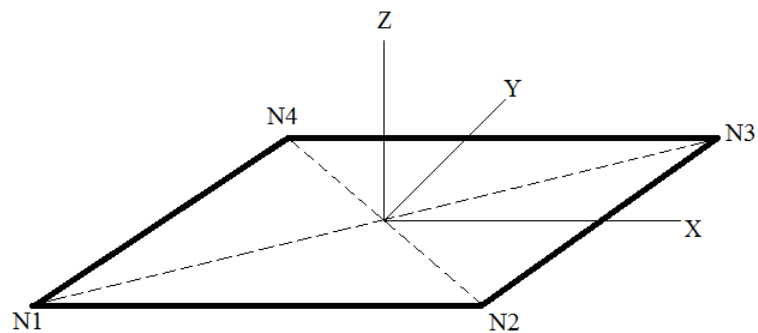


圖 3.2 殼元素示意圖

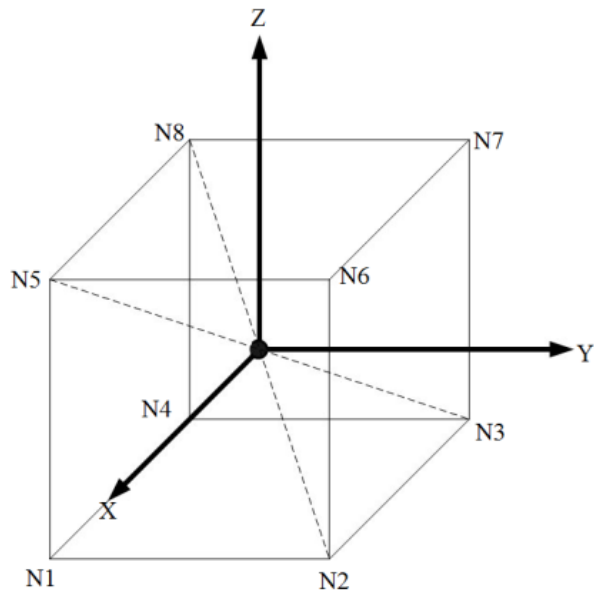


圖 3.3 固體元素示意圖

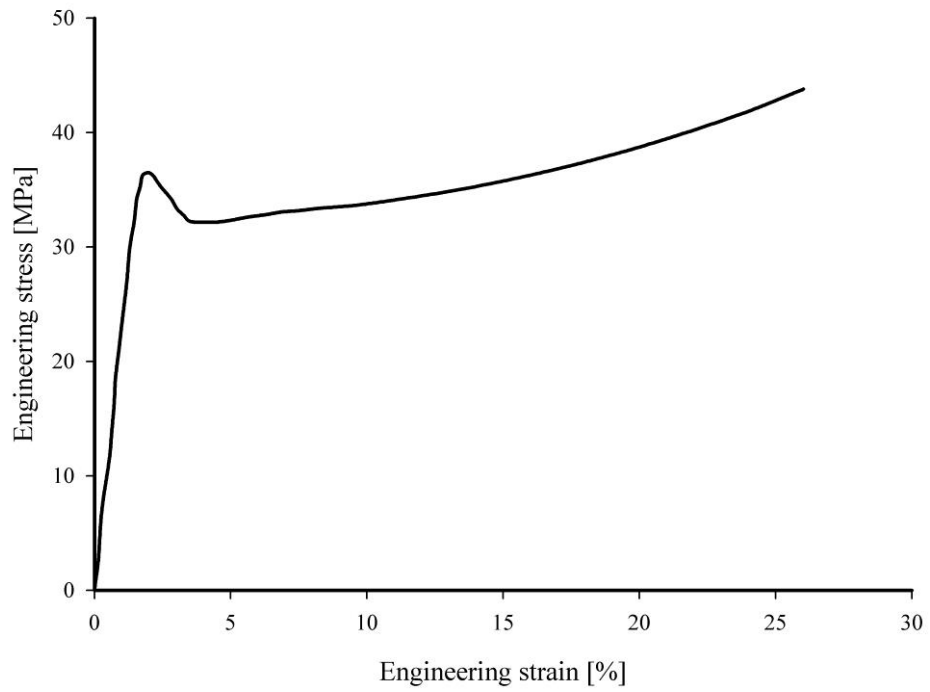


圖 3.4 彈塑性材料示意圖

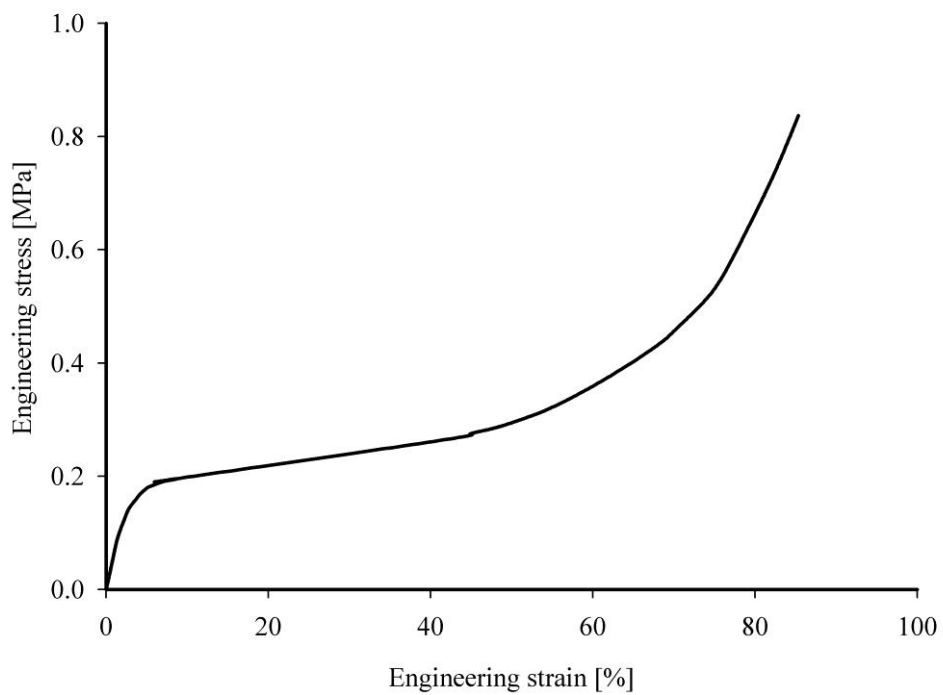
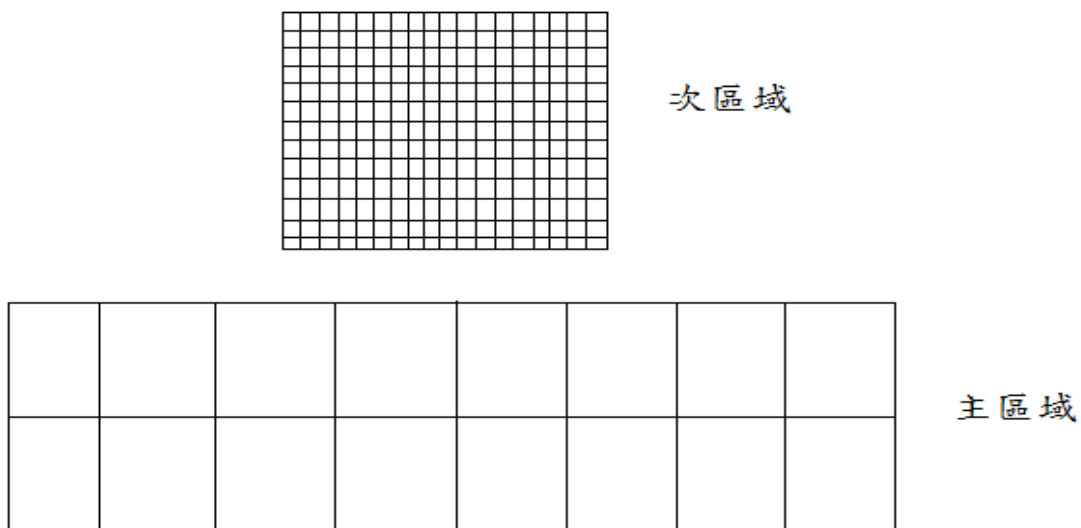


圖 3.5 低密度泡沫塑性材料示意圖



註:主區域之元素尺寸較次區域大

圖 3.6 主區域及次區域示意圖

表 3.1 顯性與隱性積分法優缺點之比較

項目 \ 區分	顯性積分法	隱性積分法
物理問題之適用性	快速暫態反應、快速負載與高度非線性	穩態、低頻、低速、簡單載重、輕微非線性
軟體之撰寫	邏輯較簡單	邏輯較複雜
時間間格	小	大
遞迴與收斂	不需要	需要

第四章 EN 1078 自行車安全帽撞擊測試 有限元素模型

在自行車安全帽撞擊測試中，皆以撞擊測試用的頭部模型進行安全帽撞擊安全性評估，而頭部模型重心位置的加速度值則是評價安全帽安全性的主要依據。一般自行車安全帽撞擊測試須藉由昂貴的設備與繁瑣的程序來完成，在電腦運算能力的提升與分析軟體成熟的發展之下，撞擊測試可採用數值模擬方法替代，即是利用有限元素法來模擬撞擊測試環境，計算頭部模型反應，以節省測試時間與成本。人體頭部有限元素模型已廣泛被使用在汽車內空氣囊對乘員安全性的評估上，同樣在評估自行車安全帽對頭部的保護性，亦可使用人體頭部有限元素模型進行安全帽撞擊測試模擬。本章節將依據 EN 1078:2006 安全帽撞擊測試標準建構有限元素撞擊測試模型，由於 EN1078:2006 規範的測試標準是採用撞擊試驗台進行安全帽撞擊測試，為了真實模擬安全帽撞擊測試環境，除建構安全帽的有限元素模型外，尚須建構撞擊測試標準所規範的鋼鉗與頭部有限元素模型。最後為了確認所建構撞擊測試有限元素模型的正確性，安全帽撞擊測試模擬結果並與實驗測試結果作一比較。

4.1 安全帽有限元素模型

本文之安全帽有限元素模型係依據市售捷安特(GIANT)自行車安全帽來建構，商品編號為 CGAF13-A603222793[44]，具 15 孔透氣通風設計的安全帽，適合頭圍尺寸 58 至 63cm，如圖 4.1 所示。

首先利用三維掃描儀(3D scanner)以非接觸式主動掃描(non-contact active)來建立實際物體的數位模型(如圖 4.2)；並由 Rapidform 逆向檢測工程軟體重新設計 3D 掃描建立的粗糙模型，再匯入到 Catia 3D 繪圖軟體，依照內襯形狀長成安全帽外殼及建立下巴繫帶等組件，如圖 4.3 所示。最後將建立好的模型導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分後，再匯入到 LS-DYNA 有限元素軟體進行各部件的接合、參數設定及分析等前、後處理之設定。

自行車安全帽有限元素模型如圖 4.4 所示，模型部件總共有 3 個組件，50,332 個節點、60,874 個固體元素(solid element)及 3,960 個殼元素(Shell element)；其中固體元素為八節點之元素，每節點為 3 個自由度，殼元素分為 3 節點之三角形及 4 節點之四邊形元素，每節點為 3 個平移自由度與 3 個旋轉自由度。安全帽模型各部件之節點數、元素數、元素型式等如表 4.1 所示，另部件之材料及設定說明如下。

4.1.1 內襯

內襯須具有防震、抗撞擊、保濕隔熱功能，材料是密度為 25kg/m^2 的發泡聚苯乙烯(Expandable PolyStyrene, EPS)。安全帽內襯模型是由 45,843 個節點，60,874 個固體元素所組成的，如圖 4.5 所示。在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT57_LOW_DENSITY_FOAM 材料模型，其材料參數如表 4.2 所示，應力應變曲線如圖 4.6 所示[18]。

4.1.2 外殼

外殼須具有防火耐熱功能，材料是厚度為 1mm 的聚氯乙烯(Poly Vinyl Chloride, PVC)。安全帽外殼模型是由 3,653 個節點，3,342 個殼元素所組成的，如圖 4.7 所示。在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT24_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型，其材料參數如表 4.2 所示，應力應變曲線如圖 4.8 所示[42]。

4.1.3 下巴繫帶

下巴繫帶須具有拉伸、抗撞擊強度，材料為聚對苯二甲酸乙二酯(Polyethylene Terephthalate, PET)。下巴繫帶模型是由 836 個節點，618 個殼元素所組成的，如圖 4.9 所示。在 LS-DYNA 材料模型資料庫採 *MAT24_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型，其材料參數如表 4.2 所示。

4.2 頭模有限元素模型

建構頭部模型係依據歐盟自行車安全帽標準 BS EN 1078:1997 所建議的歐盟自行車頭模標準 BS EN960:2006[38]中選擇一個充分適合此安全帽的頭模尺寸，圓周為 575 mm 及標號為(J)的頭模。首先以 Catia 3D 繪圖軟體按照標準規範繪製出一個 3D 幾何封閉圖形，如圖 4.10 所示。將建立好的模型導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分，再匯入到 LS-DYNA 有限元素軟體進行參數設定。本節建構尺寸(J)的頭部模型是由 3,534 個節點，15,620 個固體元素所組成的，如圖 4.11 所示。頭部模型的材料使用標準規定具有質堅量輕、密度低、抗壓性較強的鎂鋁合金(aluminium magnesium alloy)，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT20_RIGID 材料模型，其材料參數如表 4.2 所示。

4.3 鋼鉗有限元素模型

本節將根據 EN 1078:2006 自行車安全帽標準建構鋼鉗模型，首先由 Catia 3D 繪圖軟體分別繪製，再將兩個鋼鉗幾何圖形導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分，最後匯入到 LS-DYNA 有限元素軟體進行參數設定。

4.3.1 平鈔(flat anvil)

平鈔模型是由 491 個節點，860 個固體元素所組成的，如圖 4.12 所示。平鈔的材料為的鋼材，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT20_RIGID 材料模型，其材料參數如表 4.2 所示。

4.3.2 路邊石鈔(curbstone)

路邊石鈔模型是由 640 個節點，958 個固體元素所組成的，如圖 4.13 所示。路邊石鈔的材料為鋼材，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT20_RIGID 材料模型，其材料參數如表 4.2 所示。

4.4 EN 1078 標準之安全帽撞擊測試模型

本節根據歐盟 EN 1078:2006 標準來進行安全帽之平鈔及路邊石鈔撞擊測試數值模擬，在建構安全帽撞擊測試模型與分析上，首先設定加速規於頭模有限元素模型的重心上，再以下巴繫帶將頭模固定住；頭模與安全帽及安全帽與鋼鈔接觸方式是使用 FEMB 軟體中 CONTACT 之自動面對面接觸(Automatic_surface_to_surface)的接觸型式來定義接觸設定，再由軟體中 BOUNDARY 設定中的單點約束 (Single Point Constraint，簡稱 SPC)去拘束鋼鈔的六個自由度，使其固定不動。撞擊測試模擬是將放入頭模的安全帽模型依據標準的 5.42 m/s 及 4.57 m/s 速度分別撞擊平鈔及路邊石鈔模型，如圖

4.14 和 4.15 所示。電腦運算方面，採用 Intel Xeon 八核心 2.2G Hz 的 HP 套裝工作站搭配 LS-DYNA 970 4-CPU 版本進行數值計算。因撞擊過程很短暫，所以模擬計算時間設定為 20 毫秒，時間步數設定為 250 步，自行車安全帽撞擊平鈎及路邊石鈎所花費的 CPU 計算時間分別為 12 小時及 13 小時，時間步幅大小由 LS-DYNA 主程式自動決定來計算並記錄頭部加速度的反應，其模擬輸出的資料使用 SAE 所規範的 1000Hz 等級濾波器來進行濾波處理。

4.5 安全帽撞擊測試模擬結果

圖 4.16 為自行車安全帽撞擊平鈎模型之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是於 8.64 毫秒時達到最大值 189.72G，符合標準所規範的 250G 容許範圍內。圖 4.17 為自行車安全帽撞擊路邊石鈎模型之頭部速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是於 10.8 毫秒時達到最大值 121.36G，符合標準所規範的 250G 容許範圍內。

4.6 安全帽撞擊測試模型驗證

為驗證上節中建構之數值模型與模擬結果的可信度，數值模擬分析所獲得的加速度反應，將與安全帽撞擊測試的實驗值進行比

對，以確認撞擊測試數值模型的準確性。

4.6.1 撞擊測試步驟

撞擊測試與數值模擬皆使用相同市售捷安特之自行車安全帽。測試使用的自行車安全帽具15個透氣孔設計，透氣孔面積占安全帽表面積的30%。實驗使用的安全帽的重量約237公克，其內圓周為580mm；另根據BS EN960:2006自行車頭模標準選用鎂鋁合金製成的尺寸為[J]的頭模，以適用於本測試中的安全帽。

本測試於財團法人自行車暨健康科技工業研究發展中心進行安全帽能量吸收撞擊測試，自行車用安全帽撞擊吸收實驗機台主要包括機台結構與墜落釋放裝置兩個部分，如圖4.18所示；其中墜落釋放裝置由籃圈所組成，如圖4.19所示。撞擊實驗時將裝置頭模的安全帽固定在墜落釋放裝置的籃圈中，依據 EN 1078標準的撞擊速度，分別從1.50m及1.06m高度以自由落體方式落下撞擊機台底部的平砧及路邊石鉗，再由裝置在頭模內的三向加速規量測撞擊加速度。上述自由落體的高度計算係依據：

$$H = \frac{v^2}{2g} \quad (4.1)$$

其中:

H: 墜落釋放裝置的高度

V: EN 1078 標準規定之撞擊速度；5.42m/s(平鋤)及 4.57m/s(路邊石鋤)

根據 EN 1078:2006 自行車安全帽標準，安全帽進行撞擊測試後，頭模重心位置的加速規所測出的加速度不得超過標準規定的 250G。

本節為了確認安全帽對頭部保護的程度，同時也計算頭部損傷指標(Head Injury Criterion，簡稱 HIC)；依據人體損傷指標規範，由測試測得頭部損傷指標(HIC)值應小於或等於 1000，才符合頭部安全標準值。

撞擊測試的電腦輸出介面顯示一般常用的加速度參數及頭部損傷指標(HIC)值。在測試進行的同時，系統會開始將每秒的撞擊數據擷取紀錄下來並輸出到電腦裡。電腦輸出介面會顯示每一個觀測點 X,Y,Z 的向量加速度及每一個觀測點的速度值。再由式(4.2)得到的總頭部合成加速度 G 值去評估安全帽是否符合 EN 1078 自行車安全帽標準。

$$a(t) = \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t) + a_z^2(t)} \quad (4.2)$$

其中

$a(t)$: 頭部合成加速度

$a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$: X,Y,Z 軸的加速度

此外，頭部重心位置加速度曲線可由式(4.3)算出得到頭部損傷指標(HIC)值，以評估頭部是否符合頭部損傷指標(HIC)低於 1000 的規範。

$$HIC = Max \left[\frac{1}{t_2-t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \quad (4.3)$$

其中

HIC: 頭部損傷指標值

$a(t)$: 頭部合成加速度

t_2 , t_1 : 時間間距

4.6.2 撞擊測試結果

圖 20 為自行車安全帽以 5.42 m/s 速度撞擊平鉗之頭模重心位置加速度歷時圖，由圖得知頭模重心加速度峰值為 183G，符合低於 250G 標準的規定。再以頭模重心位置加速度曲線藉由式(4.3)可計算出頭部損傷指標值(HIC)為 825，並未超過頭部損傷指標所規範

的 1000。另外，圖 4.21 為自行車安全帽以標準規範的 4.57 m/s 速度撞擊到路邊石鈔之頭模重心位置加速度歷時圖，由圖得知加速度峰值為 115G，符合低於 250G 標準的規定。再以頭模重心位置加速度曲線藉由式(4.3)可計算出頭部損傷指標值(HIC)為 432，且未超過頭部損傷指標所規範的 1000。

本節根據 EN 1078:2006 自行車安全帽標準分別對平鈔及路邊石鈔進行安全帽能量吸收撞擊測試，所得到的頭部加速度峰值分別為 183G 及 115G，皆符合標準中的規範，且經由計算得到的頭部損傷指標值分別為 825 及 432，也都符合頭部損傷指標的安全範圍內，由此測試結果顯示本節中使用的自行車安全帽符合標準規範的要求。

4.6.3 安全帽撞擊測試數值模擬驗證

為了評估所建構 EN 1078 自行車安全帽撞擊測試模型的適用性，本節將以安全帽撞擊測試數據與上節數值結果進行比較。首先在自行車安全帽撞擊平鈔的結果比較部分，圖 4.22 為以實驗及模擬方法分析安全帽撞擊平鈔撞擊的頭部加速度歷時比較圖，由圖可知，模擬分析結果在 8.64 毫秒時，頭部加速度峰值為 189.72G，且加速度曲線所算出頭部損傷指標峰值(HIC)為 891。而安全帽平鈔測試的頭部加速度峰值為 183G，頭部損傷指標為 828，兩者加速度反應曲線在最大峰值發生時間與大小非常接近，兩者的誤差為 3.67%，另頭部損傷指標峰值(HIC)來比較，兩者的誤差為 8%。二種方法分析結果的比較如表 4.2 所示。

另外，在自行車安全帽撞擊路邊石鈎的結果比較部分，圖 4.23 為以實驗及模擬方法分析安全帽撞擊路邊石鈎撞擊的頭部加速度歷時比較圖，由圖可知，模擬分析結果在 10.8 毫秒時，頭部加速度峰值為 121.36G，且加速度曲線所算出頭部損傷指標峰值(HIC)為 474。而安全帽撞擊路邊石鈎測試的頭部加速度峰值為 115G，頭部損傷指標為 432，兩者加速度反應曲線在最大峰值發生時間與大小非常接近，兩者的誤差為 5.53%，另頭部損傷指標峰值(HIC)來比較，兩者的誤差為 9.72%，二種方法分析結果的比較如表 4.3 所示。由上述兩種測試比較結果顯示，本章節所建構的安全帽撞擊測試有限元素模型的建構及撞擊條件的設定具正確性。



a. 自行車安全帽(外)



b. 自行車安全帽(內)

圖 4.1 捷安特(GIANT) 自行車安全帽[44]

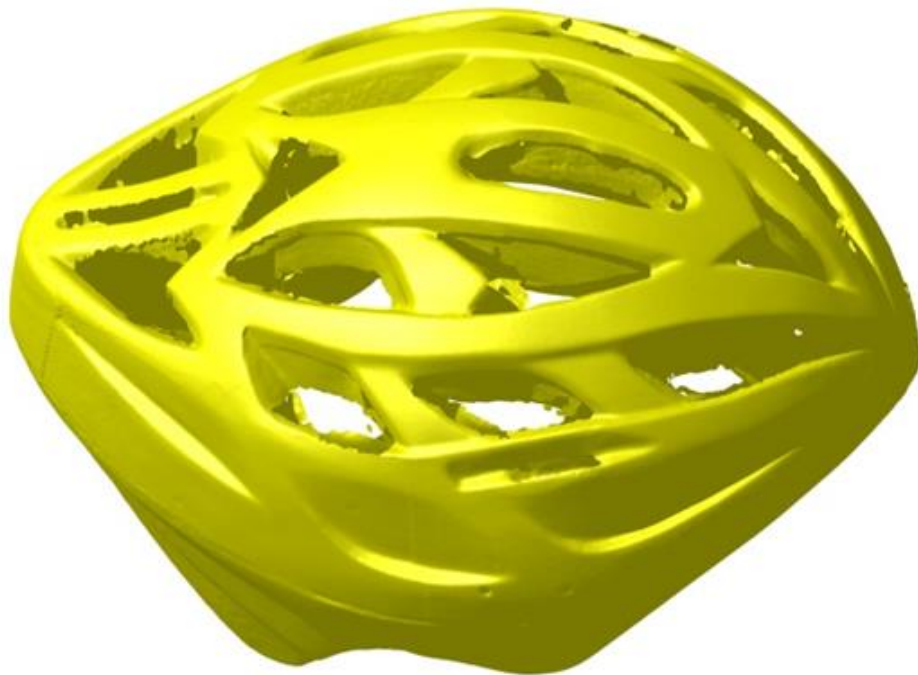


圖 4.2 安全帽 3D 掃描數位模型

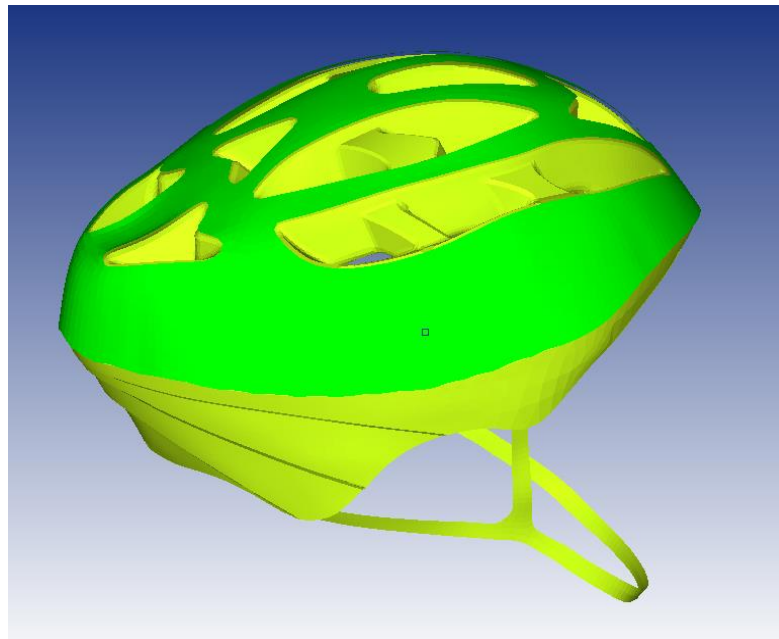


圖 4.3 安全帽幾何圖形

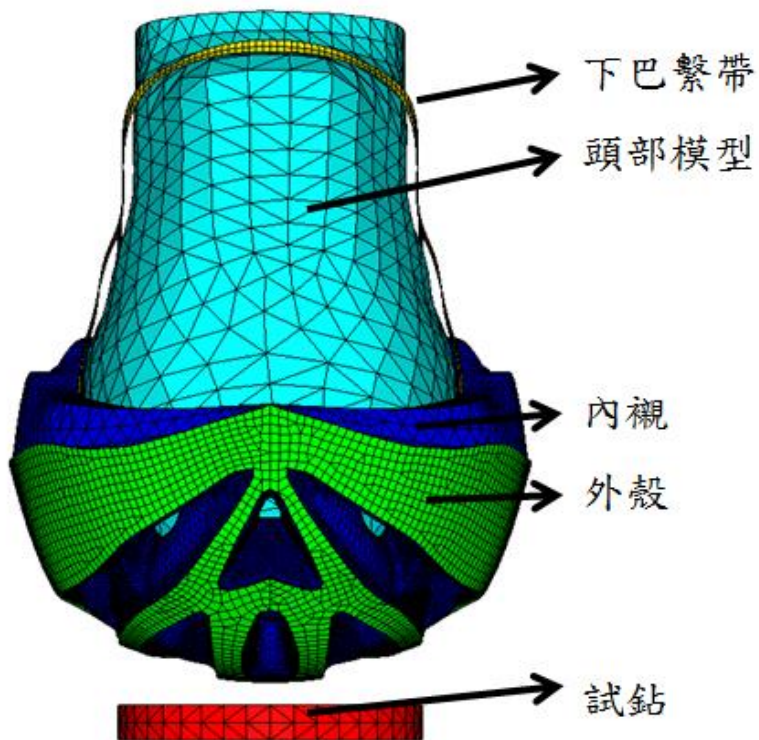


圖 4.4 安全帽有限元素模型

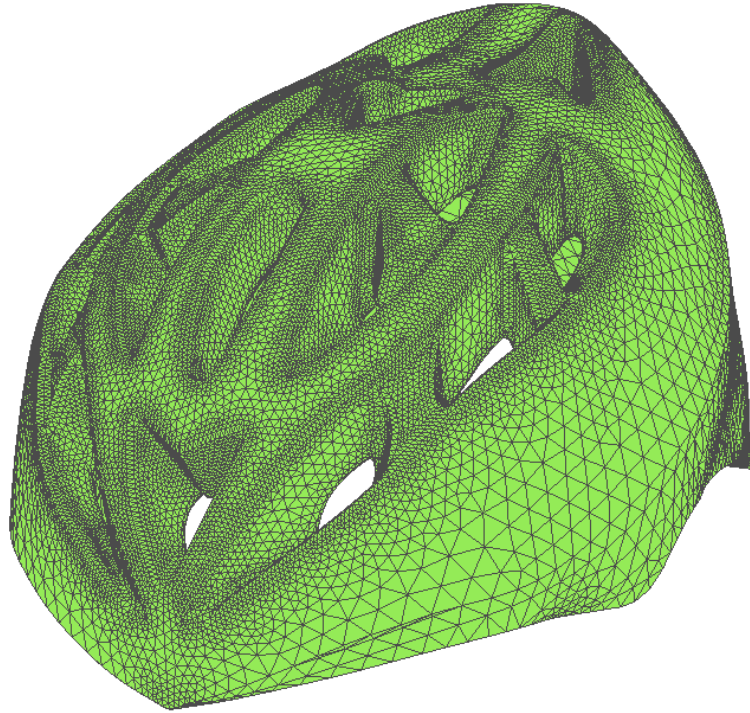


圖 4.5 安全帽內襯有限元素模型

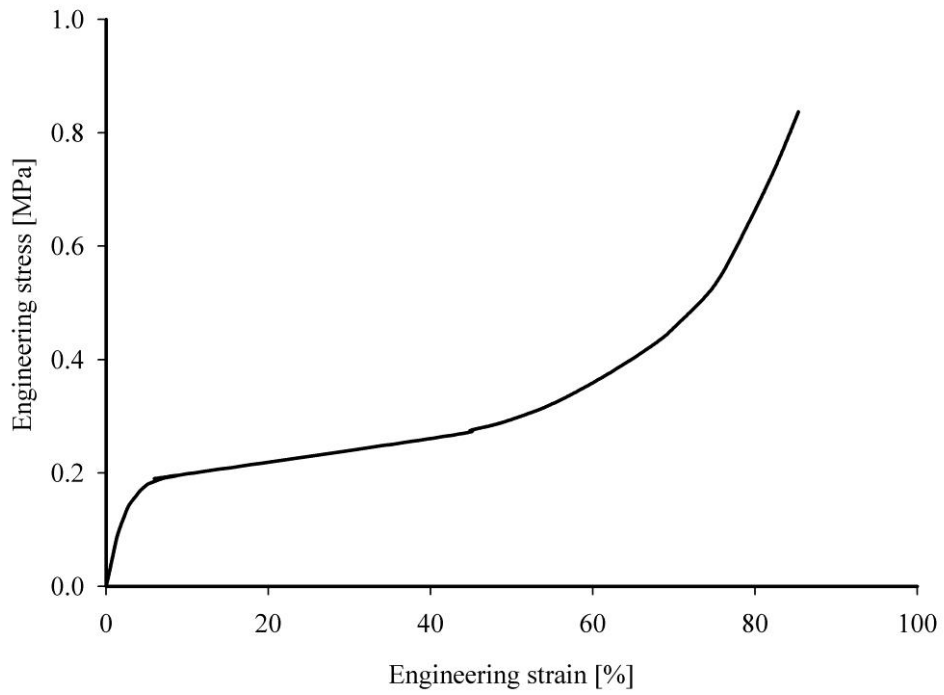


圖 4.6 發泡聚苯乙烯(EPS)應力應變曲線[18]

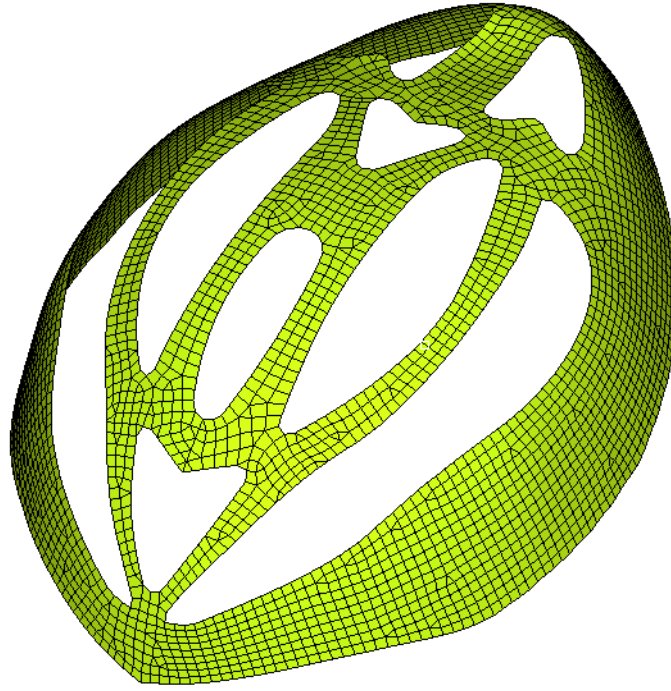


圖 4.7 安全帽外殼有限元素模型

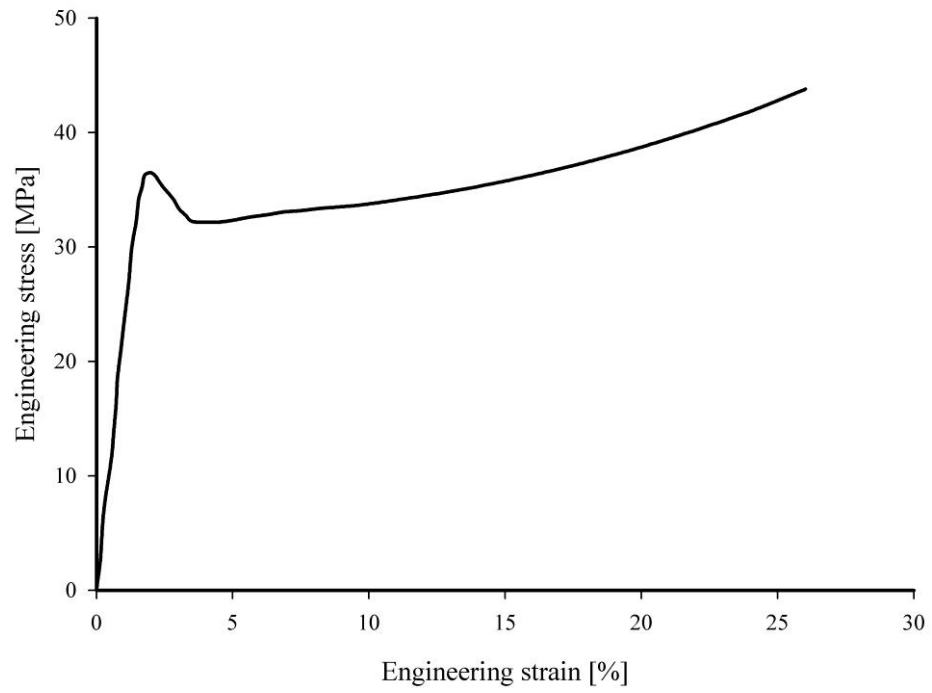


圖 4.8 聚氯乙稀(PVC)應力應變曲線[42]

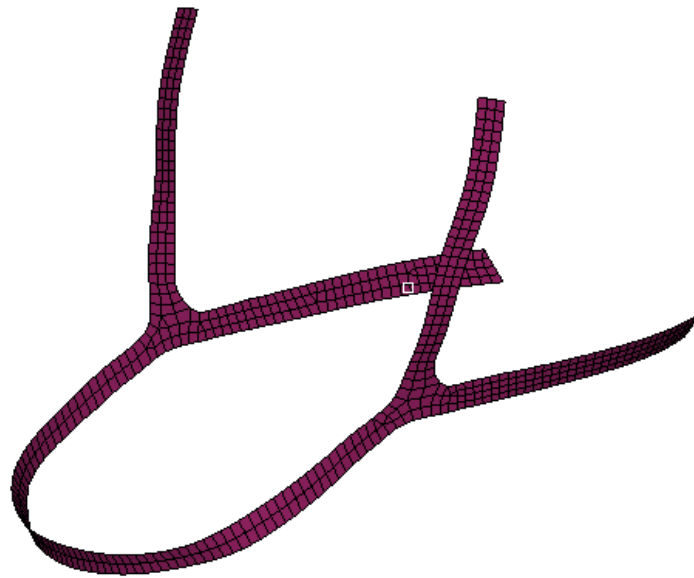


圖 4.9 下巴繫帶有限元素模型

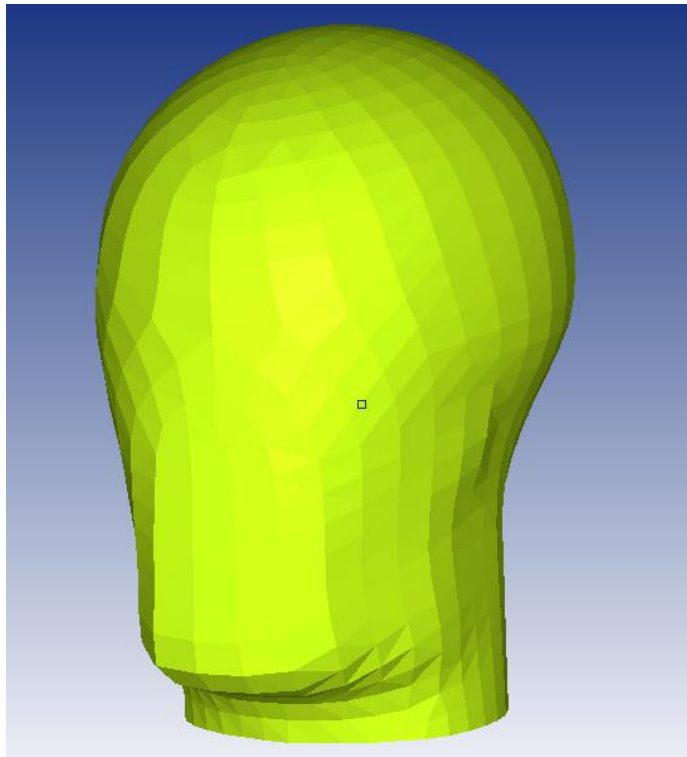


圖 4.10 頭模幾何封閉圖形

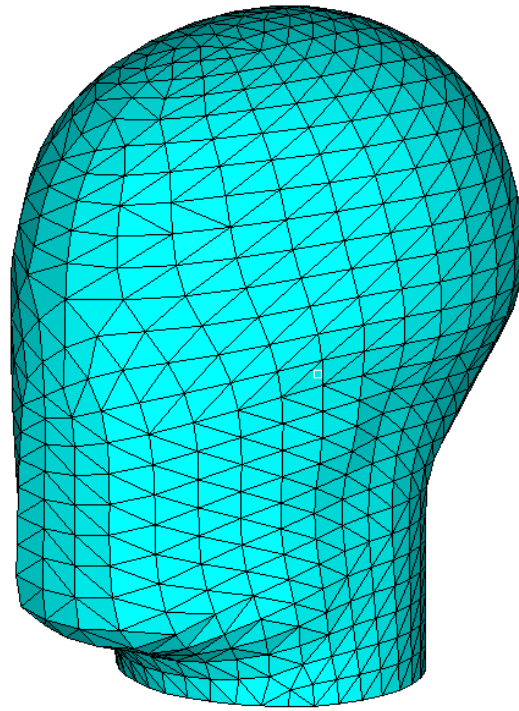


圖 4.11 頭模有限元素模型

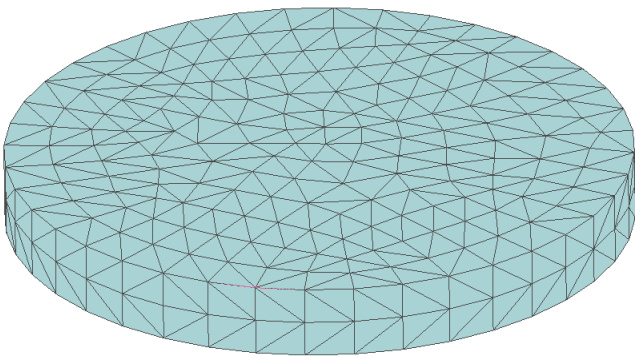


圖 4.12 平鑽有限元素模型

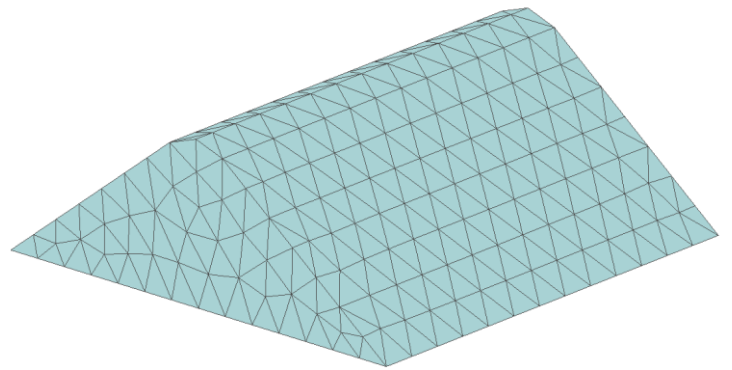


圖 4.13 路邊石鑽有限元素模型

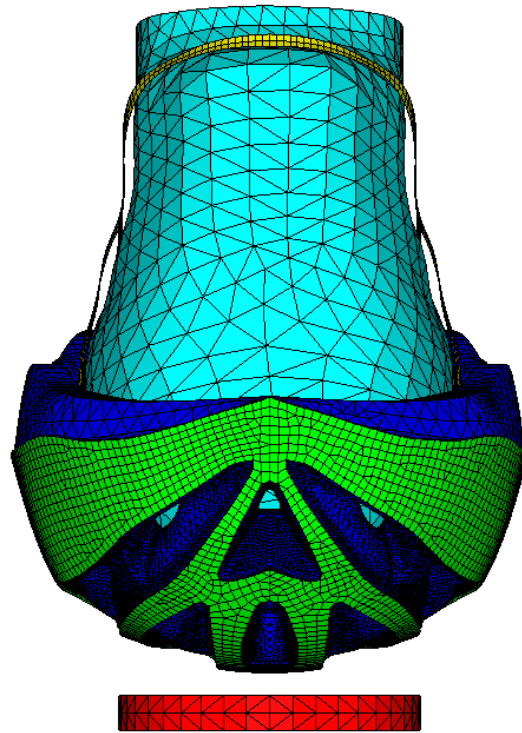


圖 4.14 安全帽撞擊平鉗有限元素模型

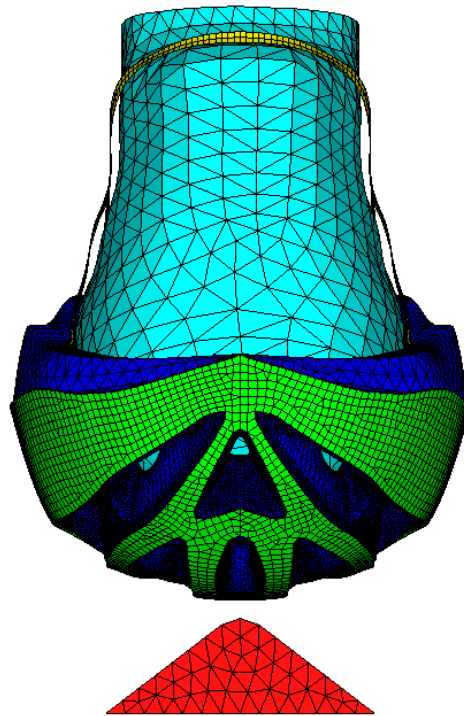


圖 4.15 安全帽撞擊路邊石鉗有限元素模型

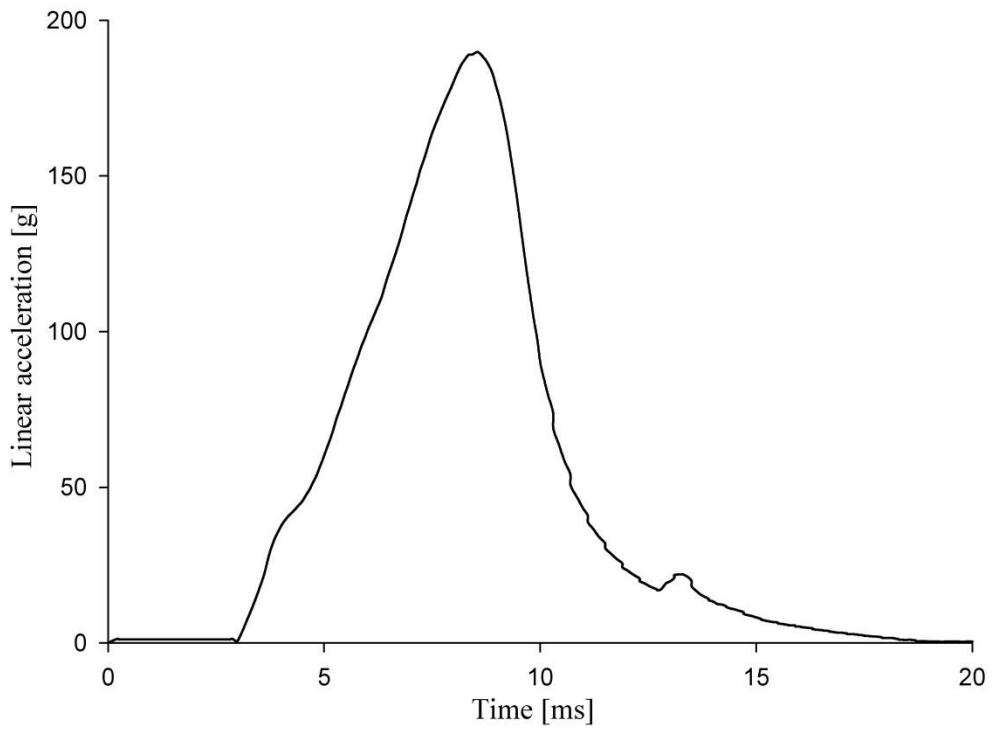


圖 4.16 安全帽撞擊平鑽模擬之頭部加速度歷時圖

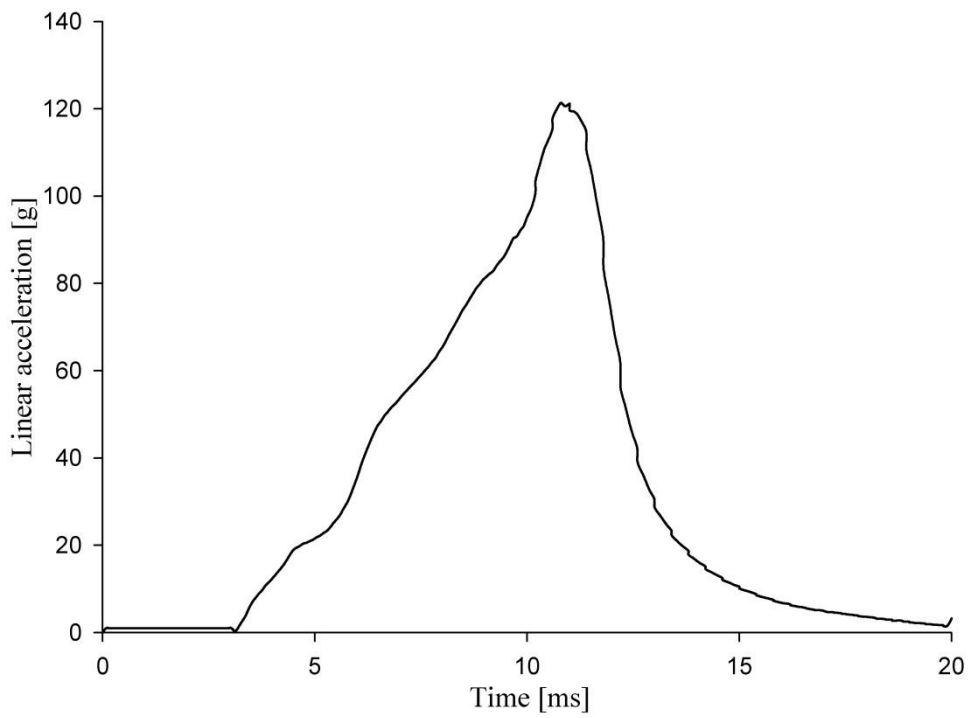


圖 4.17 安全帽撞擊路邊石鑽模擬之頭部加速度歷時圖



圖 4.18 自行車安全帽撞擊實驗機台



圖 4.19 自行車安全帽墜落釋放裝置

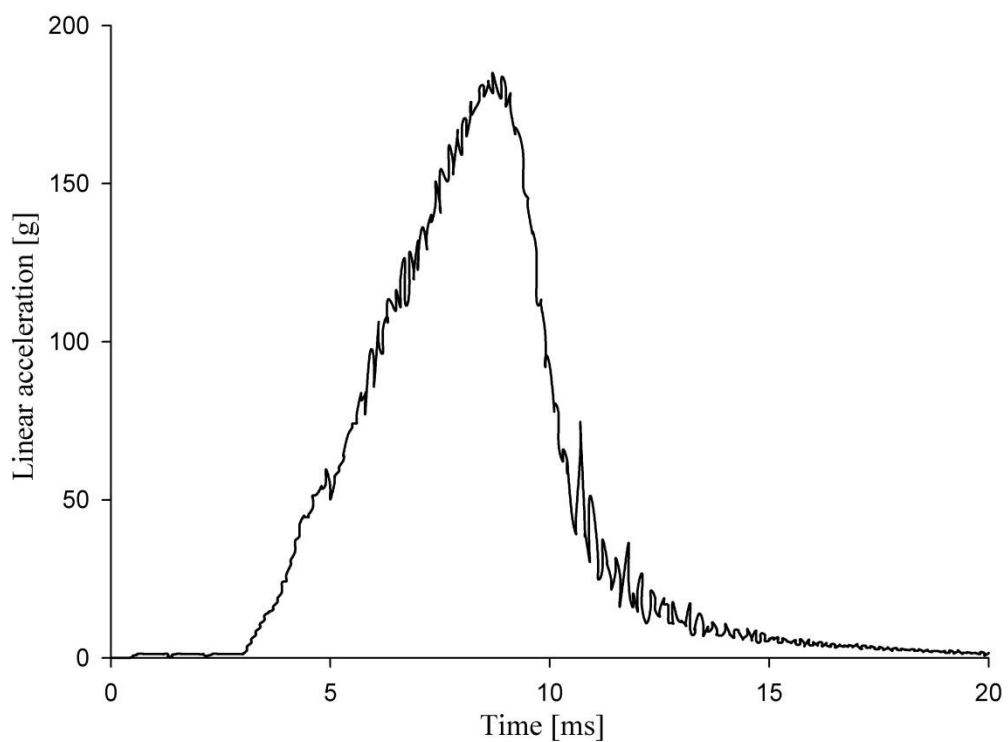


圖 4.20 安全帽撞擊平鑽測試之頭部加速度歷時圖

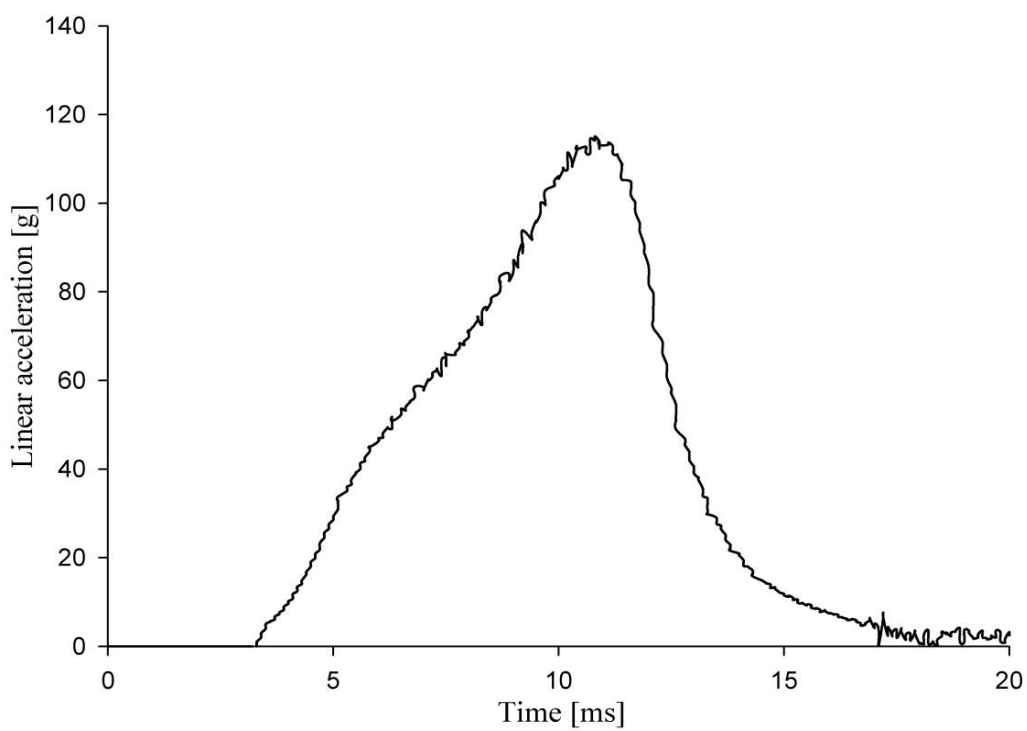


圖 4.21 安全帽撞擊路邊石鑽測試之頭部加速度歷時圖

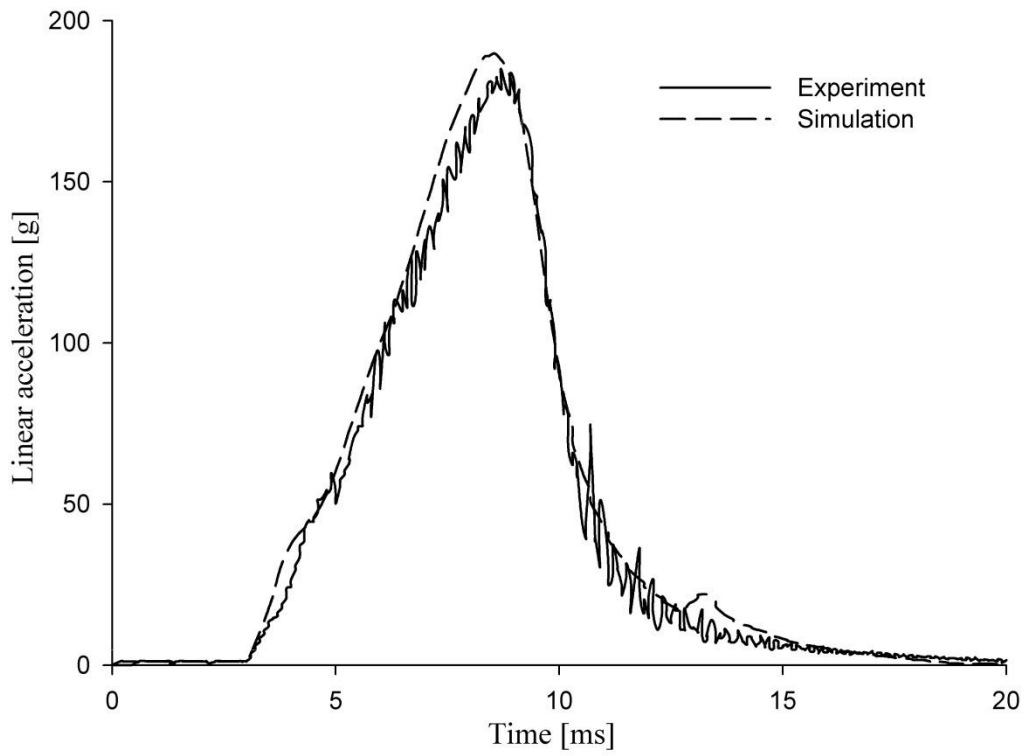


圖 4.22 安全帽撞擊平鉛測試與模擬之加速度歷時比較圖

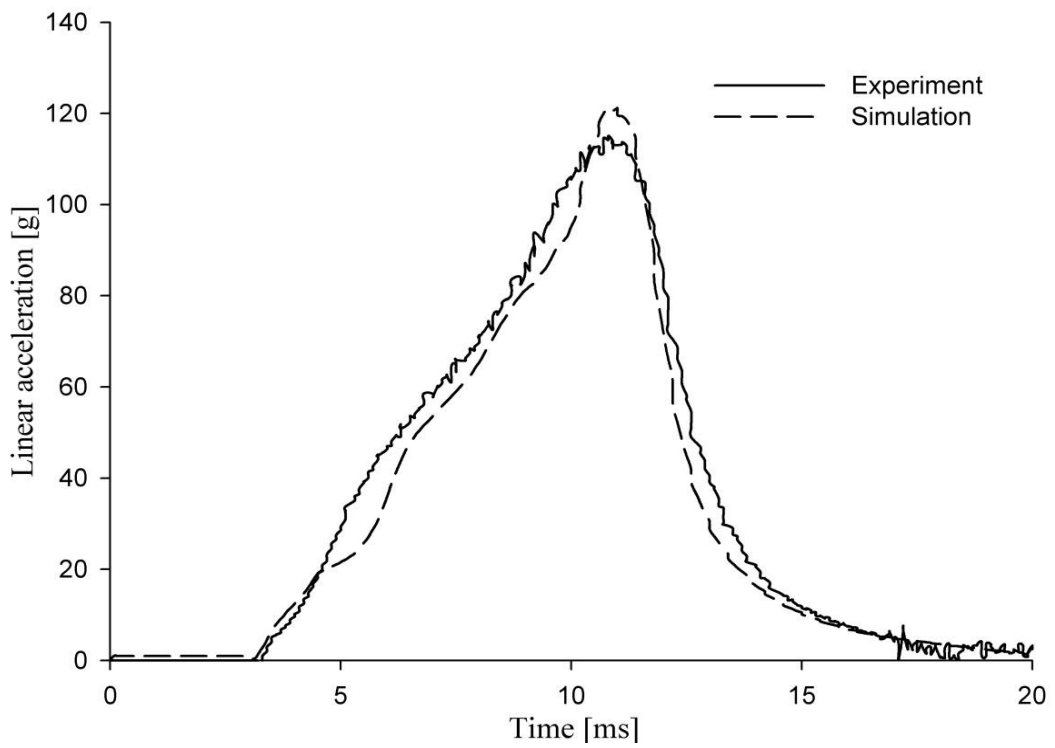


圖 4.23 安全帽撞擊路邊石鉛測試與模擬之速度歷時比較圖

表 4.1 安全帽撞擊測試有限元素模型各部件詳細資料

部位	節點數量	元素數量	元素型式
內襯	45,843	60,874	Solid
外殼	3,653	3,342	Shell
下巴繫帶	836	618	Shell
頭部模型	3,564	15,620	Solid
平鉗	491	860	Solid
路邊石鉗	640	958	Solid

表 4.2 安全帽撞擊測試模型之材料特性

材料類型	質量密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	泊松比 ν	楊氏係數 E (MPa)
鎂鋁合金	1,850	0.33	70,000
發泡聚苯乙烯 (EPS)	25	-	2.7
塑膠(PVC)	1,200	0.37	2,400
尼龍(PET)	1,400	0.44	1,000
鋼(steel)	7,800	0.3	210,000

表 4.3 安全帽撞擊平鈎測試與模擬值之頭部加速度與損傷指標值比較

	實驗值	模擬值	誤差(%)
加速度 峰值 (G)	183	189.72	3.67%
頭部損傷 指標值 (HIC)	825	891	8%

表 4.4 安全帽撞擊路邊石鈎測試與模擬值之頭部加速度與損傷指標值比較

	實驗值	模擬值	誤差(%)
加速度 峰值 (G)	115	121.36	5.53%
頭部損傷 指標值 (HIC)	432	474	9.72%

第五章 CPSC 及 SNELL B95 自行車安全帽 撞擊測試有限元素模型

目前台灣產業界與學術研究上大多依據歐盟 EN 1078:2006 自行車安全帽標準進行相關測試及研究，且台灣自行車安全帽的標準亦依據 EN 1078 自行車安全帽標準為基準來訂定。國內較少針對其它國家之自行車安全帽標準進行相關研究，故本章節將針對兩個自行車較盛行國家的自行車標準：美國 CPSC:16 CFR Part 1203 及澳大利亞 SNELL B95 自行車安全帽標準進行探討與研究。在這兩個自行車安全帽標準中，與 EN1078:2006 標準相同皆使用撞擊測試的頭部模型進行自行車安全帽撞擊安全性的評估，且以頭部模型重心位置加速度值為評價安全帽安全性的依據之一，不同的是這兩種標準係使用半頭模來做安全帽撞擊測試評估。本章節將針對 CPSC:16 CFR Part 1203 和 SNELL B95 安全帽撞擊測試標準所規範頭部模型與鋼鉛模型的建構及安全帽衝擊測試有限元素模型與撞擊測試模擬進行說明。

5.1 CPSC 標準安全帽撞擊測試數值模型

5.1.1 安全帽有限元素模型

本節之安全帽有限元素模型與第四章節相同，係依據市售之捷安特 (GIANT) 自行車安全帽所建構，商品編號為 CGAF13-A603222793。首先將建立好的模型導入到 Hypermesh 有

限元素前處理軟體進行網格劃分後，再匯入到 LS-DYNA 有限元素軟體進行各部件的接合、參數設定及分析等前、後處理之設定，安全帽模型之建構與設定說明如章節 4.1 內容。

5.1.2 半頭模有限元素模型

建構頭部模型係依據美國自行車安全帽標準 CPSC:16 CFR Part 1203 所建議的 ISO/DIS 6220-1983 中選擇一個充分適合此安全帽的半頭模尺寸，圓周為 575 mm 及標號為(J)的半頭模。首先以 Catia 3D 繪圖軟體按照標準規範繪製出一個 3D 幾何封閉圖形，如圖 5.1 所示。將建立好的模型導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分後，再匯入到 LS-DYNA 有限元素分析套裝軟體進行參數設定。本節建構尺寸(J)的半頭部模型是由 2,112 個節點，9,021 個固體元素所組成的，如圖 5.2 所示，其部件之節點數、元素數、元素型式等如表 5.1 所示。半頭模的材料使用標準規定具有質堅量輕、密度低、抗壓性較強的鎂鋁合金(aluminium magnesium alloy)，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT20 _RIGID，其材料參數如表 5.2 所示。

5.1.3 鋼鈷有限元素模型

本節係根據 CPSC:16 CFR Part 1203 安全帽標準建構鋼鈷模型，首先由 Catia 3D 繪圖軟體分別繪製，再將三個鋼鈷幾何圖形導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分後，最後匯入到

LS-DYNA 有限元素軟體進行參數設定。

1.平鈎(Flat anvil)

平鈎模型是由 227 個節點，679 個固體元素所組成的，如圖 5.3 所示，其部件之節點數、元素數、元素型式等如表 5.1 所示。平鈎的材料為鋼材，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用*MAT20_RIGID，其材料參數如表 5.2 所示。

2.路邊石鈎(Curbstone)

路邊石鈎模型是由 466 個節點，1,476 個固體元素所組成的，如圖 5.4 所示，其部件之節點數、元素數、元素型式等如表 5.1 所示。路邊石鈎的材料為鋼材，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用*MAT20_RIGID，其材料參數如表 5.2 所示。

3.圓鈎(Hemi)

圓鈎模型是由 148 個節點，437 個固體元素所組成的，如圖 5.5 所示，其部件之節點數、元素數、元素型式等如表 5.1 所示。圓鈎的材料為的鋼材，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用*MAT20_RIGID，其材料參數如表 5.2 所示。

5.1.4 安全帽撞擊測試模型

本節根據美國 CPSC:16 CFR Part 1203 標準來建構安全帽之平鈎、路邊石鈎和圓鈎撞擊試測數值模型。在建構安全帽撞擊測試模

型與分析上，首先設定加速規置於半頭模有限元素模型的重心上；頭模與安全帽及安全帽與鋼鉗接觸方式係依據 FEMB 軟體中 COTACT 之自動面對面接觸(Automatic_surface_to_surface)的接觸形式來定義接觸設定，再由軟體中 BOUNDARY 設定中的 SPC 來拘束鋼鉗的六個自由度，使其固定不動；另拘束放置頭部模型的安全帽四個自由度，使其只可在 Z 方向作移動。撞擊測試數值模型是將放入頭模的安全帽模型分別以 6.2m/s 的速度衝擊平鉗模型及以 4.8m/s 的速度衝擊路邊石鉗與圓鉗模型，如圖 5.6~圖 5.8 所示。電腦運算方面，採用 Intel Xeon 八核心 2.2G Hz 的 HP 套裝工作站搭配 LS-DYNA 970 4-CPU 版本進行數值計算。因衝擊過程很短暫，所以模擬計算時間設定為 20 毫秒，時間步數設定為 250 步，自行車安全帽衝擊平鉗、路邊石鉗和圓鉗所花費的 CPU 計算時間分別為 8 小時、9 小時和 8.5 小時，時間步幅大小由 LS-DYNA 主程式自動決定來計算並記錄頭部加速度的反應，其模擬輸出的資料使用 SAE 所規範 1000Hz 等級濾波器來進行濾波處理。

5.2 CPSC 標準安全帽撞擊測試模擬結果

圖 5.9 為安全帽撞擊平鉗模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知，在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是在 8.52 毫秒時達到最大值 273.66G，符合標準所規範 300G 的範圍內。圖 5.10 為安全帽撞擊路邊石鉗模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知，在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是在 8.1 毫

秒時達到最大值 174.71G，符合標準所規範 300G 的範圍內。圖 5.11 為安全帽撞擊圓鉛之頭部加速度歷時圖，由圖可知，在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是在 8.2 毫秒時達到最大值 147.76G，符合標準所規範的 300G 的範圍內。三種鋼鉛撞擊模擬結果如表 5.3，由表可得知該安全帽亦通過 CPSC 標準的規範。

5.3 SNELL B95 標準安全帽撞擊測試數值模型

5.3.1 安全帽有限元素模型

本節之安全帽有限元素模型與第四章節相同，係依據市售之捷安特 (GIANT) 自行車安全帽所建構，商品編號為 CGAF13-A603222793，將建立好的模型導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分後，再匯入到 LS-DYNA 有限元素軟體進行各部件的接合、參數設定及分析等前、後處理之設定，安全帽模型之建構與設定說明如章節 4.1 內容。

5.3.2 半頭模有限元素模型

建構頭部模型係依據澳大利亞自行車安全帽標準 SNELL B95 所建議的 ISO/DIS 6220-1983 中選擇一個充分適合此安全帽的半頭模尺寸，圓周為 575 mm 及標號為(J)的半頭模，將建立好的模型導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分後，再匯入到

LS-DYNA 有限元素分析套裝軟體進行參數設定，頭模模型資料建構如章節 5.1.2。

5.3.3 鋼鉗有限元素模型

本節係根據 SNELL B95 安全帽標準建構鋼鉗模型，首先由 Catia 3D 繪圖軟體分別繪製，再將三個鋼鉗幾何圖形導入到 Hypermesh 有限元素前處理軟體進行網格劃分後，最後匯入到 LS-DYNA 有限元素軟體進行參數設定。

1. 平鉗(Flat anvil)

SNELL B95 標準所使用平鉗的直徑尺寸與 CPSC:16 CFR Part 1203 標準略有不同；平鉗是由 227 個節點，679 個固體元素所組成的，如圖 5.12 所示，其部件之節點數、元素數、元素型式等如表 5.1 所示。平鉗的材料為鋼材，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT20_RIGID，其材料參數如表 5.2 所示。

2. 路邊石鉗(Curbstone)

SNELL B95 標準所使用路邊石鉗的尺寸與 CPSC:16 CFR Part 1203 標準是相同的，所以在有限元素模型建構是採用章節 5.1.3 相同的路邊石鉗模型，詳細資料如章節 5.1.3。

3. 圓鉗(Hemi)

SNELL B95 標準所使用圓鉗的尺寸與 CPSC:16 CFR Part

1203 標準是相同的，所以在有限元素模型建構是採用章節 5.1.3 相同的圓鉛模型，詳細資料如章節 5.1.3。

5.3.4 安全帽撞擊測試模型

本節根據澳大利亞 SNELL B95 標準來建構安全帽之平鉛、路邊石鉛和圓鉛撞擊測試數值模型。在建構安全帽撞擊測試模型與模擬上，首先設定加速規置於半頭模有限元素模型的重心上；頭模與安全帽及安全帽與鋼鉛的接觸方式係依據 FEMB 軟體中 CONTACT 之自動面對面接觸(Automatic_surface_to_surface)的接觸形式來定義接觸設定，再由軟體中 BOUNDARY 設定中的 SPC 來拘束鋼鉛的六個自由度，使其固定不動，另拘束放置頭部模型的安全帽四個自由度，使其只可在 Z 方向作移動。撞擊測試模擬是將放入頭模的安全帽模型分別以 6.63m/s 的速度衝擊平鉛模型及 5.37m/s 的速度衝擊路邊石鉛及圓鉛模型，如圖 5.13~圖 5.15 所示。電腦運算方面，採用 Intel Xeon 八核心 2.2G Hz 的 HP 套裝工作站搭配 LS-DYNA 970 4-CPU 版本進行數值計算。因衝擊過程很短暫，所以模擬計算時間設定為 20 毫秒，時間步數設定為 250 步，自行車安全帽衝擊平鉛、路邊石鉛和圓鉛的分析所花費的 CPU 計算時間分別為 8 小時、9 小時和 8.5 小時，時間步幅大小由 LS-DYNA 主程式自動決定來計算並記錄頭部加速度的反應，其模擬輸出的資料使用 SAE 所規範 1000Hz 等級濾波器來進行濾波處理。

5.4 SNELL B95 標準安全帽撞擊測試模擬結果

圖 5.16 為安全帽撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知，在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是在 8.64 毫秒時達到最大值 299.23G，符合標準所規範的 300G 的範圍內。圖 5.17 為安全帽撞擊路邊石鉛之頭部加速度歷時圖，由圖可知，在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是在 10.8 毫秒時達到最大值 210.85G，符合標準所規範的 300G 的範圍內。圖 5.18 為安全帽撞擊圓鉛之頭部加速度歷時圖，由圖可知，在 0 到 20 毫的計算範圍內，頭部模型的加速度反應是在 10.8 毫秒時達到最大值 173.57G，符合標準所規範的 300G 的範圍內。三種鋼鉛撞擊模擬結果如表 5.3，由表可得知該安全帽亦通過 SNELL B95 標準的規範。

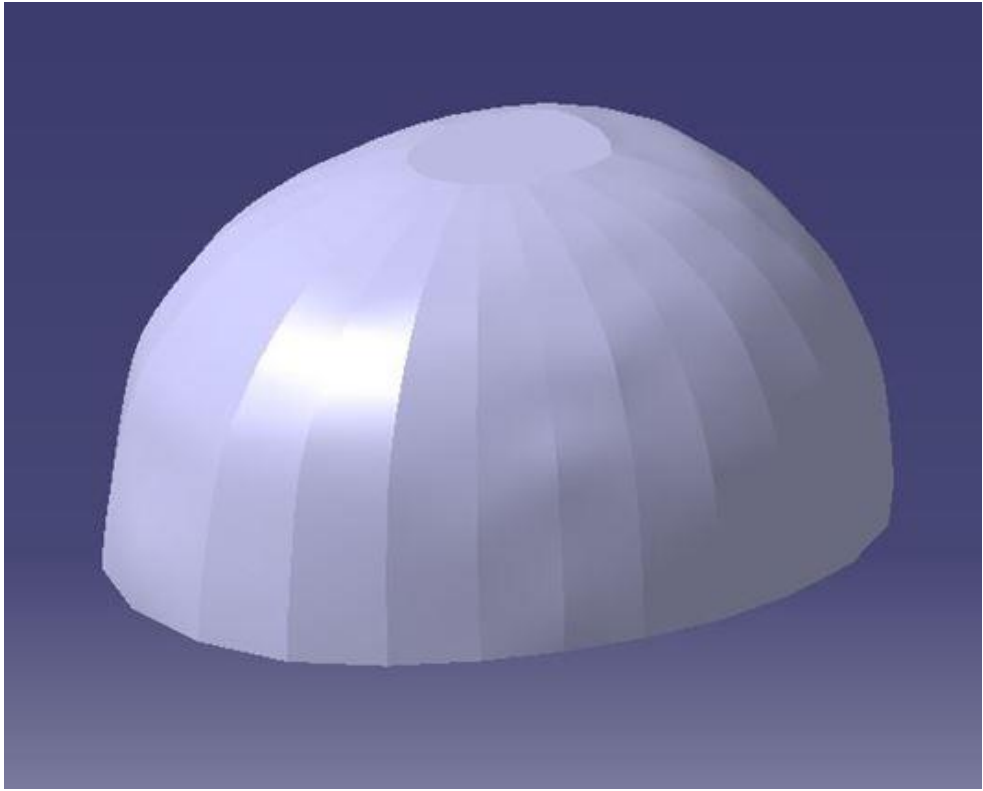


圖 5.1 半頭模幾何封閉圖形

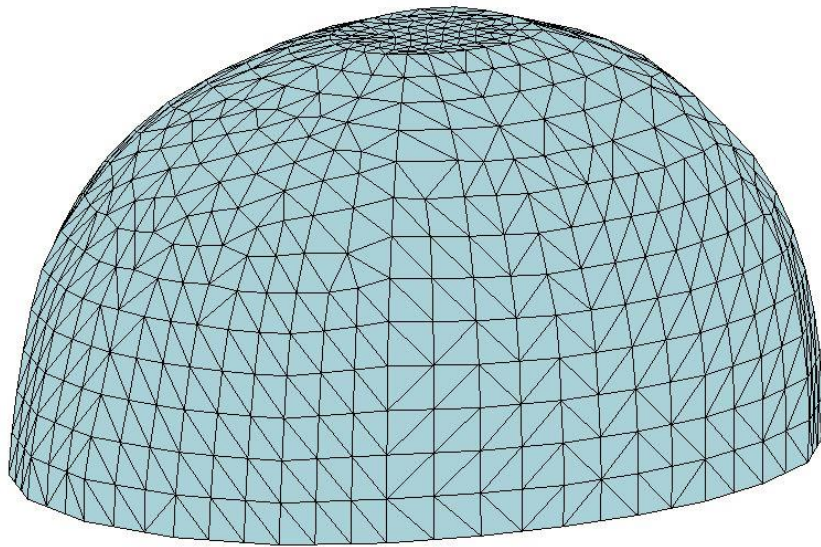


圖 5.2 半頭模有限元素模型

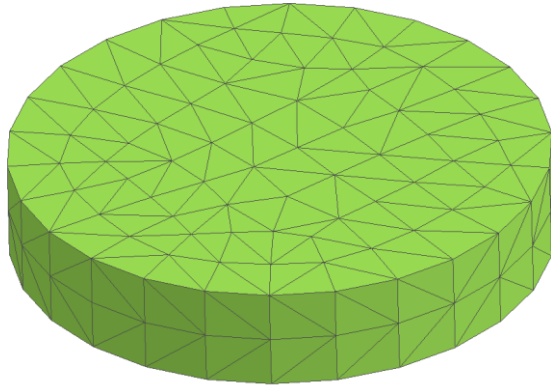


圖 5.3 CPSC 標準平鑽有限元素模型

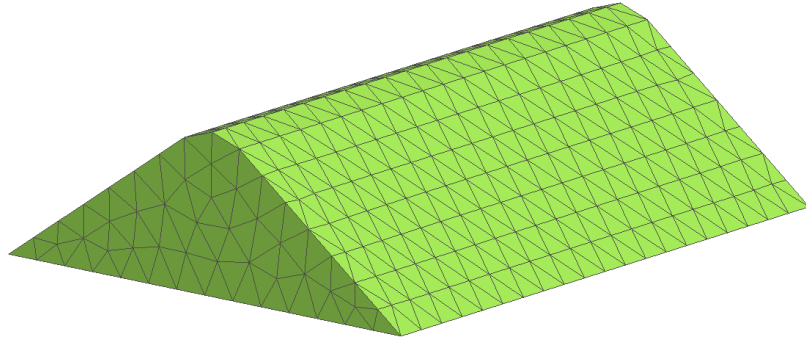


圖 5.4 CPSC 及 SNELL 標準路邊石鑽有限元素模型

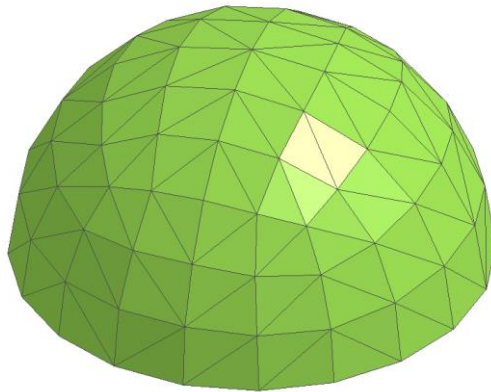


圖 5.5 CPSC 及 SNELL 標準圓鑽有限元素模型

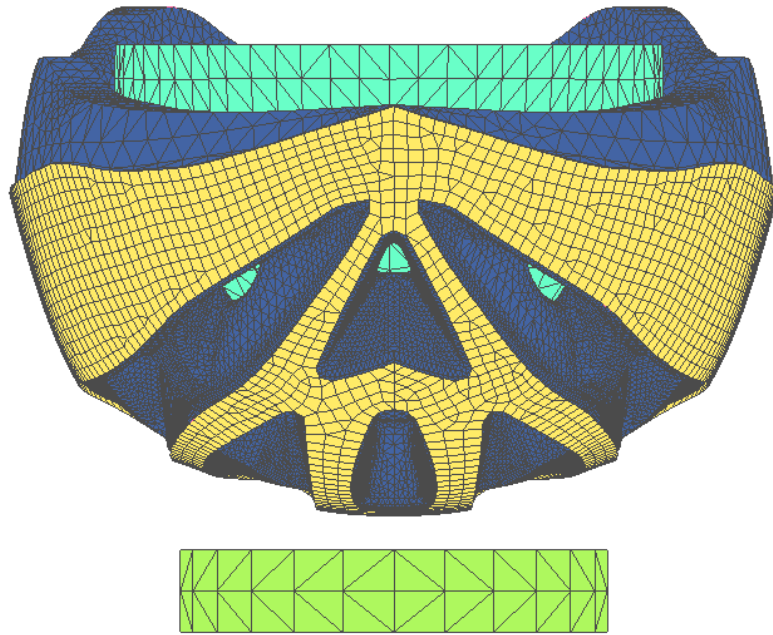


圖 5.6 CPSC 標準安全帽撞擊平鋁有限元素模型

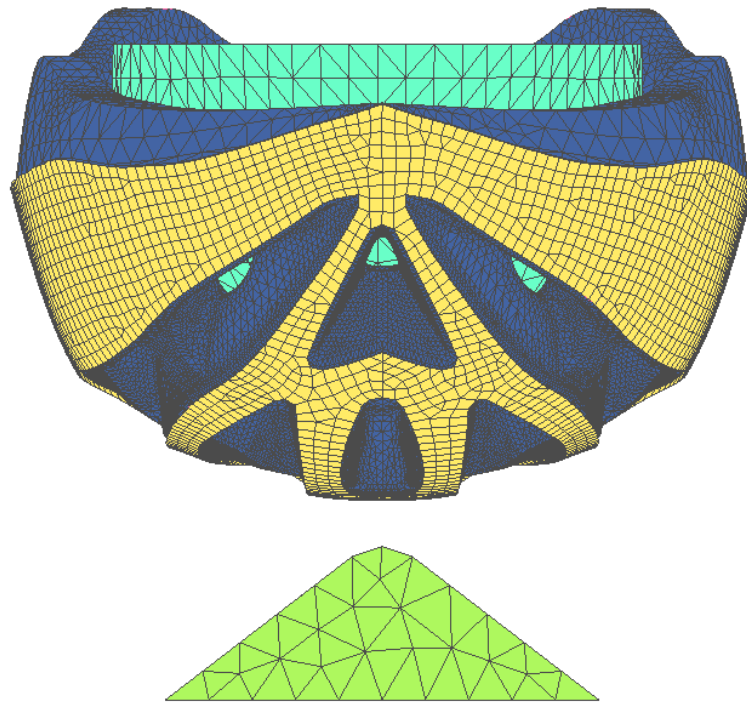


圖 5.7 CPSC 標準安全帽撞擊路邊石鋁有限元素模型

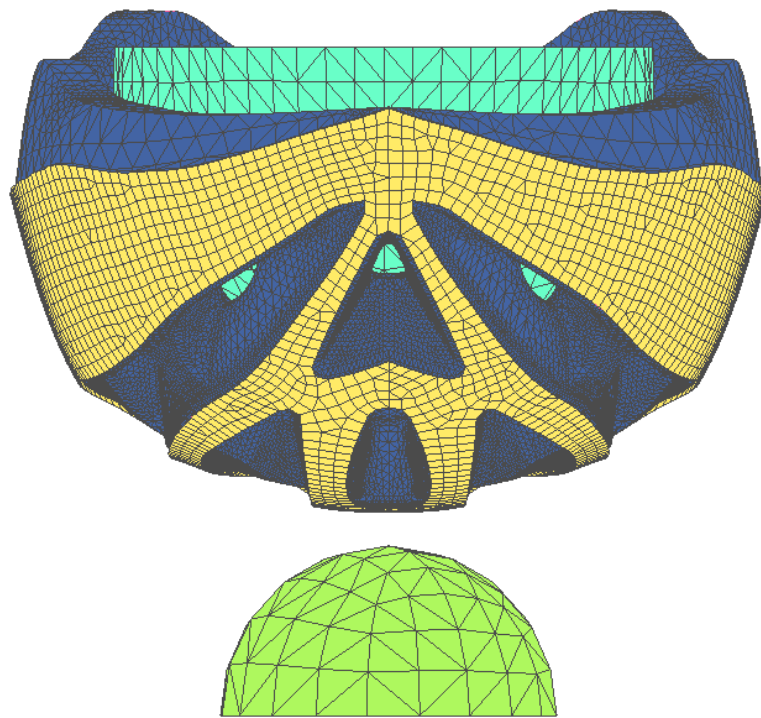


圖 5.8 CPSC 標準安全帽撞擊路邊石鉛有限元素模型

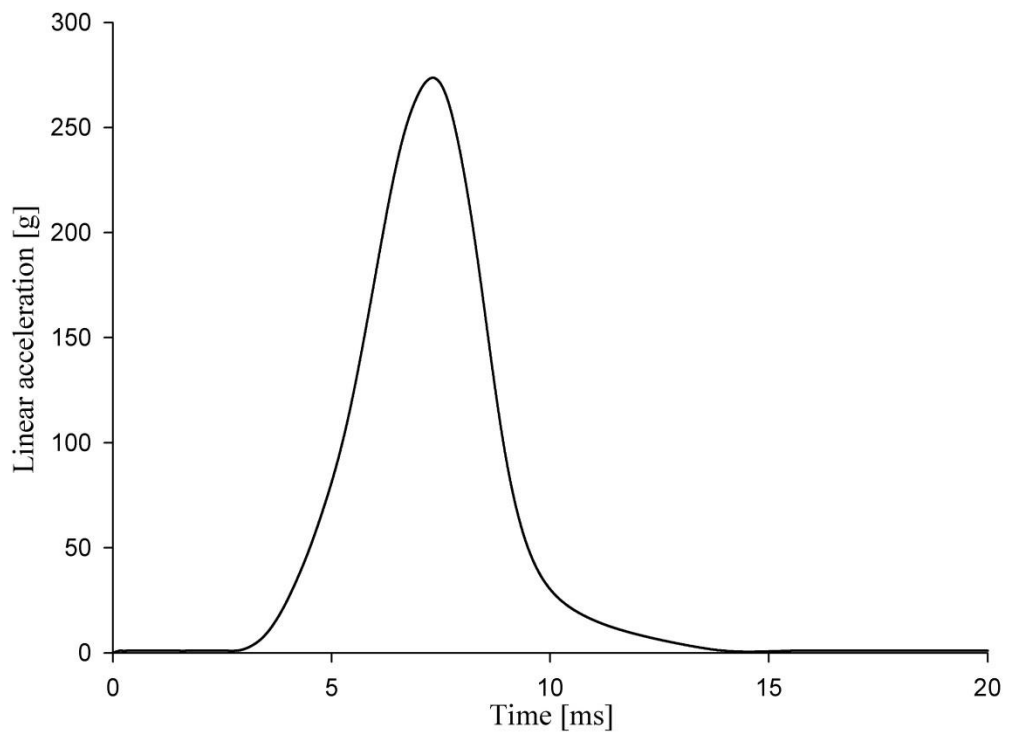


圖 5.9 CPSC 安全帽撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖

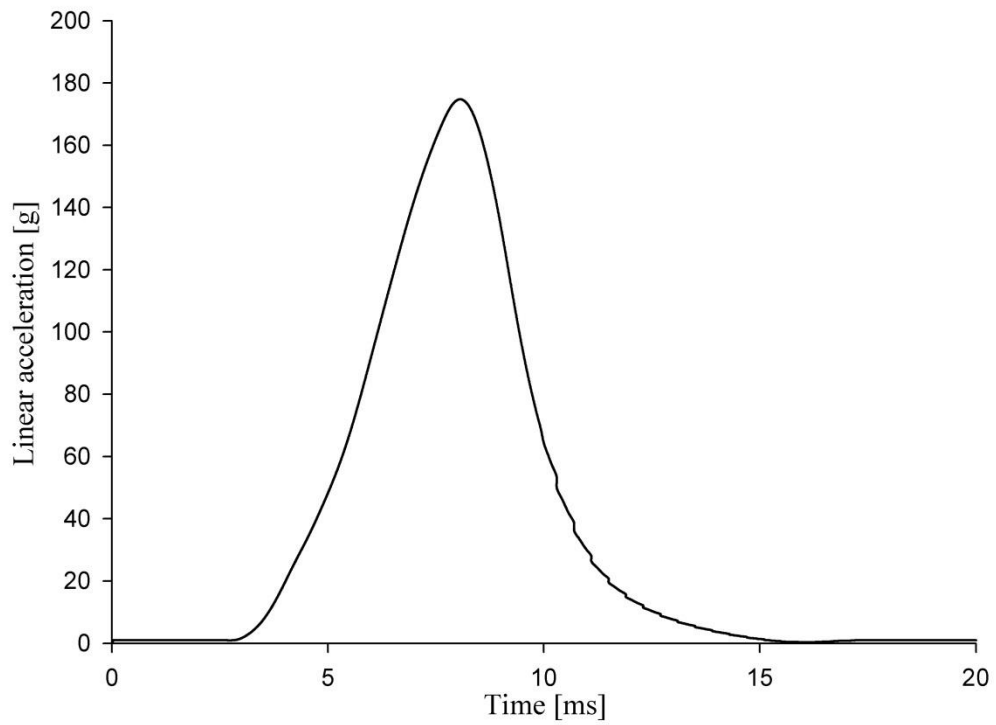


圖 5.10 CPSC 安全帽撞擊路邊石鉆模擬之頭部加速度歷時圖

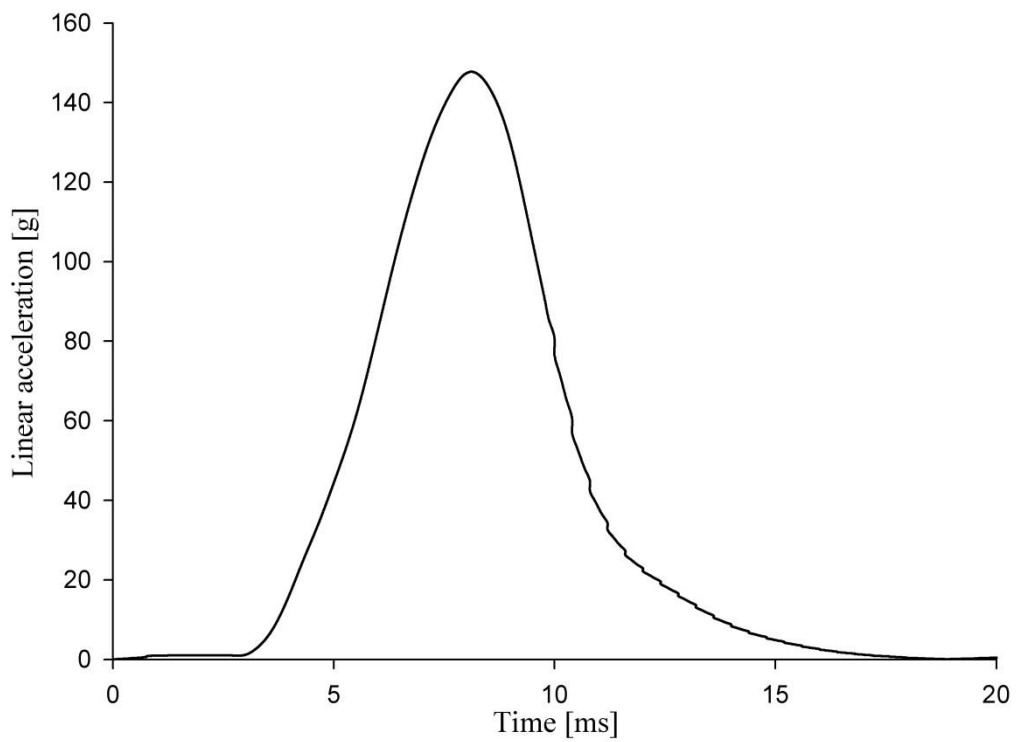


圖 5.11 CPSC 安全帽撞擊圓鉆模擬之頭部加速度歷時圖

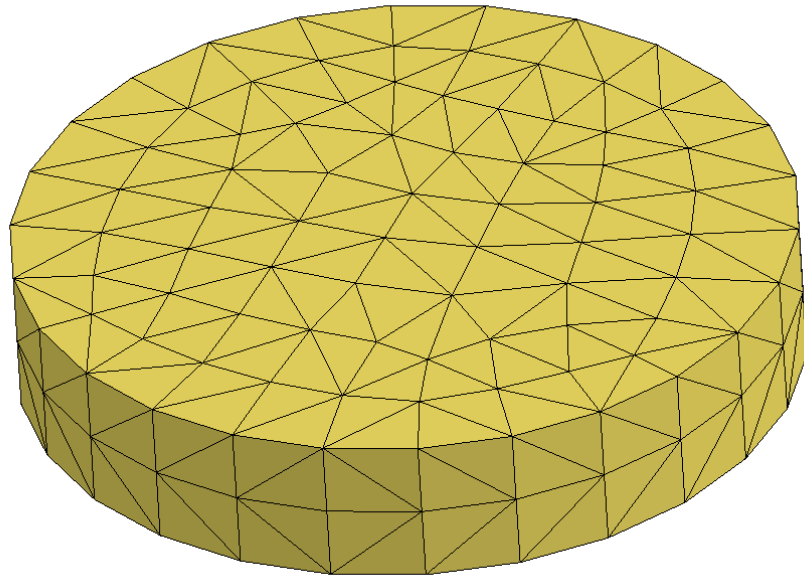


圖 5.12 SNELL B95 標準平鈑有限元素模型

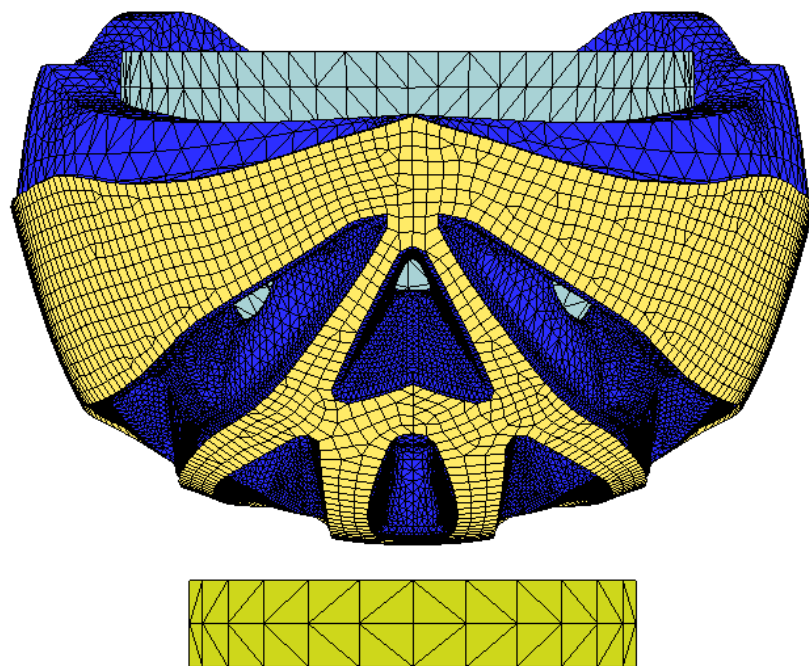


圖 5.13 SNELL B95 標準安全帽撞擊平鈑有限元素模型

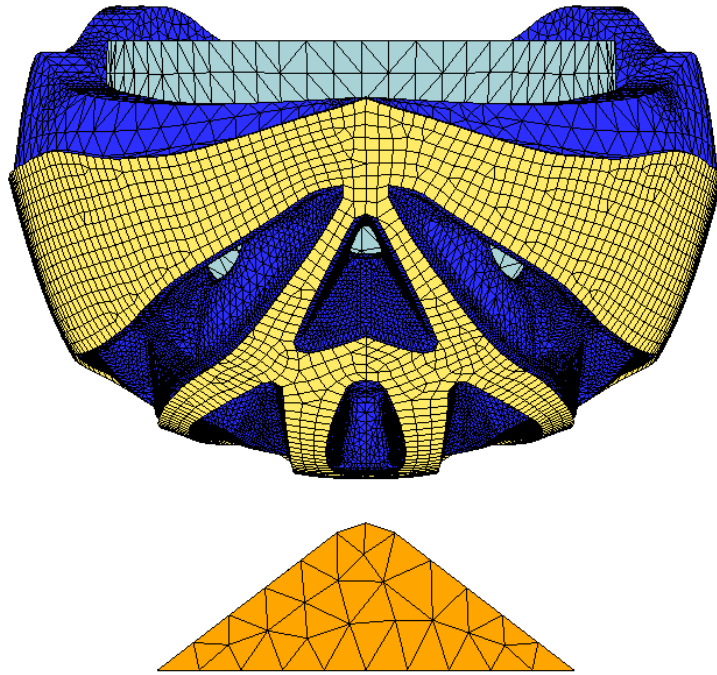


圖 5.14 SNELL B95 標準安全帽撞擊路邊石鈎有限元素模型

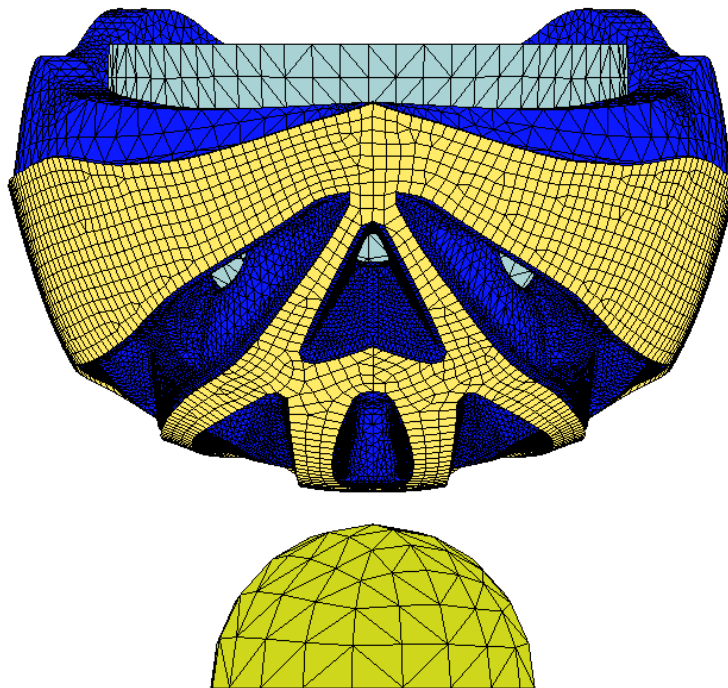


圖 5.15 SNELL B95 標準安全帽撞擊圓鈎有限元素模型

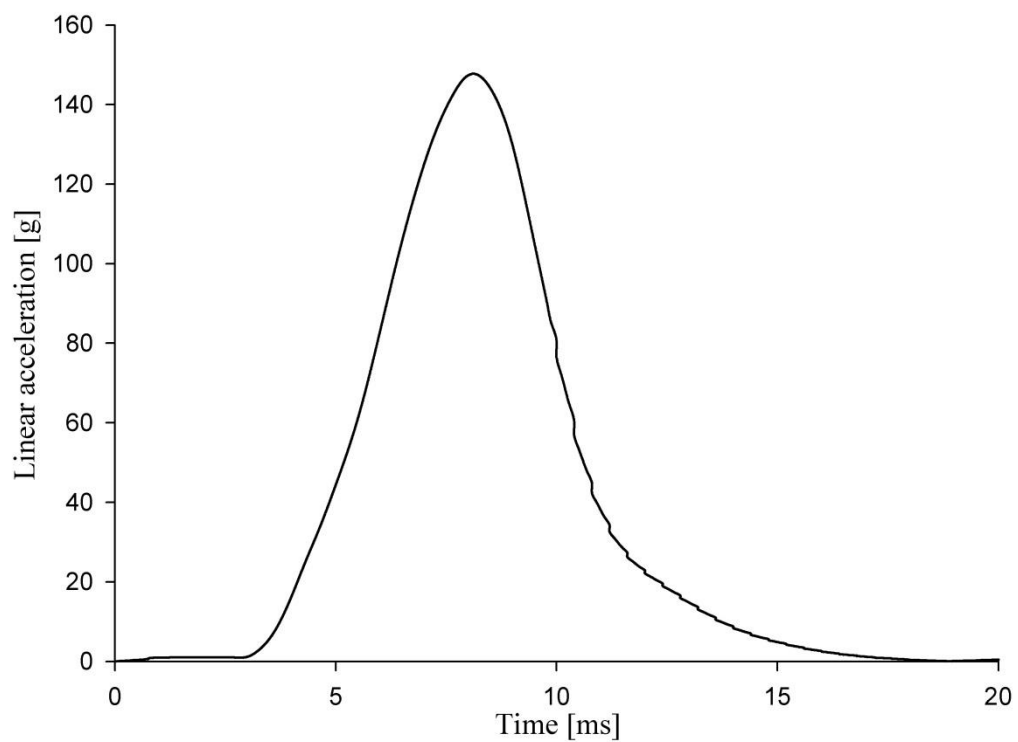


圖 5.16 SNELL B95 安全帽撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖

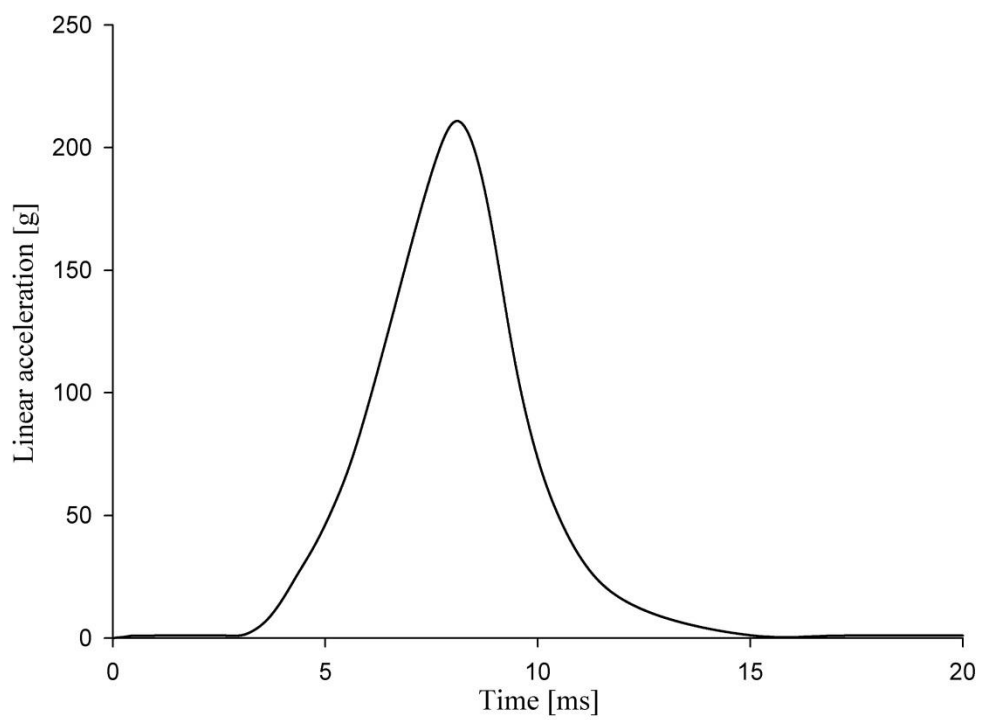


圖 5.17 SNELL B95 安全帽撞擊路邊石鉛模擬之頭部加速度歷時圖

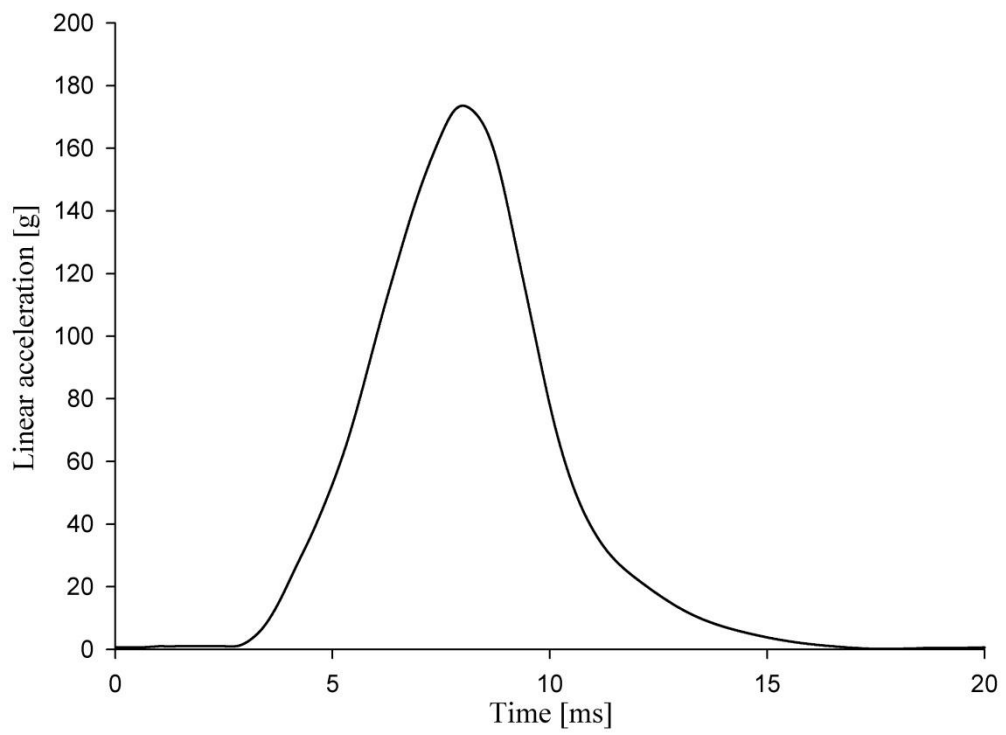


圖 5.18 SNELL B95 安全帽撞擊圓鉛模擬之頭部加速度歷時圖

表 5.1 安全帽撞擊測試有限元素模型各部件詳細資料

部位	節點數量	元素數量	元素型式
頭部模型	1,402	2,070	Solid
CPSC 適用平鈔	227	679	Solid
SNELL B95 適用平鈔	228	685	Solid
CPSC 與 SNELL B95 通用路邊石鈔	466	1476	Solid
CPSC 與 SNELL B95 通用圓鈔	148	437	Solid

表 5.2 安全帽撞擊測試模型之材料特性

材料類型	質量密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	泊松比 ν	楊氏係數 E (MPa)
鎂鋁合金	1,850	0.33	70,000
鋼(steel)	7,800	0.3	210,000

表 5.3 安全帽撞擊測試模擬之頭部加速度值比較

	CPSC 標準模擬值	SNELL B95 標準模擬值
平鈔	273.66G	299.23G
路邊石鈔	174.71G	210.85G
圓鈔	147.76G	173.57G

附註:CPSC 及 SNELL B95 標準規範頭部加速度值不得大於 300G

第六章 自行車安全帽新型內襯材料之分析

近年來由於環保意識強烈，對材料之要求愈來愈嚴格，部份的傳統材料已不符合此方面需求，為了提升產品之競爭能力，且不犧牲結構強度之考量下，環保產品成為業界當前追求之目標，故應運而生的是發展質量輕、強度高、可回收的材料，其中環保材料又可因應設計需求，進而可被回收成各種形狀，故此材料的應用為未來安全帽設計的新趨勢。安全帽在結構上占最多體積的為內襯，在很多研究上說明在安全帽受到撞擊時，內襯是安全帽保護頭部最重要的部分，目前在產業界及學術研究上大多針對安全帽內襯外形結構、內襯材料及內襯通風孔多少作探討。本章節將考量以發泡聚丙烯(Expanded Polypropylene, EPP)及發泡聚氨酯(Extruded Polyurethane, EPU)為安全帽內襯材料，此兩者材料目前普遍應用在機車安全帽上，但尚未使用於在自行車安全帽的內襯材料上；目前市面上較多自行車安全帽還是使用 EPS 內襯材料，本章節將針對使用這三種內襯材料的安全帽標準測試模擬去比較其撞擊吸收性能。

本章節首先依據自行車安全帽標準針對內襯新型發泡聚丙烯(EPP)及發泡聚氨酯(EPU)內襯材料進行撞擊測試數值模擬分析，以評估 EPP 和 EPU 內襯材料在自行車安全帽使用上是否符合標準規範。最後探討原本安全帽所使用發泡聚苯乙烯 EPS 內襯材料與新型 EPP 和 EPU 內襯材料在自行車安全帽撞擊測試模擬中頭模重心位置加速度值的差異性，以評估新型內襯材料使用在自行車安全帽的可行性。

6.1 發泡聚丙烯(EPP)內襯材料分析

6.1.1 EPP 材料特性

發泡聚丙烯(EPP)是一種性能卓越的高結晶型聚合物/氣體複合材料，以其獨特優越的性能成為目前成長最快的環保新型抗壓緩衝隔熱材料，EPP 材料如圖 6.1 所示。EPP 製品具有十分優異的抗震吸能性能、變形後回復率高、很好的耐熱性、耐化學品、耐油性和隔熱性；此外，其質量輕，可大幅度減輕製品重量。EPP 還是一種環保材料，不僅可回收再利用，而且可以自然分解，不會造成環境污染，其缺點是價格太昂貴。因此，自 1990 年代問世以來，EPP 便迅速在汽車製造領域得到了廣泛應用，成為吸收能量和抗震材料的新寵，其應用潛力非常廣闊。目前國內外的很多車型都採用 EPP 材料作為緩衝吸能部件，例如保險槓芯、側護板、門內板吸能保護墊、緩衝墊、頭枕、遮陽板、工具箱等。

6.1.2 EPP 內襯材料安全帽撞擊測試模型

本節將依據 EN 1078、CPSC 及 SNELL B95 自行車安全帽標準來進行撞擊測試模擬，此 EPP 內襯之安全帽模型之形狀、尺寸與原始 EPS 內襯材料之安全帽模型相同，所使用的自行車安全帽及頭部有限元素模型、邊界條件以及其他參數設定皆相同，模型說明如第 4、5 章所述。

本節所使用的 EPP 內襯材料密度為 20 kg/m^2 ，重量為 36 克，在 LS-DYNA 材料模型資料庫同樣採用 *MAT57_LOW_DENSITY_FOAM 材料模型，其材料參數如表 6.1 所示，應力應變曲線如圖 6.2 所示[17]。

6.1.3 EPP 內襯材料安全帽撞擊測試模擬結果

1. EN1078 標準

圖 6.3 為 EPP 內襯安全帽材料以 EN1078 標準撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鉛之頭部模型的加速度於 8.08 毫秒時達到最大值 181.01G，符合標準所規範的 250G 容許範圍內。圖 6.4 為 EPP 內襯材料安全帽以 EN1078 標準撞擊路邊石鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊路邊石鉛之頭部模型的加速度於 11.32 毫秒時達到最大值 109.08G，符合標準所規範的 250G 容許範圍內。

2. CPSC 標準

圖 6.5 為 EPP 內襯材料安全帽以 CPSC 標準撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鉛之頭部模型的加速度於 7.72 毫秒時達到最大值 237.85G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.6 為 EPP 內襯安全帽以 CPSC 標準撞擊路邊石鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊路邊

石鈔之頭部模型的加速度於 7.58 毫秒時達到最大值 150.49G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.7 為 EPP 內襯材料安全帽以 CPSC 標準撞擊圓鈔模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊圓鈔之頭部模型的加速度於 7.2 毫秒時達到最大值 127.09G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。

3. SNELL B95 標準

圖 6.8 為 EPP 內襯材料安全帽以 SNELL B95 標準撞擊平鈔模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鈔之頭部模型的加速度於 7.6 毫秒時達到最大值 266.21G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.9 為 EPP 內襯材料安全帽以 SNELL B95 標準撞擊路邊石鈔模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊路邊石鈔之頭部模型的加速度於 8 毫秒時達到最大值 176.03G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.10 為 EPP 內襯材料安全帽以 SNELL B95 標準撞擊圓鈔模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鈔之頭部模型的加速度於 7.04 毫秒時達到最大值 152.98G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。

6.2 發泡聚氨酯(EPU)內襯材料分析

6.2.1 EPU 材料特性

發泡聚氨酯(EPU)主要特徵是多孔性，因而相對密度小，強度高。根據所用的原料不同和配方變化，可製成軟質、半硬質和硬質聚氨酯泡沫塑料等幾種。軟質聚氨酯材料具有防震抗壓的效能，且固化後不開裂，不腐化，不脫落，其缺點是製成較為困難，其填縫劑可粘附在混凝土，塗層，牆體，木材及塑料表面，EPU材料如圖 6.11 所示。EPU 材料應用範圍十分廣泛，特別在家具、床具、運輸、冷藏、建築、絕熱等方面。硬質聚氨酯材料主要用於絕熱保溫，冷藏冷凍設備及冷庫，絕熱板材，牆體保溫，管道保溫，儲罐的絕熱，單組分泡沫填縫材料等。

6.2.2 EPU 內襯材料安全帽撞擊測試模型

本節將依據 EN 1078、CPSC 及 SNELL B95 自行車安全帽標準來進行撞擊測試模擬，此 EPU 內襯之安全帽模型之形狀、尺寸與原始 EPS 內襯材料之安全帽模型相同，所使用的自行車安全帽及頭部有限元素模型、邊界條件以及其他數值參數設定皆相同，模型說明如第 4、5 章所述。

本節所使用的 EPU 內襯材料密度為 80 kg/m^2 ，重量為 147 克的發泡聚氨酯，在 LS-DYNA 材料模型資料庫採用 *MAT57_LOW_DENSITY_FOAM 材料模型，其材料參數如表 6.1 所示，應力應變曲線如圖 6.12 所示[17]。

6.2.3 EPU 內襯材料安全帽撞擊測試模擬結果

1. EN1078 標準

圖 6.3 為 EPU 內襯材料安全帽以 EN1078 標準撞擊平鈎模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鈎之頭部模型的加速度於 7.88 毫秒時達到最大值 197.1G，符合標準所規範的 250G 容許範圍內。圖 6.4 為 EPU 內襯材料安全帽以 EN1078 標準撞擊路邊石鈎模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊路邊石鈎之頭部模型的加速度於 9.8 毫秒時達到最大值 125.62G，符合標準所規範的 250G 容許範圍內。

2. CPSC 標準

圖 6.5 為 EPU 內襯材料安全帽以 CPSC 標準撞擊撞擊平鈎模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鈎之頭部模型的加速度於 6.66 毫秒時達到最大值 306.45G，超出標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.6 為 EPU 內襯材料安全帽以 CPSC 標準撞擊路邊石鈎模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊路邊石鈎之頭部模型的加速度於 7.2 毫秒時達到最大值 183.46G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.7 為 EPU 內襯材料安全帽以 CPSC 標準撞擊圓鈎模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊圓鈎之頭部模型的加速度於 6.8 毫秒時達到最大值 169.25G，符合標

準所規範的 300G 容許範圍內。

3. SNELL B95 標準

圖 6.8 為 EPU 內襯材料安全帽以 SNELL B95 標準撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鉛之頭部模型的加速度於 6.6 毫秒時達到最大值 330.29G，超出標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.9 為 EPU 內襯材料安全帽以 SNELL B95 標準撞擊路邊石鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊路邊石鉛之頭部模型的加速度於 7.36 毫秒時達到最大值 230.17G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。圖 6.10 為 EPU 內襯材料安全帽以 SNELL B95 標準撞擊圓鉛模擬之頭部加速度歷時圖，由圖可知在 0 到 20 毫秒的計算範圍內，安全帽撞擊平鉛之頭部模型的加速度於 6.82 毫秒時達到最大值 185.09G，符合標準所規範的 300G 容許範圍內。

6.3 新型內襯材料安全帽撞擊測試模擬結果之比較

本節以第四、五章 EPS 內襯材料安全帽及本章兩種新型 EPP 和 EPU 內襯材料安全帽依據三種自行車安全帽標準之撞擊測試模擬結果來進行比較，以評估採用新型內襯材料之可行性。

6.3.1 EN1078 標準

1. 平鈎

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊平鈎模擬分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為 189.72G、181.01G 及 197.1G，如圖 6.13 所示。由圖可知於 EN1078 標準撞擊平鈎測試中，三種內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值都符合標準規範 250G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

2. 路邊石鈎

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊路邊石鈎模擬分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為 121.36G、109.08G 及 125.62G，如圖 6.13 所示。由圖可知於 EN1078 標準撞擊路邊石鈎測試模擬中，三種內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值都符合標準規範 250G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

6.3.2 CPSC 標準

1. 平鈎

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊平鈎模擬

分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為 273.66G、237.85G 及 306.45G，如圖 6.14 所示。由圖可知於 CPSC 標準撞擊平鉗測試中，只有 EPU 內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值超出標準規範 300G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

2. 路邊石鉗

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊路邊石鉗模擬分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為 174.71G、150.49G 及 183.46G，如圖 6.14 所示。由圖可知於 CPSC 標準撞擊路邊石鉗測試中，三種內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值都符合標準規範 300G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

3. 圓鉗

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊圓鉗模擬分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為 147.76G、127.09G 及 169.25G，如圖 6.14 所示。由圖可知於 CPSC 標準撞擊圓鉗測試中，三種內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值都符合標準規範 300G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

6.3.3 SNELL B95 標準

1. 平鉗

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊平鉗模擬分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為 299.23G、266.21G 及 330.29G，如圖 6.15 所示。由圖可知於 SNELL B95 標準撞擊平鉗測試中，EPU 內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值超過標準規範 300G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

2. 路邊石鉗

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊路邊石鉗模擬分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為 210.85G、176.03G 及 230.17G，如圖 6.15 所示。由圖可知於 SNELL B95 標準撞擊路邊石鉗測試中，三種內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值都符合標準規範 300G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

3. 圓鉗

從 EPS、EPP、EPU 三種內襯材料之安全帽衝擊圓鉗模擬分析結果得知，頭部模型重心位置之加速度峰值分別為

173.57G、152.98G 及 185.09G，如圖 6.15 所示。由圖可知於 SNELL B95 標準撞擊圓鉛測試中，三種內襯材料安全帽的頭模重心位置之加速度峰值都符合標準規範 300G 以下的需求，且比較三種內襯材料，EPP 內襯材料安全帽撞擊吸收性能較 EPS 及 EPU 為佳。

6.3.4 撞擊測試模擬結果之比較

由本節三種內襯材料安全帽之撞擊測試模擬結果比較得知，使用此三種內襯材料之安全帽皆可通過 EN1078 標準的規範，但 EPU 內襯材料之安全帽無法通過 CPSC 及 SNELL B95 標準的規範，故不宜採用 EPU 為自行車安全帽之內襯材料。另 EPS 內襯材料之安全帽雖然可通過三種標準之規範，然在 SNELL B95 標準之平鉛撞擊測試中加速度峰值與規範臨界值極為接近。總體而言，EPP 內襯材料之安全帽可通過三種標準的規範，且在所有鋼鉛撞擊的加速度峰值皆較其它兩種內襯材料來的低，顯示採用 EPP 為自行車安全帽之內襯材料應是可行的，且具較佳的撞擊吸收性能。



圖 6.1 發泡聚丙烯(EPP)材料[43]

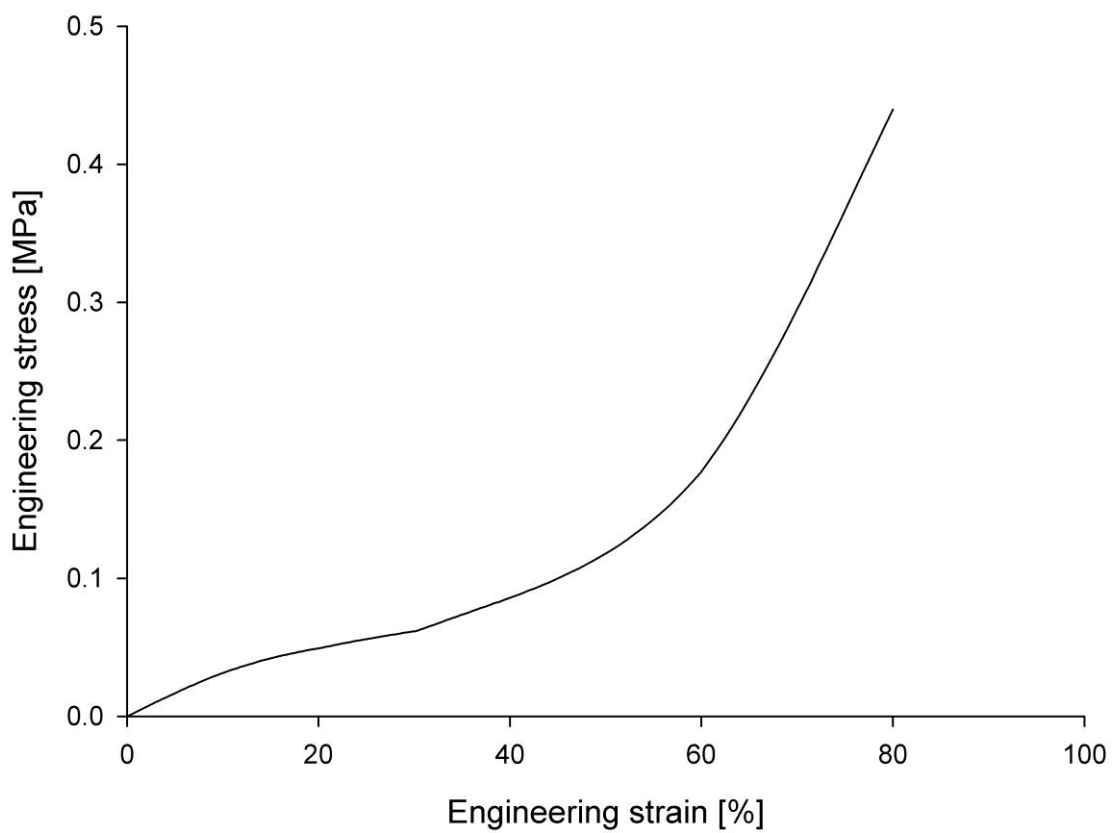


圖 6.2 發泡聚丙烯(EPP)應力應變曲線[17]

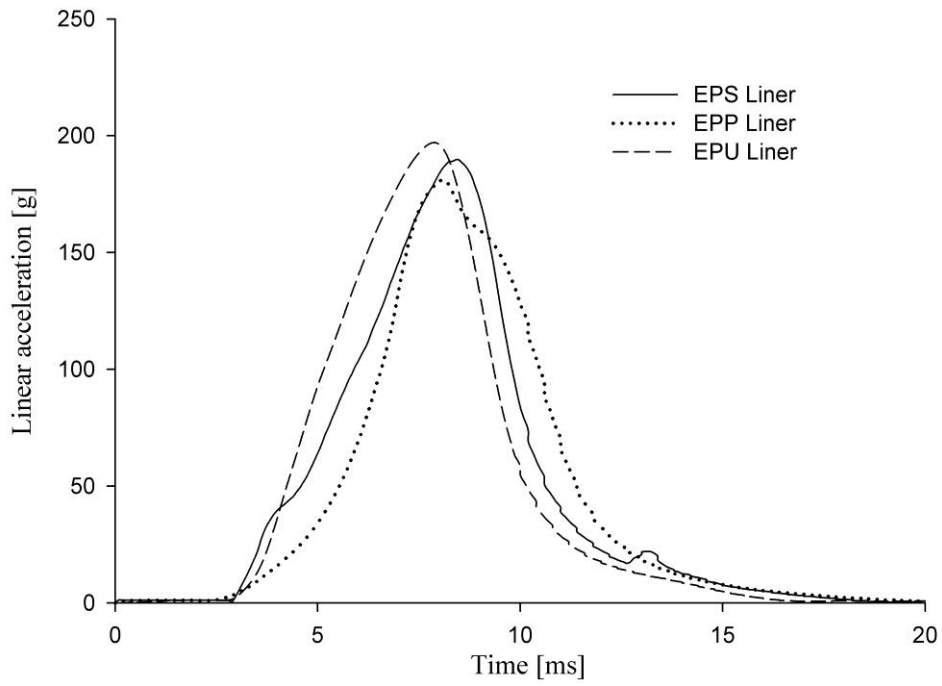


圖 6.3 EN1078 標準安全帽撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖

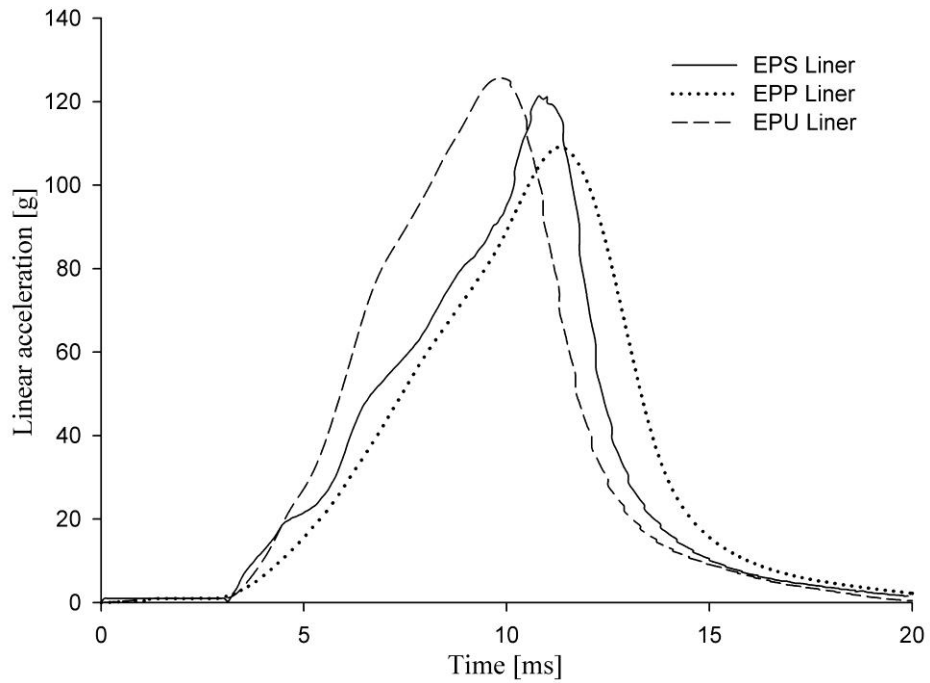


圖 6.4 EN1078 標準安全帽撞擊路邊石鉛模擬之頭部加速度歷時圖

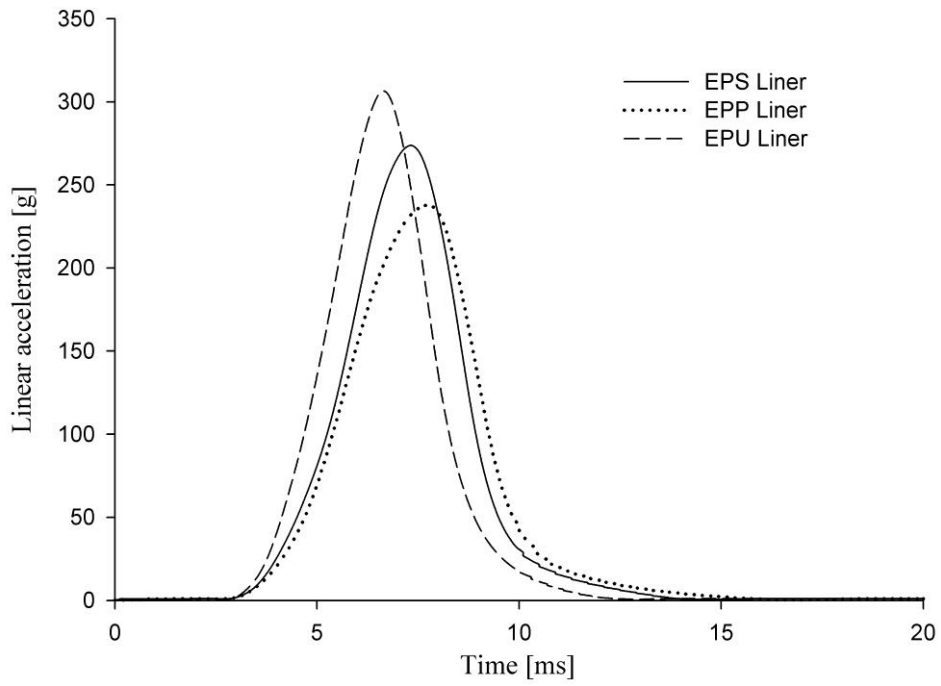


圖 6.5 CPSC 標準安全帽撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖

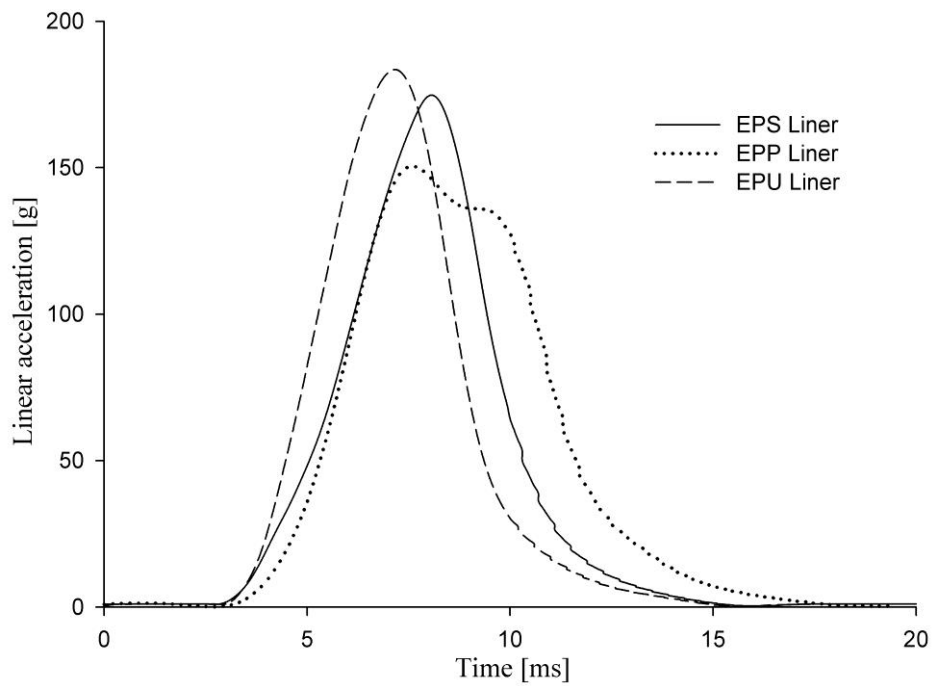


圖 6.6 CPSC 標準安全帽撞擊路邊石鉛模擬之頭部加速度歷時圖

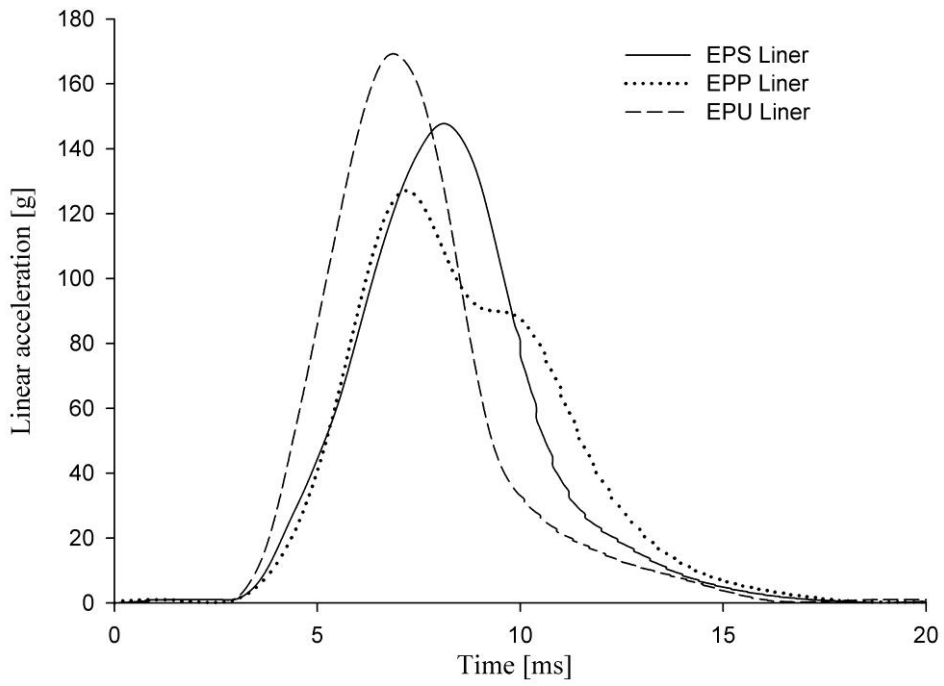


圖 6.7 CPSC 標準安全帽撞擊圓鉛模擬之頭部加速度歷時圖

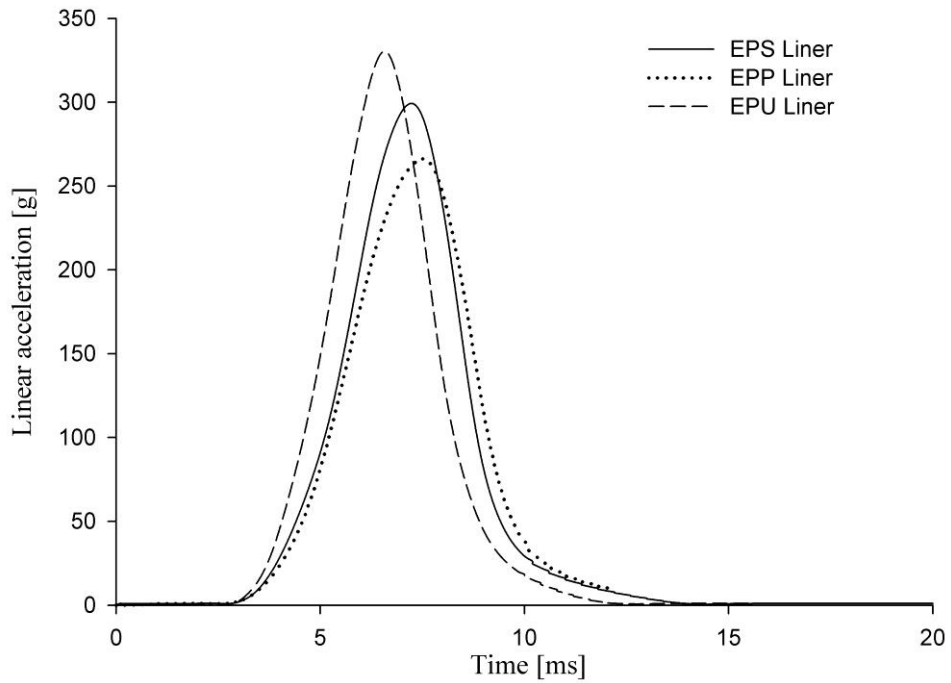


圖 6.8 SNELL B95 標準安全帽撞擊平鉛模擬之頭部加速度歷時圖

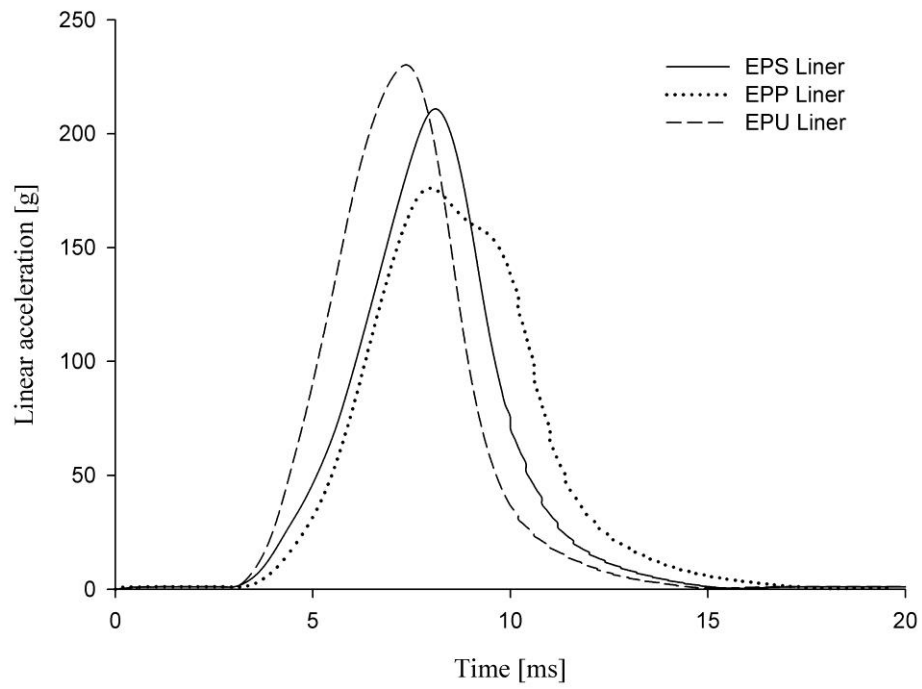


圖 6.9 SNELL B95 標準安全帽撞擊路邊石鉗模擬之頭部加速度歷時圖

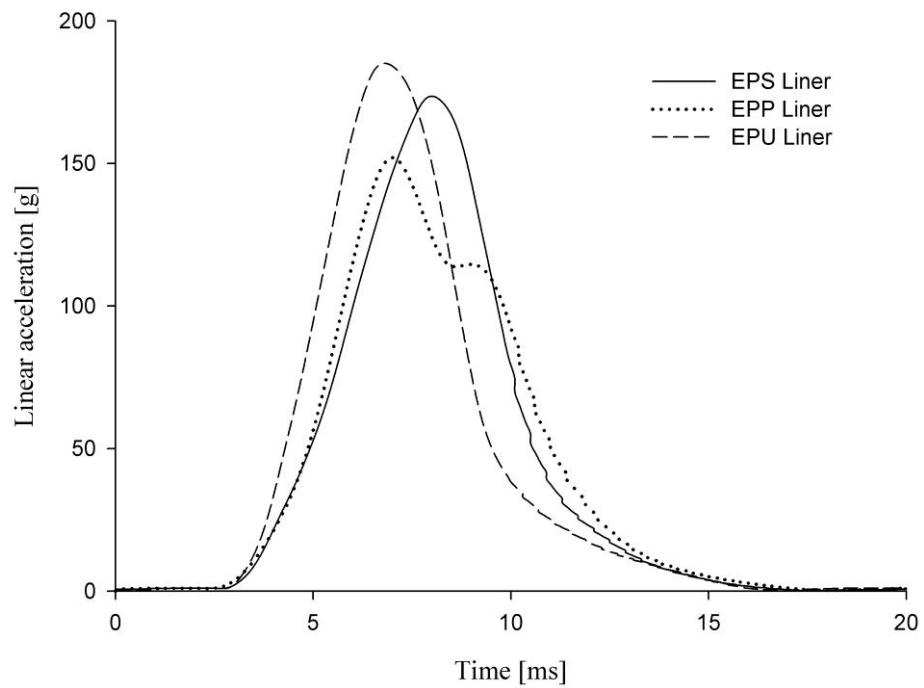


圖 6.10 SNELL B95 標準安全帽撞擊圓鉗模擬之頭部加速度歷時圖



圖 6.11 發泡聚氨酯(EPU)材料[43]

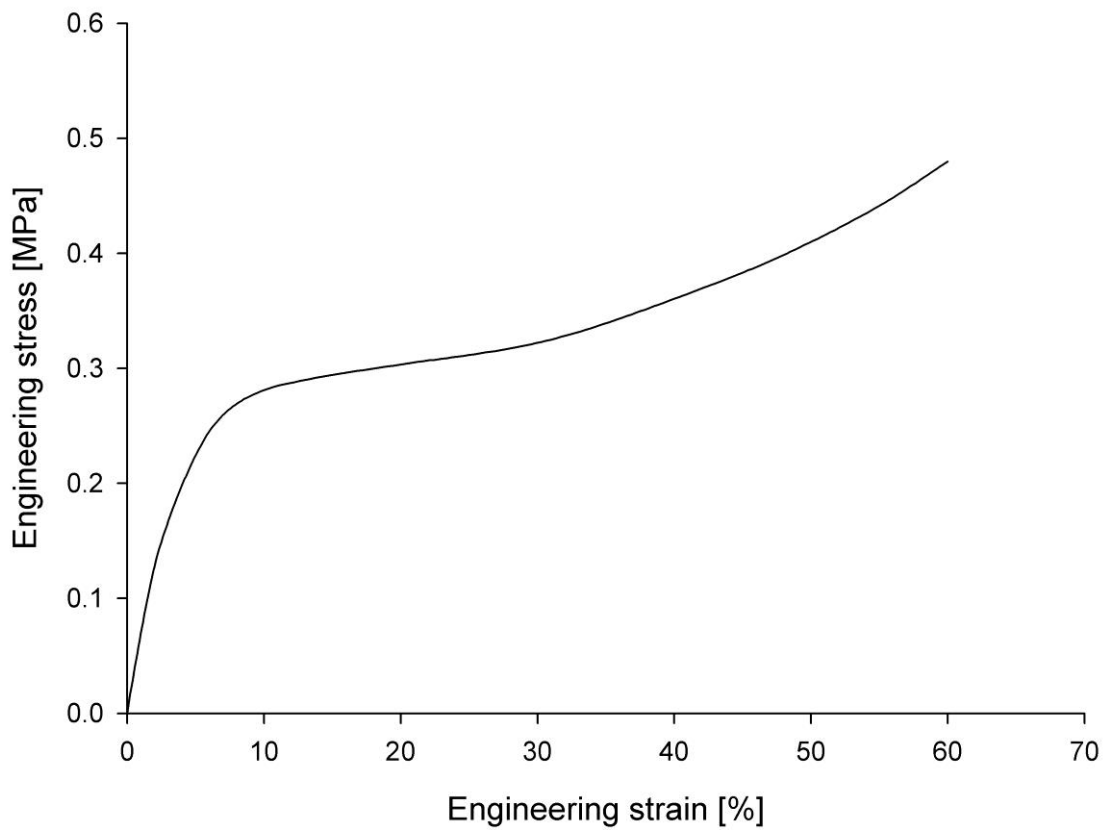


圖 6.12 發泡聚氨酯(EPU)應力應變曲線[17]

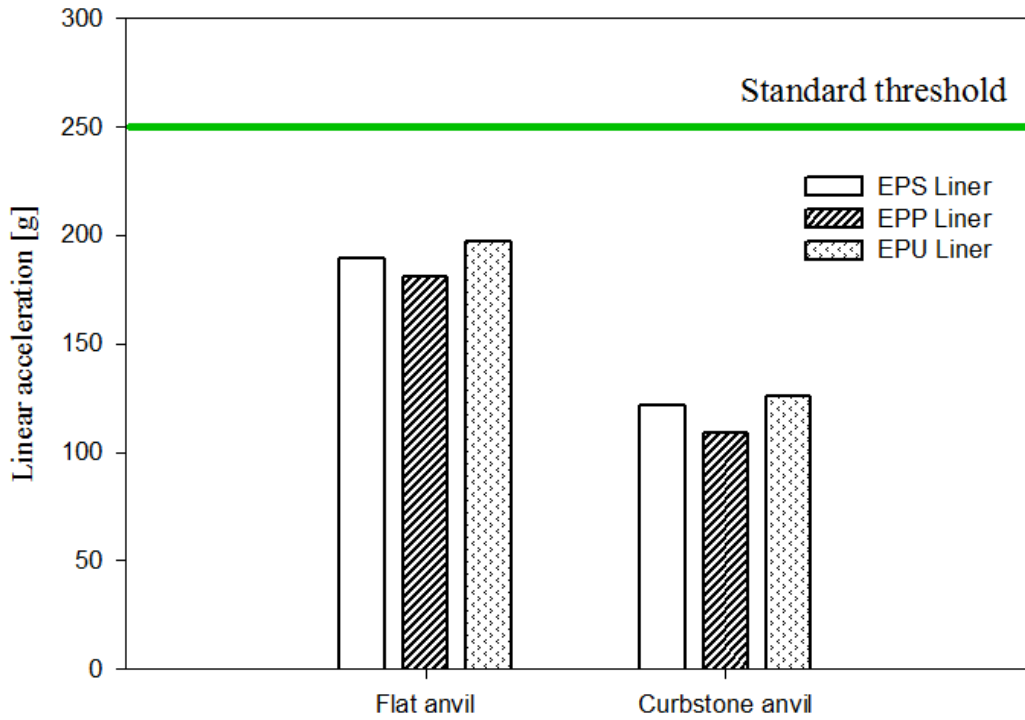


圖 6.13 EN1078 標準三種內襯材料頭部加速度峰值比較圖

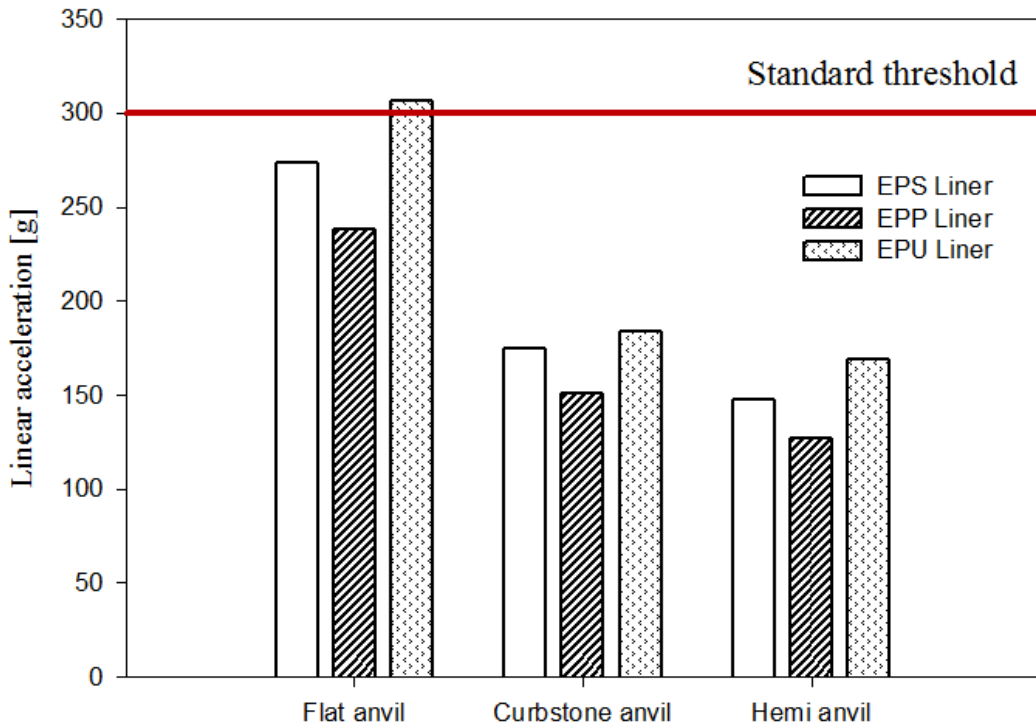


圖 6.14 CPSC 標準三種內襯材料頭部加速度峰值比較圖

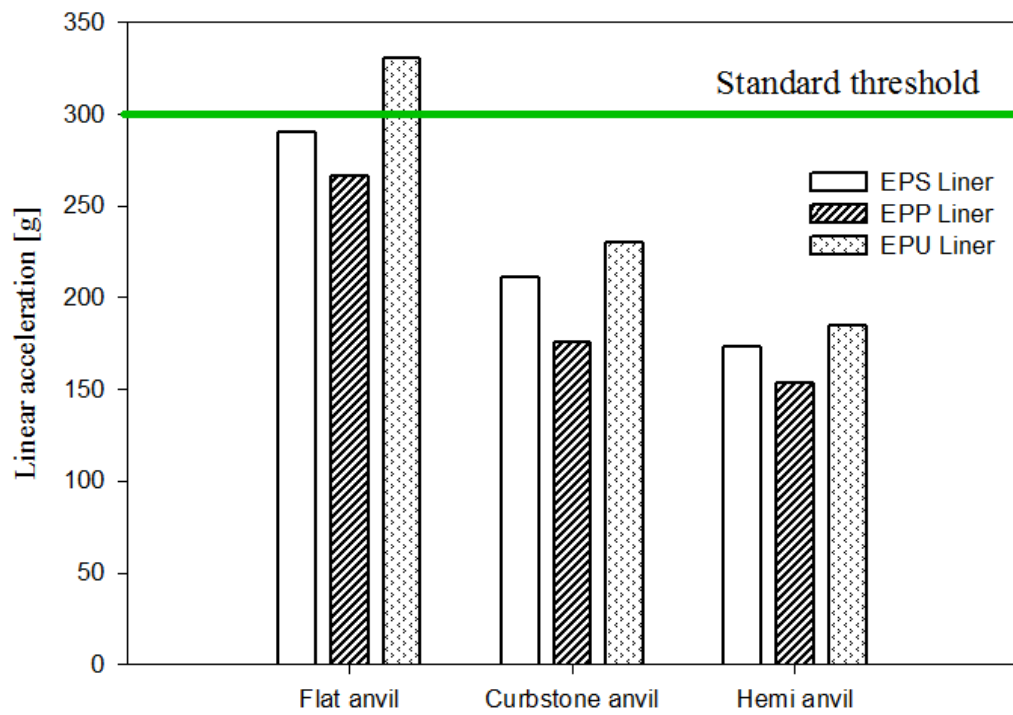


圖 6.15 SNELL B95 標準三種內襯材料頭部加速度峰值比較圖

表 6.1 內襯之材料特性

材料類型	質量密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	泊松比 ν	楊氏係數 E (MPa)
發泡聚丙烯 (EPP)	20	-	2.86
發泡聚氨酯 (EPU)	80	-	28.7

第七章 結論與未來展望

本論文以建構自行車安全帽標準之撞擊測試模型及分析新型內襯材料為研究重點，藉由歐盟 EN1078:2006、美國 CPSC:16 CFR Part 1203 及澳大利亞 SNELL B95 自行車安全帽標準確認自行車安全帽撞擊測試數值模型及安全性評估之可行性；同時確認使用新型內襯材料在自行車安全帽的設計應用上，希望可藉由新型內襯材料的使用，提供國內自行車安全帽設計製造廠商參考，以提升安全帽之安全性。本論文研究重要結論如下：

1. 本論文所建立之自行車安全帽撞擊測試之數值模型，經驗證與實驗測試結果相近，未來可利用本論文所建立之數值模型，進行自行車安全帽之撞擊測試模擬分析。
2. 經由本論文所選定的新型內襯材料之安全帽撞擊測試模擬結果，可以發現 EPP 材料較 EPS 及 EPU 材料可有效吸收撞擊能量，顯示對頭部具較多的保護。未來可考量採用 EPP 內襯材料進行自行車安全帽設計。

此外，由於分析工具及研究時間有限，本論文尚未盡考慮周全之處，未來可持續進行之研究方向如下：

1. 未來可針對標準中其他規範，如保持裝置強度試驗、保持性(脫離)試驗等數值模型的建構與測試模擬分析，以獲得更全面的標準測試模擬。
2. 未來可使用本論文所建立之數值模型，針對不同內襯材料或兩種材料結合之複合式內襯材料(如圖 6.1)或不同內襯之形狀(如圖 6.2~6.3)來進行分析，以設計更多種新型自行車安全帽。

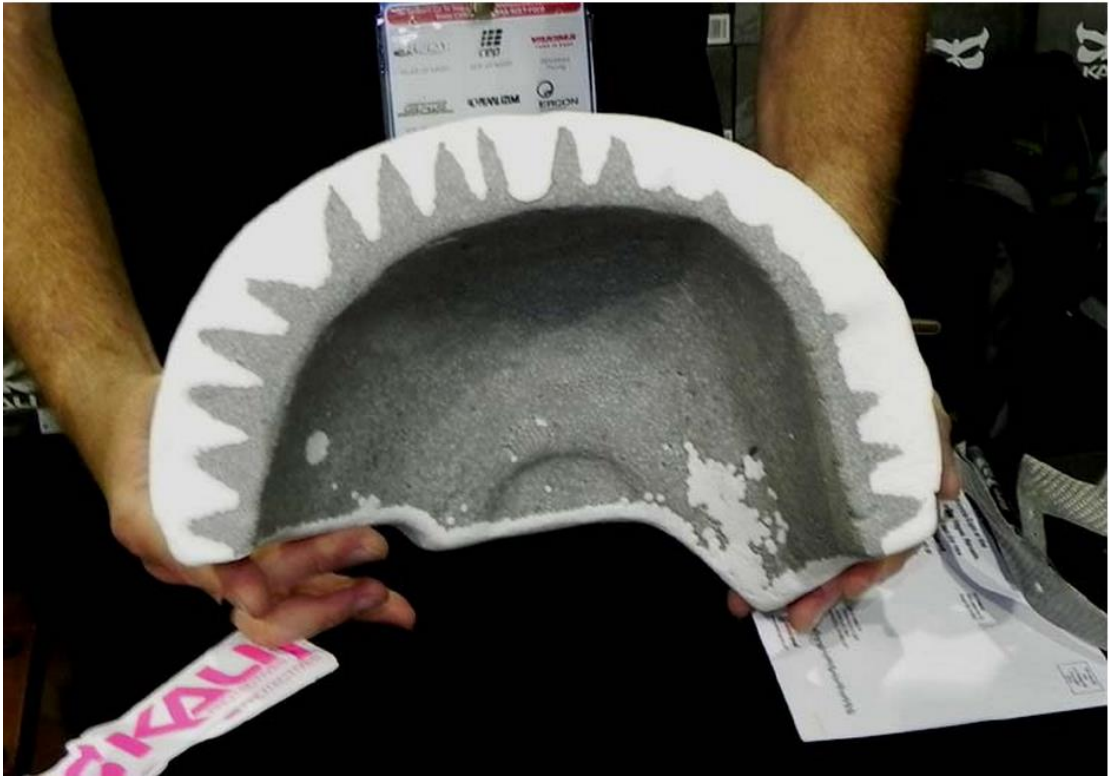


圖 7.1 複合式材料模型示意圖[37]



圖 7.2 新型安全帽內襯模型示意圖[37]



圖 7.3 新型安全帽內襯模型示意圖[37]

參考文獻

- [1]. 交通部統計處
<http://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=850&parentpath=0,1&unitid=8>
- [2]. 陳祥和、吳志富，”自行車安全帽對騎乘者頭部防護功能之研究(I)” ，國科會成果報告，NSC 98-2221-E-038-006，2010。
- [3]. BS EN 1078:2006 Helmets for pedal cyclists and for users of skateboards and roller skates, 2006.
- [4]. 16 CFR Part 1203: Safety Standard for Bicycle Helmet , Consumer Product Safety Commission, Federal Register. Vol.63, No.46 , 1998.
- [5]. SNELL B95 Standard For Protective Headgear, Revision , Snell Memorial Foundation, 1998.
- [6]. H. Kostner, U.W. Stocker, “Improvements of the protective effects of motorcycle helmets based on a mathematical approach”, IRCOBI Biomechanics of Impacts Conference, Bergisch Gladbach, Germany, pp. 195-213, 1998.
- [7]. P.D. Hopes, B.P. Chinn, “A new look at design and possible protection”, IRCOBI Biomechanics of Impacts Conference, Stockholm, pp. 39-54, 1989.
- [8]. N.J. Mills, A. Gilchrist, “The effectiveness of foams in bicycle and motorcycle helmets”, Accident Analysis & Prevention 23(2/3): pp. 153-163, 1991.
- [9]. A.L. Yettrian, N.P. M. Godfrey, B.P. Chinn, “Materials for motorcycle

- crash helmets – a finite element parametric study”, *Plastics and Rubber Processing and Applications*, 22: pp. 215-221, 1994.
- [10]. 范志銘，”應用數值模擬探討機車安全帽防衝擊之設計原理”，國立中正大學機械工程研究所碩士論文，1996。
- [11]. 張立東，”機車安全帽與頭部配合度及護顎於頭面部撞擊傷害之研究”，國立成功大學博士論文”，2000。
- [12]. 張嘉原，”建立耦合式衝擊模型以研究機車頭盔的保護效果”，國立中正大學機械工程研究所碩士論文，2000。
- [13]. V. Kostopoulos, Y.P. Markopoulos, G.Giannopoulos, D.E. Vlachos, “Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets”, Elsevier, *Composite: Part B* 33, pp.99-107, 2002.
- [14]. Li-Tung Chang, Guan-Liang Chang, Ji-Zhen Huang, Shyh-Chour Huang, De-Shin Liu and Chih-Han Chang, “Finite element analysis of the effect of motorcycle helmet materials against impact velocity”, *Journal of the Chinese institute of engineers*, Vol.26, No.6, pp.835-843, 2003.
- [15]. De-Shin Liu, Chia-Yuan Chang, Chin-Ming Fan, Shu-Lin Hsu, “Influence of environmental factors on energy absorption degradation of polystyrene foam in protective helmets”, *Engineering Failure Analysis* 10, pp.581–591, 2003.
- [16]. Asiminei A.G., Van der Perre G., Verpoest. I., Goffin J., “A transient finite element study reveals the importance of the bicycle helmet material properties on head protection during an impact” *Proceedings of the IRCOBI Conference, York, United Kingdom*, pages 357-360, 2009.

- [17].F.M. Shuaeib, A.M.S. Hamouda, S.V. Wong, R.S. Radin Umar and M.M.H. Megat Ahmed,“A New Motorcycle Helmet Liner Material: The finite element simulation and design of experiment optimization”,Materials and Design 28, pp. 182-195,2007.
- [18].M.A. Forero Rueda, L. Cui 、M.D. Gilchrist,“Optimisation of energy absorbing liner for equestrian helmets. Part I: Layered foam liner ” , Journal of Materials and Design, pp. 3405–3413, 30 ,2009.
- [19].P.K. Pinnoji, P. Mahajan, N. Bourdet, C. Deck, R. Willinger,“Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: experiments & numerical modelling”,Int J Impact Eng, pp. 274–284, 37 ,2010.
- [20].V.Tinard, C.Deck, R.Willinge,“New methodology for improvement of helmet performances during impacts with regards to biomechanical data ” , Mater Des, pp. 79–86, 37 ,2012.
- [21].Blanco D.H. 、Cernicchi A. and Galvanetto U. “FE Modeling of innovative helmet liners”, In: Proceedings of the 11th international LS-Dyna users conference, Dearborn, MI, USA, pp.9-1–9-12, 6–8 June 2010.
- [22].顏重岳,“機車安全帽之有限元素動態模擬”,國立陽明大學醫學工程研究所碩士論文,1995。
- [23].王秋華,“機車安全帽護顎之有限元素分析”,國立成功大學醫學工程研究所碩士論文,1998。
- [24].Van der Bosch E, Leensen MWBM.,”Development of an

improved dummy head for use in helmet certification tests”,In: Proceedings of the ASME symposium on crashworthiness, ASME: Orlando, 2000.

- [25].曾文龍，”多體動力人偶應用於腳踏車碰撞之探討”，國立成功大學醫學工程研究所碩士論文，2003。
- [26].洪興林，廖培凱，陳世昇，陳永偉，蔡佳宏，李曜宏，機車頭盔之撞擊模擬與分析，第二十四屆中國機械學術研討會，2007。
- [27].Afshari A., Rajaai S.M.,”Finite element simulations investigating the role of the helmet in reducing head injuries”,International Journal of Simulation Modelling, Vol. 7, No. 1, 42-51,2008.
- [28].洪興林、李曜宏、陳世昇、黃翰仁、陳勇丞，”頭盔墊料受撞擊時之能量吸收力分析及對超輕量強化機車安全帽開發之研究”，第二十五屆中國機械學術研討會，2008。
- [29].L. Cui, M.A. Forero Rueda, M.D. Gilchrist,”Optimisation of energy absorbing liner for equestrian helmets. Part II: Functionally graded foam liner”,Journal of Materials and Design, pp. 3414–3419, 30 ,2009.
- [30].洪興林、李曜宏、黃翰仁、陳勇丞、廖培凱，”頭盔帽殼之形狀最佳化對機車安全帽撞擊能量吸收力之影響”，第二十六屆中國機械學術研討會，2009。
- [31].N.J. Mills, A. Gilchrist,”Finite element analysis of bicycle helmet oblique impacts”,Int J Impact Eng, pp. 1087–1101, 35 ,2008.
- [32].龔純、吳忠鳴，”自行車用頭盔跌落仿真分析”，Altair HyperWorks 技術大會，2009。
- [33].Cernicchi A., Galvanetto U., Iannucci L.,”Virtual modelling of

- motorcycle safety helmets: practical problems”, In: Sixth European LS-DYNA user’s conference, Gothenburg, Sweden, 2007.
- [34].F. Hansen, M.Dau, N.Deck, C.Feist, K.Madey, S.M. Willinger,” Angular Impact Mitigation system for bicycle helmets to reduce head acceleration and risk of traumatic brain injury”,Elsevier,59, pp.109– 117,2013.
- [35]. O.Fanta, J.Boucek, D.Hadraba, K.Jelen,” Influence of the front part of the vehicle and cyclist’s sitting position on the severity of head injury in side collision”,Acta of Bioengineering and Biomechanics Original paper Vol. 15, No. 1, 2013.
- [36].美國LS-DYNA公司<http://www.ls-dyna.com/>
- [37].自行車安全帽安全研究所<http://www.bhsi.org/index.htm>
- [38].BS EN 960:2006, Headforms for use in the testing of protective helmets,2006.
- [39].CADEX安全帽撞擊測試公司<http://www.cadexinc.com/index.php>
- [40].ISO DIS 6220-1983 Headforms for Use in the Testing of Protective Helmets. International Standards Organization, 1983.
- [41].LS-DYNA THEORETICAL MANUAL,V971,2007.
- [42].S. Y. Soong, R. E. Cohen, M. C. Boyce and W. Chen,“The effects of thermomechanical history and strain rate on antiplasticization of PVC”, Polymer, vol. 49, no. 6, pp. 1440–1443, 2008.
- [43].合肥會通材料集團
<http://wenku.baidu.com/view/d1ba723c67ec102de2bd89ea.html>
- [44].捷安特自行車 <http://www.giantcyclingworld.com/web/>