

休旅車行人碰撞下肢防護結構優化分析

黃偉智、賴文光、楊偉良

財團法人車輛研究與測試中心

E-mail:jackson@artc.org.com.tw

摘要

有鑒於各國行人碰撞損傷事故所造成之生命財產損失不斷升高，歐盟各國及日本均已針對車輛之行人碰撞防護進行立法并要求車輛具備一定之行人碰撞防護能力。本文採用自 NCAC 網站上下載之 Ford Explorer 休旅車，先根據歐盟(2003/102/EC)第一階段行人碰撞防護法規，分析該車行人碰撞腿部之防護能力；再根據分析結果以原況車為基礎，進行行人碰撞下肢之靈敏度研究及行人腿部撞擊優化分析。

關鍵詞：行人保護、靈敏度分析、優化分析、休旅車

1. 前言

由於世界各國機動車輛之廣泛使用，故早期對於車輛碰撞安全及其乘員保護方面之議題均廣為各國所重視，因此，相關領域之研究與成果應用皆較為成熟。近十年來，由於歐洲、日本等車輛先進國家，每年行人因徒步而遭受車輛撞擊導致傷亡之意外事故日益增加。雖然各國皆採用諸如類似改進道路交通條件和制訂較嚴厲之交通法規等措施防範，然而於歐洲將近四分之一之死傷原因仍舊歸因於行人碰撞所造成，根據統計於2001年歐盟有46700件行人碰撞死傷事故，其所造成之經濟損失大約達到GDP的2%。而於中國大約50%之行人碰撞事故是導因於行人遭到車輛前端的部份撞擊所致，相關統計顯示2/3的行人碰撞事故其行車速度小於40km/hr。而於美國每年有5000人死於行人碰撞、69,000人受傷；如此龐大的生命財產損失使得行人碰撞安全防護之相關議題逐漸受到各國所重視。因此，歐盟已於2003年根據WG17工作組的規定頒布行人碰撞安全防護法規(2003/102/EC)，規定自2005年10月起，分兩階段針對歐盟各會員國所生產之乘用車進行管制，進而確保相關車型都能具備一定之行人碰撞防護能力。

根據統計，一般而言當人體和車輛碰撞接觸時行人頭部因撞擊導致的損傷機率为31%，腳部為32%；而車身前段接觸對於行人所造成最嚴重損傷的部位21%為前保桿，18%為引擎蓋上部，故目前和行人碰撞防護相關之分析抑或改進的措施皆根據前所述之部位進行相關研究及設計修改。然而因近代的汽車設計為了兼顧造型美觀及節省油耗起見紛紛採取流線型之設計，而此種設計方式往往可能更進一步加劇對於行人之潛在危害，舉例而言，近代的車型設計是將引擎蓋和引擎室內部件之距離越來越貼近，很多嚴重的行人碰撞事故之發生通常肇因於行人頭部撞擊到底下堅硬的引擎部件所導致之二次碰撞效應。到目前為止市面上的新車銷售仍

有極大比例未具備合格的行人碰撞防護要求，就以目前EURONCAP所公佈之最新車款的行人碰撞測試結果，可得知於行人碰撞防護方面仍有極大可改善空間。

本文將利用CAE的分析方式，首先進行目標車原況探討，找尋車身上可能影響行人碰撞防護特性的影響因子，藉由完整的分析探討，完成目標車之定性影響評估。之後根據所得之影響性因子，進行目標車之靈敏度分析研究以及後續之優化分析。

2. 國際間行人碰撞安全測試系統發展現況

目前世界各國以歐盟率先於行人碰撞防護領域建立明確之試驗法規，歐洲EEVC WG10工作組自1987年開始發展行人碰撞相關實驗方式之後，歷經許多變革，最終歐洲議會(EC)根據ACEA“歐洲汽車製造商協會協定”推行了一指令“2003/102/EC”來保護行人的安全，該法令公佈於2003年11月17日。自2005年10月1日起，所有預申請歐洲聯盟的整車型式批准都必須要滿足技術指令2003/102/EC第一階段規定的要求；自2012年12月31日起，所有生產的車子要達到此要求。自2010年9月1日起，申請歐洲聯盟的整車型式批准的新車就必須要滿足歐盟技術指令2003/102/EC中第二階段的試驗要求；自2015年9月1日起，所有生產的車輛必須要達到2003/102/EC中第二階段的試驗要求。

在日本方面亦已於2004年頒布行人碰撞安全防護法規(TRIAS 63-2004)，規定自2005年起，於該國境內銷售之乘用車皆須符合該法規之要求。此外，包括美國、中國、韓國、澳洲等各車輛工業先進國家於UN/ECE/WP29下共同研究與草擬行人碰撞安全防護之世界統一技術基準(Global Technical Regulation, GTR)，並規劃於近年內對外公告。

於歐洲EURONCAP自1997年起參考WG10工作組的規定制訂測試方式，該試驗以星級評等的方式可建構出一評鑑行人碰撞損傷之試驗方式。由於EURONCAP之實驗測試方式乃針對WG17工作組的規定變化而來的，其特點之一是在於除了原來的18個撞擊點外，如廠商對於實驗結果不滿意而覺得受測結果不完全能代表該車之性能表現，EURONCAP允許受測廠商可提供額外的撞擊點位受測，故能夠衝擊檢驗更多的位置，提供該車更為詳盡的行人碰撞防護性能。於國際間諸如日本、澳洲、中國等之NCAP於行人碰撞防護測試方面也正在發展之中，EURONCAP和歐盟第一及第二階段法規之詳細比較可參考表1之規定。

目前法規規定使用衝擊器，主要分為頭部、上肢及下肢三項來分別對車體部分的結構進行撞擊試驗。於 2003/102/EC 法規第一階段及第二階段試驗中，在車體撞擊的區域及速度上往往不同，一般而言以第二階段/EURONCAP 的要求較為嚴苛。

表 1 各規範及評鑑之試驗方式一覽表

實驗方式	檢核要件	歐盟法規第一階段	歐盟法規第二階段 Euro Ncap / WG17
成人頭型撞擊	HIC	頭型質量 4.8kg / 35kmh 於成人區之撞擊 僅參考用	頭型質量 4.8kg / 40kmh 於成人區之撞擊 < 1000
小孩頭型撞擊	HIC	頭型質量 3.5kg / 35kmh 撞擊於引擎蓋上 <1000; 2/3 區域 <2000; 1/3 區域	頭型質量 2.5kg / 40kmh 於小孩區之撞擊 <1000
腿部上肢對於引擎蓋前緣撞擊	力量	僅參考用	5 kN
	彎曲力矩	僅參考用	300 Nm
腿部下肢對於保桿撞擊	脛骨加速度	< 200 g	< 150 g
	膝蓋旋轉量	<21 °	<15 °
	膝蓋剪力變形量	< 6 mm	< 6 mm

3. 目標車原況分析

本章節將使用 Ford Explorer 2000 年款之有限元素模型作為分析目標車，以該車進行原況之行人碰撞分析。該有限元素模型總計包含 619161 個元素、632166 個節點，其示意圖可參考圖 1。

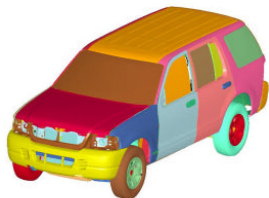


圖 1 Ford Explorer 有限元素模型

由於該車屬於較早之車型款式，於結構設計時恐還未考慮行人碰撞防護相關之需求，於本文中先使用 2003/102/EC 之第一階段法規作為評估該車行人碰撞防護能力的檢驗標準。於分析時所使用之腿部衝擊器乃採

用符合 ACEA[1]內之檢驗規定(Calibration test)之腿部下肢衝擊器(Lower Leg Form Impactor)。於分析時將使用該衝擊器根據法規內之規定包含測試區域、撞擊速度、撞擊角度等等進行相關之分析。

4. 目標車腿部撞擊原況分析結果討論

根據第一階段法規之要求，下肢衝擊器應撞擊保桿三處位置，並最少相距 132mm 以上，撞擊速度為 11.1 m/s。本文中選定兩處之撞擊位置如表 2 及圖 2 之描述。

表 2 下肢衝擊器撞擊點位置敘述

點位	位置描述
A	保桿中央
B	保桿中央往右 450mm

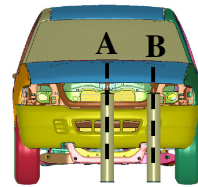


圖 2 A、B 二點撞擊位置示意圖

各點位撞擊結果峰值可參考表 3，由該表的分析結果可得知不論是 A 點或 B 點，根據目前之模擬分析結果均無法通過歐盟第一階段法規的要求。將於後續繼續進行此目標車腿部撞擊之靈敏度分析及相關改進之研究討論。

表 3 撞擊結果峰值摘要

點位	彎曲角度	最大剪切位移	加速度
歐盟第一階段法規標準值	21 °	6mm	200g
A	31.9 °	8.0mm	348g
B	27.7 °	8.7mm	560g

5. 下肢撞擊靈敏度分析規劃

以目前原況車之分析為基礎，腿部無法通過歐盟第一階段法規，故選擇以原況車之保桿系統為靈敏度研究之目標對象。經過觀察，該車保桿樑(bumper beam)和外部塑料(fascia)之間之淨距僅 5.2mm，研判以此狀態絕對無(泡材)foam 可安置之空間，而此設計為分析原況車後所發現無法通過法規要求之重要原因之一。

圖 3 為行人碰撞下肢衝擊器以法規速度 11.1m/s，撞擊保桿中央示意圖。為了清楚觀察撞擊現象特將車頭前方外部塑料拿掉，由該圖可得知於初始撞擊時，撞擊點主要為 Point A 及 Point B 兩點，A 點前方為一較軟的泡材材料，B 點前方為保桿樑。

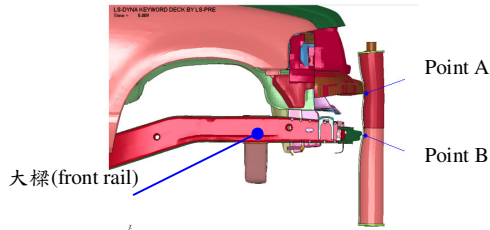


圖 3 下肢衝擊器撞擊保桿中央示意圖

由圖 3 之撞擊示意圖可理解該款式休旅車於行人下肢碰撞時基本上顯示主要傳力位置(load path)為上(Point A)下(Point B)兩處，而此特性將為後續進行研究改良該車之一重要參考依據。圖 4 為參考原況車之各重要特性所規劃出之各特性參數(X_1, \dots, X_7)及建構之 FE 示意圖，而為求簡化分析起見于分析時暫不將外部塑膠(fascia)納入分析。表 4 為 $X_1 \sim X_7$ 各參數變動範圍整理。

表 4 $X_1 \sim X_7$ 各參數變動範圍整理

mm	範圍		Baseline
X_1	0	15	5
X_2	400	500	475
X_3	40	70	50
X_4	85	135	120
X_5	30	60	50
X_6	40	60	50
X_7	250	300	275

6. 下肢感度分析結果

本文採用 Hyper study 軟體內所提供設計實驗(DOE)的方式，配合第 5 節所訂定之 X_1 至 X_7 參數進行修旅車行人下肢之感度分析。表 5 為使用該模式減因數法(Fractional Factorial)2 階層(2 level)的方式，8 組(L8)設計實驗各參數值及分析所得之三組下肢撞擊反應特性指標之結果整理。圖 5~7 為加速度、剪切位移、彎曲角度感度分析方差圖(Anova)。由分析結果可得知：

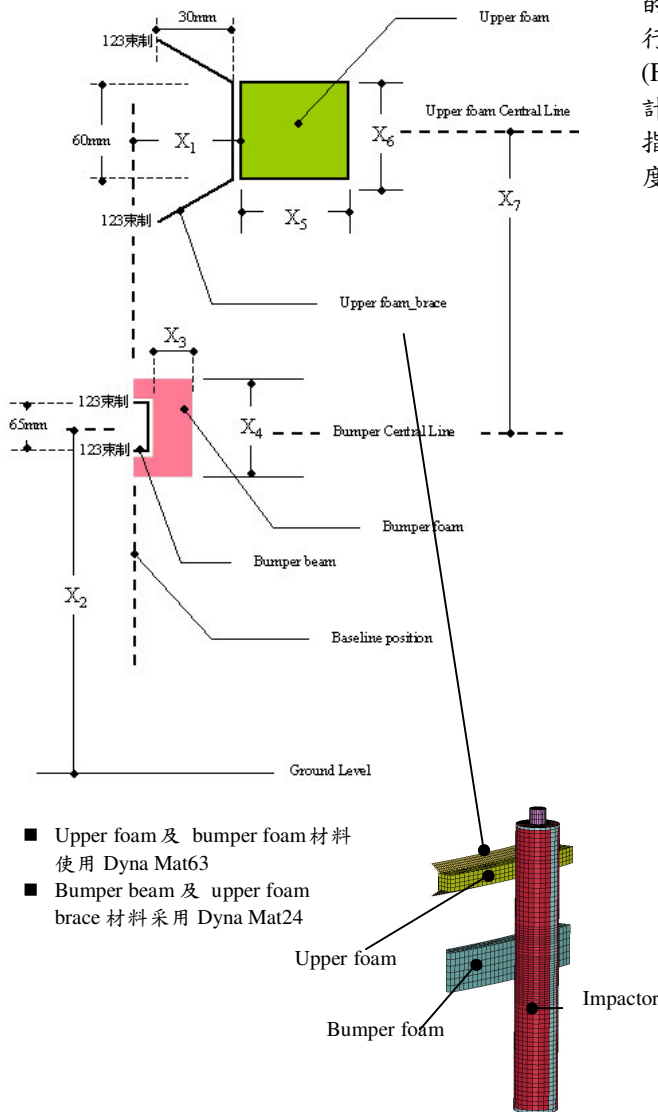


圖 4 下肢撞擊分析各特性參數及建構之 FE 模型示意圖

- 由圖 5 知， X_1 至 X_7 各參數中對加速度之感度最大之參數為 X_3 ，即為保桿樑前之泡材厚度，其厚度增加對於衝擊器之加速度值最有抑制效果。
- 由圖 6 知， X_1 至 X_7 各參數中對剪切位移之感度最大之參數為 X_2 ，即為保桿樑中央離地之高度；當保桿樑離地越遠時對於衝擊器之剪切位移值降幅最大。
- 由圖 7 知， X_1 至 X_7 各參數中對彎曲角度之感度最大之參數為 X_2 及 X_7 ，即為保桿樑中央離地之高度及保桿樑中心至 upper foam 中心之距離，當 X_2 增加保桿樑離地越遠時，此時衝擊器之彎曲角度反而變大；當 X_7 增加保桿樑中心至 upper foam 中心之距離時增加時，此時衝擊器之彎曲角度降低。
- 於感度分析時曾經另外進行減因數(Fractional)三階層(3 levels)分析(L27，參考表 6)，但發現主要趨勢仍然維持不變，不影響最終之結果。
- 以上之分析結果可作為後續優化設計之依據。

表 5 DOE 設計實驗及其分析結果摘要

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	A ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	B ⁽³⁾
1	0	400	40	85	60	60	300	293	3.6	16.5
2	0	400	70	135	30	40	300	210	5.3	15.4
3	0	500	40	135	30	60	250	253	1.8	25.6
4	0	500	70	85	60	40	250	203	1.8	25.6
5	15	400	40	135	60	40	250	234	4.4	20.2
6	15	400	70	85	30	60	250	241	3.8	20.4
7	15	500	40	85	30	40	300	275	0.9	19.2
8	15	500	70	135	60	60	300	245	1.0	17.2

(1)加速度(g);(2)剪切位移(mm);(3)彎曲角度(度)

表 6 L27 組之各參數整理表

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	A ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	B ⁽³⁾
1	0	400	40	85	30	40	250	280	4.5	14.8
2	0	400	55	110	45	50	275	231	4.1	12.1
3	0	400	70	135	60	60	300	213	4.6	9.7
4	0	450	40	110	60	60	300	247	4.7	16.0
5	0	450	55	135	30	40	250	229	4.3	23.7
6	0	450	70	85	45	50	275	206	4.3	20.7
7	0	500	40	135	45	50	275	243	1.7	24.2
8	0	500	55	85	60	60	300	227	1.2	20.4
9	0	500	70	110	30	40	250	221	2.0	29.3
10	7.5	400	40	135	60	50	250	248	3.3	13.3
11	7.5	400	55	85	30	60	275	259	3.5	11.4
12	7.5	400	70	110	45	40	300	214	4.6	10.3
13	7.5	450	40	85	45	40	300	248	5.3	17.3
14	7.5	450	55	110	60	50	250	241	3.0	21.4
15	7.5	450	70	135	30	60	275	237	4.2	21.1
16	7.5	500	40	110	30	60	275	260	1.8	23.7
17	7.5	500	55	135	45	40	300	223	1.3	23.2
18	7.5	500	70	85	60	50	250	221	2.2	25.7
19	15	400	40	110	45	60	250	263	3.5	13.3
20	15	400	55	135	60	40	275	222	3.9	11.2
21	15	400	70	85	30	50	300	204	4.0	9.1
22	15	450	40	135	30	50	300	234	4.5	17.2
23	15	450	55	85	45	60	250	239	2.8	20.8
24	15	450	70	110	60	40	275	210	3.9	19.4
25	15	500	40	85	60	40	275	228	1.9	21.3
26	15	500	55	110	30	50	300	233	1.3	21.9
27	15	500	70	135	45	60	250	246	2.8	26.2

(1)加速度(g);(2)剪切位移(mm);(3)彎曲角度(度)

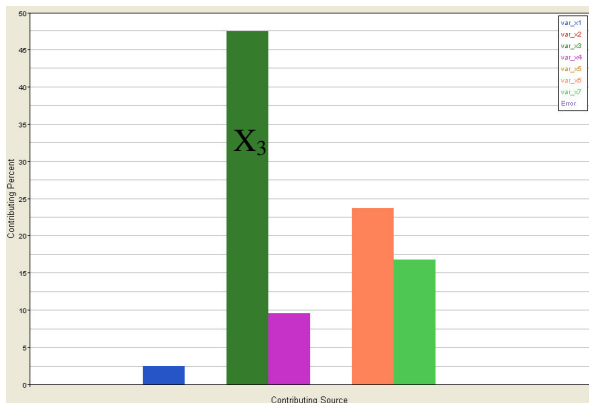


圖 5 加速度反應方差圖整理

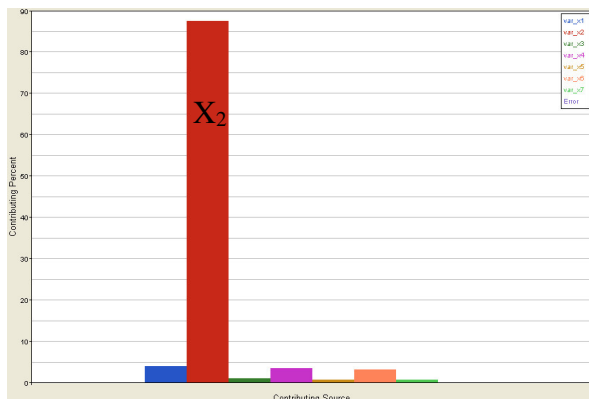


圖 6 剪切位移反應方差圖整理

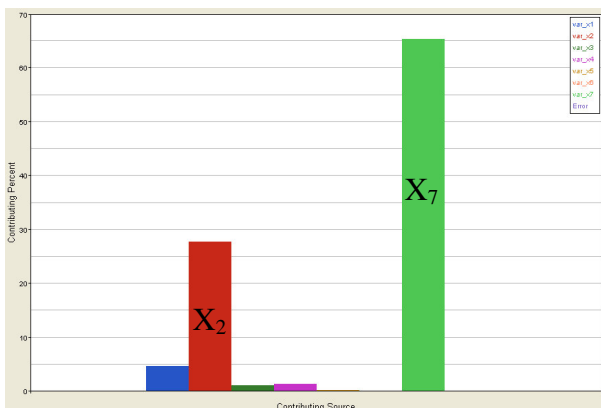


圖 7 彎曲角度反應方差圖整理

7. 下肢撞擊優化分析

由第 6 節的靈敏度分析可得知 X₁~X₇ 參數何者對於三項反應有最大之感度，下一步將為嘗試使用 Hyperstudy 內之優化分析功能，根據對於反應值(response)設定限制(constraint)及目標(objective)的方式可得到系統反應之最佳反應值。

為了獲得較有參考性之迴歸結果(regression)，本文將利用如第 6 節中，表 6 所示 L27 組之各特性反應，作為下肢參數優化的依據；由分析顯示使用最小平方方法(Least square regression)所得之迴歸結果，加速度之 R²=0.8199、剪切位移之 R²=0.8969、彎曲角度之 R²=0.9966，均能滿足工程上迴歸精度之要求，故目前使用此 L27 組作為求取下肢參數優化的依據。

於優化設定使用歐規第一階段之下肢撞擊法規門檻值作為優化設計之參考依據，於設定上採用：

- 約束(Constraint)條件:
 - 剪切位移 < 6 mm
 - 彎曲角度 < 21 度
- 目標(Objective)條件:
 - 加速度值(g): 最小化(Minimize)

以作為分析優化之設定，而經 25 次疊代，圖 8~10 為加速度、剪切位移、彎曲角度之最佳參數結果示意圖；而表 7 為 25 次疊代之結果整理。由圖 8~10 及表 7 之結果發現經 25 次疊代，其結果基本上已經收斂，且發現其收斂之各反應已經能滿足歐規行人碰撞第一階段之要求。另比較第 5 節中表 4 中 baseline 組(表 7 中第 1 組)和表 7 經 25 次改善後各特性反應變化(表 7 中第 25 組)；根據分析結果(表 8)，可得知加速度大約改善 16.5%、剪切位移改善-53.6%，而彎曲角度大約改善 10.4%；其中剪切位移雖然增加，但仍小於法規值(6mm)，故其結果仍可接受。

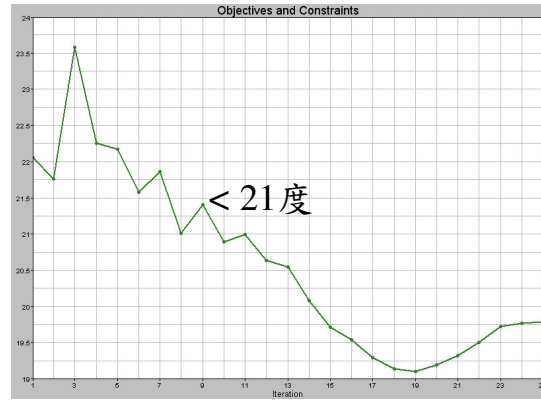


圖 10. 25 次彎曲角度疊代結果

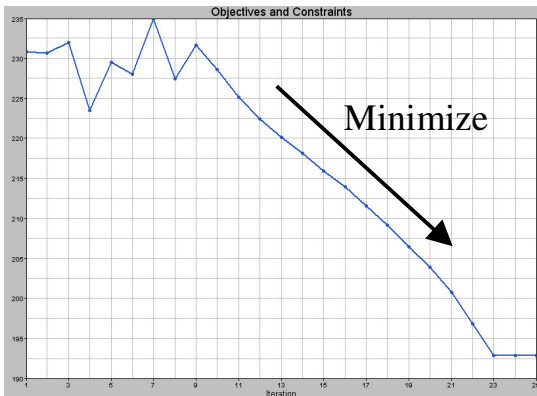


圖 8. 25 次加速度疊代結果

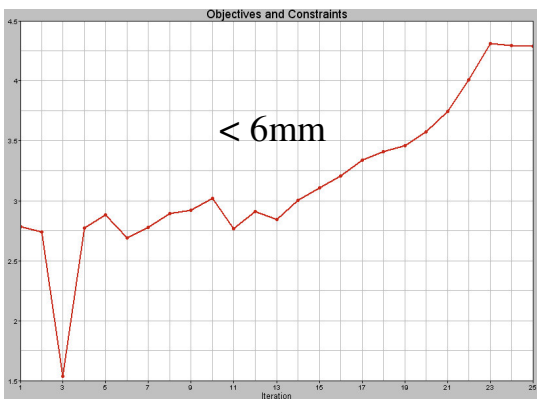


圖 9. 25 次剪切位移疊代結果

表 7 以 Hyper study 經 25 次非線性疊代結果

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	A ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	B ⁽³⁾
1	5.0	475	50	120	50	50	270	231	2.8	22.1
2	8.3	475	50	120	50	50	275	231	2.7	21.8
3	5.0	497	50	120	50	50	275	232	1.5	23.6
4	5.0	475	57	120	50	50	275	223	2.8	22.3
5	5.0	475	50	131	50	50	275	229	2.9	22.2
6	5.0	475	50	120	57	50	275	228	2.7	21.6
7	5.0	475	50	120	50	54	275	235	2.8	21.9
8	5.0	475	50	120	50	50	286	227	2.9	21.0
9	5.5	472	49	119	51	51	277	232	2.9	21.4
10	6.0	470	50	119	52	50	280	229	3.0	20.9
11	5.6	478	51	121	51	49	287	225	2.8	21.0
12	5.0	476	52	122	52	48	292	222	2.9	20.6
13	4.6	478	53	121	53	47	295	220	2.8	20.5
14	5.0	476	54	122	54	46	299	218	3.0	20.1
15	4.5	473	55	123	55	47	300	216	3.1	19.7
16	4.0	471	56	124	56	47	300	214	3.2	19.5
17	3.5	468	57	125	57	47	300	212	3.3	19.3
18	3.0	467	58	126	59	47	300	209	3.4	19.1
19	2.4	467	60	127	60	47	300	206	3.5	19.1
20	1.9	466	62	128	60	47	300	204	3.6	19.2
21	1.4	466	64	130	60	47	300	201	3.7	19.3
22	0.7	466	67	132	60	47	300	197	4.0	19.5
23	0.0	466	70	135	60	47	300	193	4.3	19.7
24	0.0	467	70	135	60	47	300	193	4.3	19.8
25	0.0	467	70	135	60	47	300	193	4.3	19.8
								Minimize	<6mm	<21度

(1) 加速度(g); (2) 剪切位移(mm); (3) 彎曲角度(度)

表 8 改善效益比較

mm	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	A ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	B ⁽³⁾
Base-line	5	475	50	120	50	50	275	236	1.7	23.5
優化結果	0	467	70	135	60	47	300	193	4.3	19.8

(1)加速度(g);(2)剪切位移(mm);(3)彎曲角度(度)

8. 結論

由本文之分析針對 Ford Explorer 休旅車之分析模式可得以下數點結論

1. 由 Ford Explorer 之下肢行人碰撞分析可得知，由於原況車型其保桿樑前欠缺泡材材料，故對於行人下肢將造成極大之不利影響，使得其無法通過歐規第一階段行人碰撞法規之要求。
2. 而基於此因素，於本文中嘗試將車前結構(car frontal)之各重要影響參數，以 DOE 設計實驗的方式，得到對於行人碰撞下肢三項反應感度最大之數項參數，而此參數的發現將對於後續之優化作業有大的幫助。
3. 針對所決定之 X₁~X₇ 參數先以非線性迴歸分析的方式，找出此三項反應之近似影響面，後續再根據此非線性迴歸分析的結果進行 25 次疊代分析，最終獲得 X₁~X₇ 各設計參數最佳化設計值，並通過歐規第一階段行人碰撞法規之要求。初步判斷此法可進行休旅車行人碰撞下肢之優化改良。
4. 未來將規劃進一步利用第 6 節感度分析的結果，針對加速度、剪切位移、彎曲角度進行諸如劃分更多階層、調整其他感度較不大之設計參數等作法，以確定是否有可能獲得更好的優化分析結果。
5. 針對更為嚴苛之歐規第二階段法規，研究該款車型是否能經優化設計而能通過法規要求。

9. 參考文獻

- [1] ACEA Voluntary Agreement Annexes I-IV06-09-2002
- [2] EEVC Working Group 10 Report –Proposals for methods to evaluate pedestrian, 1994
- [3] EEVC Working Group 17 Report “Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars” December 1998 with 2002 Updates
- [4] Stephen Schuler, Frank Mooijman, Alok Nanda and Gopi Surisetty, Improved Energy Absorber and vehicle Design Strategies for Pedestrian Protection, SAE International, 2005-01-1872, 2005
- [5] Emmanuel Glasson, Valerie Maistre and Claude Laurent, Regarding Pedestrian Protection and other Mechanical Constraints, SAE International, 2001-01-0761, 2005

Optimization and Sensitivity Analysis of Pedestrian leg form impact protection of Sport Utility Vehicle

W-C Huang W-L Yang W-G Lai

CAE Section, Vehicle Safety Department
Automotive Research & Testing Center

Abstract

Most often discussion in previous papers of pedestrian impact protection analysis is given to and focuses on modification or design guidelines of sedan, and those for sport utility vehicles are relatively less compared. A Ford Explorer (SUV) FE model will be analyzed based on first phase EU regulation (2003/102/EC), after which a sensitivity analysis of leg form to car frontal impact study will be conducted. The analysis result derived from the thesis is expected to provide a useful reference for future vehicle design.

Keywords: Pedestrian protection, sensitivity analysis, optimization, SUV