

貨卡車在不同速度下正面撞擊剛性牆之動態反應分析

王紀瑞¹ 何奇洲² 陳德煒^{3*} 閻建政⁴

¹ 建國科技大學自動化工程系暨機電光系統研究所

² 建國科技大學機械工程系暨製造科技研究所

³ 國防大學理工學院動力及系統工程系

⁴ 銘傳大學商品設計學系

摘 要

本文使用HYPERMESH/LS-DYNA有限元素法分析軟體，針對貨卡車以時速48、52、56、60公里，4種不同速度對一剛性牆執行撞擊分析，進而對貨卡車車架的主要結構所產生的變化情形及安全性加以探討及研究。本文針對貨卡車架結構在不同速度下正面撞擊之變化情形，分析結果顯示車體乘員空間未有嚴重變形，初步可滿足美國 FMVSS 208、歐洲ECE R 94及日本 TRIAS 74等法規設計需求，證明本研究車體設計的完整性，本文結果可提供相關設計人員車體開發設計之參考依據。

關鍵字：剛性牆，撞擊分析，有限元素法

Dynamic Reaction Analysis of Delivery Truck Hitting Rigid Wall Directly at Different Speed

Jee-Ray Wang¹, Ho-Chi Chou², Der-Wei Chen^{3*}, and Chien-Cheng Yen⁴

¹Department of Automation Engineering & Institute of Mechatronic Systems, Chienkuo Technology University

²Department of Mechanical Engineering & Graduate Institute of Manufacturing Technology, Chienkuo Technology University

³Department of Power Vehicle and Systems Engineering, National Defense University

⁴Department of Product Design, Ming Chuan University

ABSTRACT

The purpose of this study is using HYPERMESH/LS-DYNA finite element analysis to analyze cargo trucks with speeds of 48, 52, 56, 60 kilometer per hour impacting on a rigid wall as well as to investigate the vehicle structure deformation and safety upon impact. Truck structure after impact at different speeds is analyzed and compared with further analytical CAE computer program showed no serious passenger compartment deformation. The result meets US FMVSS208, EU ECER84, and Japan's TRIAS74 design regulations. It shows that vehicle integrity is intact and results can be used as a reference for vehicle design and development.

Keywords: rigid wall, striking analysis, finite element methods

文稿收件日期 98.08.06; 文稿修正後接受日期 98.12.03; *通訊作者

Manuscript received August 6, 2009; revised December 3, 2009; * Corresponding author

一、前言

現代人有賴於車輛所帶來的便利性，因此車輛已成為人們生活的一部分；但是也由於車輛普及率及使用率提高，相對道路發生車禍事故的機率也提高。依據內政部警政署民國 97 年的統計資料[1]，警察機關受理的車禍事故共有 166,288 件，其中死亡佔 2,224 人，受傷佔 220,346 人，由此可知車禍事故對人類生命安全造成嚴重的危害。

經歐洲歷年的銷售統計，傳統屬於商用車領域的貨卡車，銷售比例有逐年成長的現象，2007 年貨卡車在歐洲市場的全年銷售，比起 2006 年成長 7.2%，甚至部份新加入歐盟的東歐國家，貨卡車的成長幅度更達到 24.7%；同時，貨卡車也不若以往僅限於商用功能，已有逐步開拓家庭用車的趨勢。因此，考量汽車消費者安全把關的立場，Euro NCAP(European New Car Assessment Program，歐洲新車評估計畫)特別表示決定 2008 年將新車撞擊測試對象拓展至貨卡車 [2]。

歐美日等先進國家皆有成立實車碰撞實驗室進行實車碰撞試驗以增加車輛的安全，但因實驗成本過高且費時，測試後之實車亦無法重複使用。因此，隨著電腦輔助工程分析軟體之快速發展，利用電腦強大的分析計算能力，可輔助車輛在開發過程中車體結構之相關物理及結構特性分析，降低因設計錯誤而重複修改模型的時間，並可藉以觀察出實車測試時所難以觀測到之變化。

近年來有限元素法已被廣泛用於工程問題的模擬分析上。包括汽車撞擊、掉落與撞擊測試、鈹金成型、飛彈爆炸、飛鳥撞擊葉片、生物力學等問題。目前市面上開發出許多商業模擬應用軟體，例如：HyperMesh、ANSYS、FEMB28、LS-DYNA 2D、LS-DYNA 3D、AUTO-DYN 及 ABAQUS 等軟體，可依據模擬所需特性挑選不同之模擬軟體。由於軟體功能發展迅速，提供了撞擊破壞分析模式的另一個模擬分析方向，有別於以往除了實際實驗量測外，提供了另一個研究比對的途徑。

Altair 公司[3]研發的 HyperMesh 可以快速地完成有限元素前處理任務，並可將幾何模型檔案完整讀取，進行有限元素的網格劃分及檢查，HyperMesh 可支援 LS-DYNA、ABAQUS、ANSYS、NASTRAN 及 MARC 等軟體之前後處理。HyperMesh 之優點在於圖形的編輯(旋轉、放大、縮小)容易，可自動化建立網格(Automesh)，但指令位置較為零散，所以使用者必須稍加練習方能上手，本文中軟體使用的單位為：質量:ton、長度:mm、時間: μ s、力量:N、應力:Mpa。

LS-DYNA 是在 1976 年由 J.O.Hallquist 博士於 Lawrence Livermore National Lab.開發之結構分析軟體稱為 DYNA3D，其後自行創立 LSTC 公司(1988)[4]，持續軟體開發並正式訂名為 LS-DYNA。LS-DYNA 採用 Lagrangian 理論為其基礎架構的有限元素模擬軟體，可針對主要質點加以紀錄分析，該軟體採用顯性演算法(Explicit Method)，而大多數的有限元素分析軟體是以隱性演算法(Implicit Method)計算。

隱性演算法對於短時間、大變形、非線性的物理行為，尤其是在落錘撞擊試驗及撞擊貫穿方面，在分析上將會耗費大量電腦資源及時間；而顯性演算法(Explicit Method)在分析上有極佳準確性的運算方式來處理相關短時間撞擊的問題，並可節省大量的運算時間達到最經濟及快速的目標。

整個 LS-DYNA 的架構區分為三大部分，前處理器(Pre-Process)、核心運算器(Solver)及後處理(Post-process)如圖 1 所示。

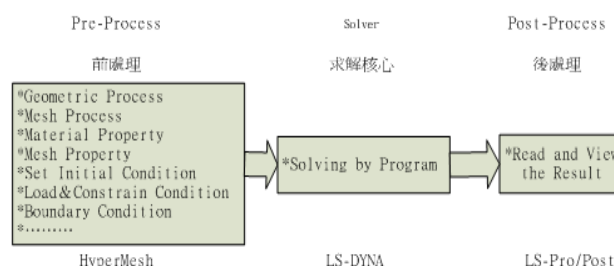


圖 1. LS-DYNA 架構圖。

LS-DYNA 程式是功能齊全的幾何非線性 (大位移、大轉動和大應變)、材料非線性 (140 多種材料動態模型) 和接觸非線性 (50 多種) 程式。它以 Lagrangian 演算法為主，兼有 ALE 和 Euler 演算法；以顯式求解為主，兼有隱式求解功能；以結構分析為主，兼有熱分析、流體-結構耦合功能；以非線性動力分析為主，兼有靜力分析

功能（如動力分析前的預應力計算和薄板衝壓成型後的回彈計算），故數值模擬軟體 LS-DYNA 具有最豐富的材料模式，目前已廣泛地應用於全球工業界包含電子產品結構分析、航太工業、汽車工業、生醫力學、土木建築結構、鈹金成型等。

核心運算器主要是負責前處理完成模型相關設定後進行運算分析並輸出其結果；後處理器係負責將結果匯入即可觀察一物件的運動行為，並可依材料、節點、元素顯示速度、應力、應變、位移、歷程時間等資訊分析，透過顏色的分布可清楚地呈現各種物理量的大小變化。因此，可透過模擬分析將貨卡車撞擊剛性牆時的破壞過程及變化呈現，更可將車體結構件受力時的應力與應變以顏色圖形或圖表完整呈現。數值模擬分析流程如圖 2 所示。

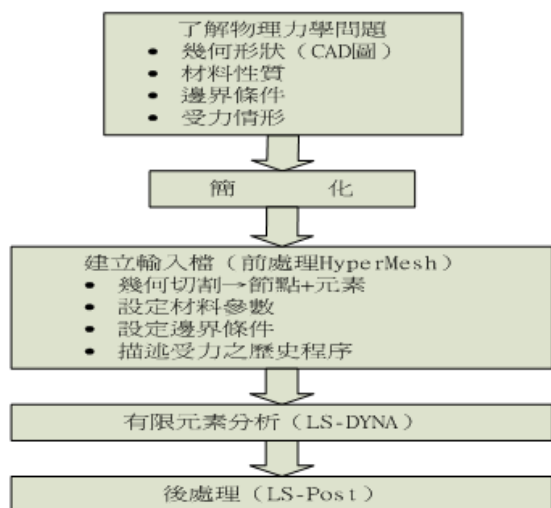


圖 2. 數值模擬分析流程圖。

在數值模擬方面研究重點為車體各部位結構之變形與能量吸收、乘客室加速度及人體損傷等較重要文獻計有：1977 年 David[5]以極限分析(limite analysis)原理為基礎，評估車身因前撞所產生的極限負載傳遞現象及崩潰摺疊行為，並對受撞擊後之車身結構做重複探討，找出導致車身摺疊行為的最小負載，此法提供簡易直接之方法使工程師能輕易的評估設計及改變對車身摺疊強度之影響。

1984 年 Parviz 等[6]應用塑性鉸理論(plastic hinge theory)，探討車輛結構撞擊與崩潰摺疊行為，首先針對塑性鉸理論與技

術進行研究，再以簡易扭力盒模型進行分析，最後再進行車架之前端側樑結構撞擊分析，進而比對實驗與使用 UMVCS 與 DADS-3D 之數值模擬結果，探討結構變形情形。

2000 年江國寧等[7]與裕隆汽車合作，應用非線性有限元素分析軟體 LS-DYNA3D 進行汽車正面碰撞模擬，此研究主要在觀察車子受撞擊時車體變形與能量吸收之狀態，並比較實車與數值模擬之結果，顯示汽車結構受力與能量吸收狀況已完全符合美國汽車安全法規之規範，裕隆汽車將此分析結果應用於新車種“精兵”設計時之參考。

本文針對車體結構的全車撞擊測試之前撞，將美國、歐洲、及日本之相關法規做一探討與整理，並在法規規範的撞擊速度範圍內做貨卡車在不同速度下正面撞擊剛性牆之反應分析與研究。

一、美國 FMVSS 208 法規[8]

前撞測試：測試車沒有規定，測試車以 48.3km/hr 垂直撞擊一固定牆，或測試車與固定壁夾 30 度之內以 48.3km/hr 撞擊固定牆，固定壁之限制條件並無特定規定。

二、歐洲 ECE R 94 法規[9]

前撞測試：以速度 56km/hr 垂直撞擊一固定壁，測試面積必須足以容納軌道、固定壁、測試所需的裝置，軌道最後部分(最少於固定壁前 5m)必須是水平、平坦、光滑的。固定壁的質量不可低於 70 噸。

三、日本 TRIAS 47 法規[10]

前撞測試：測試車以 4.9m/s(0.5G)以下之加速度，垂直正面撞擊固定壁，撞擊速度為 50±2 km，撞擊時車輛中心面與固定壁中心面間隔需在 300mm 以下，固定壁高 1.5m 以上，寬 3m 以上，並與測試車加速跑道垂直，測試車加速跑道需乾燥水平，固定壁衝擊面需附以夾板，其厚度為 20±2mm。

二、模型建構

本研究是針對貨卡車架結構在不同速度下正面撞擊之動態反應分析，經由貨卡車車架結構於各種速度撞擊後之車架變形、應力應變分析、能量吸收，及速度與加速度時間歷程來評估貨卡車車體結構之防護能力，以為貨卡車安全防護設計之參考。貨卡車車體有限元素模型如圖 3~5 所示。



圖 3. 貨卡車車體有限元素模型-側視圖。



圖 4. 貨卡車車體有限元素模型-下視圖。



圖 5. 貨卡車車體有限元素模型-正視圖。

為使模擬能更加接近實際情形，更將引擎室各部品詳細的建入分析的模型中如圖 6。

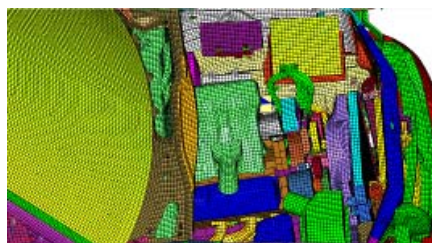


圖 6. 貨卡車引擎室零件有限元素圖。

在網格劃分部份，因為網格的粗細是主要控制時間增量的主要因素，分析模型會以網格元素的大小計算分析運算時間並以最小網格的時間增量做為分析運算的時間控制，且網格品質太差除了會使變形量過大或嚴重扭曲，還會造成數值誤差或是負體積極不穩定外，並使得分析程式計算因為時間增量過小而造成無法計算，最後造成分析程式發生數值錯誤而終止分析運算，為節省及縮短分析運算時間，所以整個模型的大部分零件均用殼元素來進行模型的建構，網格進行劃分後共計有 567,688 個節點與 523,901 個殼元素，在分析模型材

質的設定如下表 1 所示：

表 1. 貨卡車各部位材質說明

	骨架部份	車殼部份	玻璃部份
密度(kg/mm^3)	7.89e-09	7.89e-09	2.5e-9
楊氏係數(MPa)	210,000	210,000	76,000
蒲松比	0.3	0.3	0.3
降伏強度(MPa)	400	200	138

分析衝擊問題的計算速度及準確度，主要取決於如何有效取得波傳效應並進行非線性分析。所謂波傳效應是指結構受衝擊後，各物理量(如應變、應力、動能、應變能...等)在結構上傳遞的現象。以下說明顯性演算法在衝擊問題中展現的優越性及必要性：

- (1) 對動力運動方程式如(1)式作逐步積分時，為了正確的取得波傳效應， Δt (積分時間步長)將受控於波傳速度和元素大小如(2)式。

$$M \ddot{U}(t) + C \dot{U}(t) + R(t) = P(t) \quad (1)$$

其中 M, C 分別為系統質量及阻尼。

$\ddot{U}(t), \dot{U}(t), R(t)$, 為加速度、速度及恢復力。

$$\Delta t < \frac{L_e}{c} \quad (2)$$

其中 L_e 為元素節點間最短的距離, C 為波傳速度。而外顯示演算法須滿足穩定性的要求，其穩定條件如(3)式。

$$\Delta t < \frac{2}{\omega_n} \quad (3)$$

其中 ω_n 為系統的最大自然頻率。當 Δt 滿足於波傳效應時，已可達到穩定的條件，所以在外顯示演算法中，可同時滿足波傳效應及穩定，較為經濟。

- (2) 外顯示演算法在逐步積分的過程中，無須重複建立系統勁度矩陣，可快速求解每一步之積分方程式。
- (3) 外顯示演算法處理非線性的問題時，不會產生線性化誤差，故可輕易的解決幾何非線性及材料非線性的問題。
- (4) 外顯示演算法不會因邊界條件不穩定而產生無法計算的問題。

本文使用有限元素分析前處理 HyperMesh，進行模型建構、mesh、nonreflect 邊界及邊界條件之設定。在 mesh 的過程中，需設定相關參數(如材料性質、斷面特性等；不同的分析軟體其設定

的語法皆不一樣，所以在前處理中需先設定對應於分析軟體之模組，本研究採用之分析軟體 LS-DYNA)。

首先我們必須了解前處理過程中，一個很重要的觀念：圖層，圖層的目的在於有效地組織結構中複雜的元件特性(諸如：材料、斷面性質與幾何形狀等)，依據不同的特性，我們將這些元件放置在不同的圖層內。在 HyperMesh 中定義為 Component；而在 LS-DYNA 中為 PART 之觀念。因此我們分別將貨卡車車體結構的網格分別建立在不同的 PART 中。

在選用何種描述方法方面，Debra A. S., Allen C. J. O. 和 John O. H. 於 1990 年所發表的論文中提到，Lagrange 的描述方法雖然會因高速撞擊產生網格嚴重扭轉而使得所求出結果正確性降低，但是相較於 Euler 的描述方法，Lagrange 的描述方法具有撞擊物（疊層板）間網格可以明顯區分、需較少計算記憶體、需較少計算時間等好處 [11]。所以很多模擬車體碰撞時工程師選擇 Lagrange 為其主要的描述方法。在本研究的描述方法方面，也將採用 Lagrange 為貨卡車撞擊模擬的描述方法。

邊界條件的設定在使分析模型於分析過程中能夠實際反應所受到外在因素影響 [12、13]，故給定正確的邊界條件是相當重要的，本研究採用數值模擬的邊界條件為 automatic single surface，此種邊界設定可以自行判定在分析過程中各零件部件的接觸碰撞方式，以避免因貨卡車零件部件眾多而在設定時多餘或錯誤的設定，而造成電腦運算分析時產生錯誤，減少電腦資源的浪費，且讓程式不會產生錯誤可以繼續執行。

撞擊之剛性牆及地面採用剛性牆(rigid wall)進行建構，以兩節點方式設定剛性牆及法向量，第一個節點為剛性牆之面，第二個節點為剛性牆之法向量方向如圖 7 所示。

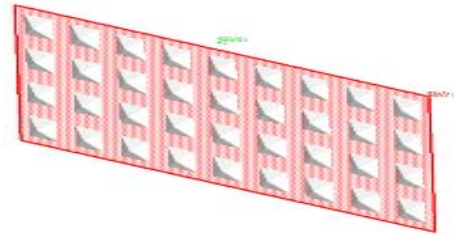


圖 7. 剛性牆之設定。

為方便設定貨卡車的速度，將貨卡車所有零件部品，以指令 SET_PART_LISTR 建立，設定名稱為 INITIAL_VELOCITY 之群組。再以指令 INITIAL_VELOCITY_GENERATION 施以速度於零件上，分別設定其速度大小為 48、52、56、60km/hr，方向為正x軸向（向前）。

至此，我們已完成了貨卡車在不同速度下正面撞擊分析之前處理的步驟，現在只要將不同速度的分析模型分別輸出成 LS-DYNA 可讀之 K 檔案即如圖 8 所示。

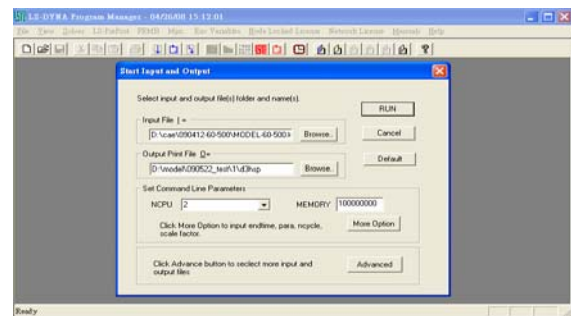


圖 8. LS-DYNA 運算介面。

三、結果與討論

本研究是利用 HyperMesh/LS-DYNA 針對貨卡車架結構在不同速度下正面撞擊之動態反應分析，探討在相同的條件設定之下，貨卡車以不同速度撞及剛性牆時對車體結構所造成之引響比較，進而瞭解在電腦輔助工程(CAE)分析過程中貨卡車架結構在不同速度下正面撞擊之變化情形是否合理。

以下是針對 LS-DYNA 分析貨卡車架結構在不同速度下正面撞擊之動態反應分析的側面及剖面分析結果呈現：圖 9 至 41 為貨卡車架結構材料性質如表 1 所示，分別在時速 48、52、56、60 公里時間的動態結果顯示，並搭配表 2 分析歷時過程中應力變化，可以明顯的看出貨卡車架結構前段的潰縮區已有明顯產生變形，且經由剖面圖可以看出車架結構潰縮的部份並沒有侵入到

乘客生存空間的範圍，此種車架結構設計可以符合美國 FMVSS 208、歐洲 ECE R 94 及日本 TRIAS 47 法規中對於車架結構在測試過程中不可有侵入乘員生存空間的規定，而在分析過程中車門結構處也沒有嚴重變形的現象產生，則可以符合在測試後車門要可以開啟的規定，成員生存空間及潰縮區範圍如圖 9 所示。

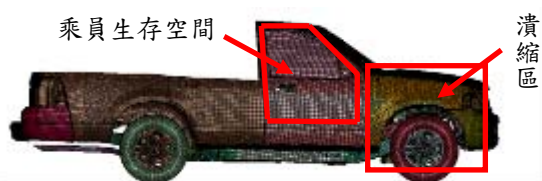


圖 9. 貨卡車架結構在 48km/hr 之變化—0 毫秒。



圖 10. 貨卡車架結構在 48km/hr 之變化—50 毫秒。



圖 11. 貨卡車架剖面在 48km/hr 之變化—50 毫秒。



圖 12. 貨卡車架結構在 48km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 13. 貨卡車架剖面在 48km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 14. 貨卡車架結構在 48km/hr 之變化—90 毫秒。



圖 15. 貨卡車架剖面在 48km/hr 之變化—90 毫秒。



圖 16. 貨卡車架結構在 48km/hr 之變化—110 毫秒。



圖 17. 貨卡車架剖面在 48km/hr 之變化—110 毫秒。



圖 18. 貨卡車架結構在 52km/hr 之變化—50 毫秒。



圖 19. 貨卡車架剖面在 52km/hr 之變化—50 毫秒。



圖 20. 貨卡車架結構在 52km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 21. 貨卡車架剖面在 52km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 22. 貨卡車架結構在 52km/hr 之變化—90 毫秒。



圖 23. 貨卡車架剖面在 52km/hr 之變化—90 毫秒。

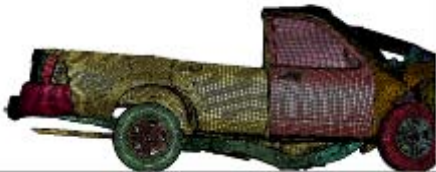


圖 24. 貨卡車架結構在 52km/hr 之變化—110 毫秒。



圖 25. 貨卡車架剖面在 52km/hr 之變化—110 毫秒。



圖 26. 貨卡車架結構在 56km/hr 之變化—50 毫秒。



圖 27. 貨卡車架剖面在 56km/hr 之變化—50 毫秒。

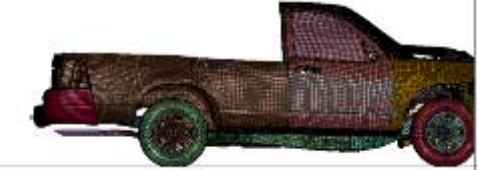


圖 28. 貨卡車架結構在 56km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 29. 貨卡車架剖面在 56km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 30. 貨卡車架結構在 56km/hr 之變化—90 毫秒。



圖 31. 貨卡車架剖面在 56km/hr 之變化—90 毫秒。



圖 32. 貨卡車架結構在 56km/hr 之變化—110 毫秒。



圖 33. 貨卡車架剖面在 56km/hr 之變化—110 毫秒。



圖 34. 貨卡車架結構在 60km/hr 之變化—50 毫秒。



圖 35. 貨卡車架剖面在 60km/hr 之變化—50 毫秒。



圖 36. 貨卡車架結構在 60km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 37. 貨卡車架剖面在 60km/hr 之變化—70 毫秒。



圖 38. 貨卡車架結構在 60km/hr 之變化—90 毫秒。



圖 39. 貨卡車架剖面在 60km/hr 之變化—90 毫秒。



圖 40. 貨卡車架結構在 60km/hr 之變化—110 毫秒。



圖 41. 貨卡車架剖面在 60km/hr 之變化—110 毫秒。

表 2. 貨卡車架結構撞擊過程應力值比較表

應力(MPa) \ 時間(ms)		0	50	70	90	110
		時	48(km/hr)	0	380	1293
	52(km/hr)	0	389	2033	2657	3487
	56(km/hr)	0	393	2202	3838	3497
速	60(km/hr)	0	395	2402	4620	5104

表 2 分析歷時過程中應力變化，可以明顯的看出貨卡車架結構前段的潰縮區已有明顯產生變形，且經由時間歷程越久其應力值越大，亦謂其變形量也隨時間歷程越久其變形量也越大。另由表 2 亦可看出貨卡車車時速越大其應力值也越大，所以可說貨卡車車時速越大其撞擊受到傷害也就會越大。

四、結論

本文利用 HyperMesh 與 LS-DYNA 兩種電腦輔助工程分析軟體，針對貨卡車架結構分別在 48、52、56、60 公里 4 種不同速度下正面撞擊剛性牆之動態反應分析變化的分析比較，藉由電腦輔助工程 (CAE) 軟體的動態播放功能，可以詳細的觀測出貨卡車進行分析時的結構反應。

經由貨卡車架結構在不同速度下正面撞擊之動態反應的撞擊觀察，我們可以清楚的看到不管是在何種時速下的撞擊，由於貨卡車正面撞擊，其貨卡車架結構的變形皆集中在車架結構前端，只要車架結構材料與設計可以符合美國 FMVSS 208、歐洲 ECE R 94 及日本 TRIAS 47 法規規定，就可避免撞擊後產生之撞擊應力侵入到乘員生存空間，且在車門部分也因此沒有產生非常嚴重的變形，此種設計的貨卡車結構，在乘員生存空間的保護是非常安全的且易於逃生也非常重要的。

五、致謝

感謝全興工業股份有限公司在本文研究期間提供 HyperMesh、LS-DYNA 及各項技術的支援，使本文得以順利完成。

參考文獻

- [1] <http://www.npa.gov.tw/NPAGip/wSite/lp?ctNode=11394&CtUnit=2374&BaseDSD=7&mp=1> (98 年警政統計資料)
- [2] http://auto.msn.com.tw/news_content.aspx?sn=0801010073
- [3] <http://www.altairhyperworks.com.cn>
- [4] <http://www.flotrend.com.tw/>
- [5] Chang, D. C., "A Design-Analysis Method for the frontal-Crush Strength of body structure," SAE Paper No. 770593, pp. 2177-2185, 1977.
- [6] Nikraves, P. E., and Chung, I. S., "Structural Collapse and Vehicular Crash Simulation Using A plastic Hinge Technique," Journal of Structural Mechanics, Vol. 12, No. 3, pp. 371-400, 1984.
- [7] 江國寧，徐柏林，電腦模擬全車碰撞，國家高速電腦中心，2000。
- [8] 美國 FMVSS 208 法規
- [9] 歐洲 ECE R 94 法規

- [10] 日本 TRIAS 47 法規
- [11] Debra, A. S., Allan, C. J. O., and John, O. H., "Penetration Calculation Using an Erosion Algorism in Dyna," Proceeding of 12th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas, Vol. 1, pp. 208-217, 1990.
- [12] 趙海鷗，LS-DYNA動力分析指南，兵器工業出版社，北京，2003。
- [13] 白金澤，LS-DYNA3D 理論基礎與實例分析，科學出版社，北京，2005。

王紀瑞等

貨卡車在不同速度下正面撞擊剛性牆之動態反應分析