

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 防範兒童墜落事故頭部傷害之有限元素分析(第2年) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 95-2221-E-041-002-MY2  
執行期間：96年08月01日至97年10月31日  
執行單位：嘉南藥理科技大學嬰幼兒保育系

計畫主持人：張立東

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：張德正  
博士班研究生-兼任助理人員：李國彰

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

## 防範兒童墜落事故頭部傷害之有限元素分析

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2221-E-041-002-MY2

執行期間：95年8月1日至97年7月31日

計畫主持人：張立東

協同主持人：黃才炯、劉德騏

計畫參與人員：張德正、李國彰

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學

中華民國 97 年 10 月 30 日

# 兒童墜落事故頭部傷害之有限元素分析

## The finite element analysis of head injury of children in fall accidents

張立東<sup>1</sup>、黃才炯<sup>2</sup>、張德正<sup>2</sup>、李國彰<sup>2</sup>、劉德騏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>嘉南藥理科技大學老人服務事業管理系

<sup>2</sup>國立成功大學機械工程學系

<sup>3</sup>國立中正大學機械工程學系

(計畫編號：NSC 95-2221-E-041-002-MY2)

### 一、中文摘要

墜落是兒童常發生之意外事故。墜落事故導致之傷害中頻率最高、嚴重性最大者為頭部傷害，嚴重之頭部傷害不僅造成死亡，存活者可能患有中樞神經上諸多後遺症。本研究建立一台六歲兒童人偶之有限元素模型，探討兒童墜落事故之頭部傷害問題。結果顯示：人偶墜落模型比僅使用頭型之墜落測試方式更能夠評估實際之頭部傷害風險。人偶之頭部撞擊時，頭部的壓縮變形吸收部分撞擊能量，並抑制頭部的反彈時間，造成頭部承受之最大加速度值及 HIC 值不增反降。當墜落高度提高至 90 cm 以上時，以 60° 撞擊角度之頭部受力最小，這是因為此撞擊角度分散較多的能量在側向之摩擦力之故。本研究建議：以只有頭部模型之測試標準評估鋪面材料，將可從嚴考驗鋪面之防護能力。

### Abstract

Falls are the second leading event among childhood accidents and frequently result in head injury. Severe head injury is not only a cause of death, but also a high incidence of CNS complaints in the survivals. A finite element model according to Hybrid III 6-year-old dummy was established to evaluate the mechanism of head injury in fall accident. The results showed that the dummy drop model was more realistic to evaluate the head injury risk than the shock absorption standards, in which a hemispherical headform was used instead of a dummy. The dummy head bore smaller peak acceleration and HIC values than only the headform impact. This phenomenon was due to elastic deformation of the neck, which absorbed partly impact energy and delayed the rebound time of head during impact. In the impact angle of 60°, the impact force components in the

horizontal directions extended and dissipated by friction force during head impact. This effect led the dummy head sustained the smallest impact force when the drop height above 90 cm. This finding suggested that using a headform instead of a dummy to strike the surface material would be place stricter condition for the shock absorption test.

**Keyword:** finite element analysis, head injury, fall

### 二、緣由與目的

兒童意外傷害的種類隨著國情文化、年齡層及發生地點不盡相同，但是以跌落(跌倒與墜落)最容易發生。墜落事故導致之傷害中頻率最高、嚴重性最大者為頭部傷害，嚴重之頭部傷害不但造成死亡，存活者可能造成植物人(vegetative state)、肢體失能(motion disable)、感官與語言喪失、失智症等，較輕度傷患者復原之後常伴隨頭痛(headache)、癲癇(epilepsy)、注意力損傷(impaired concentration)、學習障礙(learning difficulties)、易怒(irritability)、人格改變(personality changes)、將來之老年失智症等後遺症。

兒童墜落事故以遊戲場及居家環境為主要場所。根據美國消費產品安全委員會之研究顯示：兒童因遊戲傷害而送入醫院急診室之 205,850 案例中，墜落意外就占了 79%；因此，為避免兒童於墜落時發生頭部傷害，各國均規定於遊戲設施下方及其活動範圍內鋪設具適當防護性質之鋪面，作為撞擊時之緩衝墊料。台灣因為氣候炎熱多雨，考量材料之耐候性因素，普遍使用橡膠地墊為室內、外遊戲場地面之緩衝墊料。為了營造一安全的學習環境，歐美國家對於兒童遊戲場防護鋪面均制訂諸多檢測標準[1,2]。測試方法係使用一直徑 240 mm 之球體(鋁合金)，由高處自由落下撞擊固定在基

座上之鋪面材料，紀錄球體中心之加速度，以最大加速度值及頭部傷害指數(Head Injury Criterion; HIC) [3,4]分別小於200 G及1000為評估準據，定義出該鋪面材料之臨界高度(critical height)，即假設不使兒童發生嚴重頭部傷害之最大墜落高度。然而人體之頭部(head)、頸部(neck)及軀幹(torso)三者猶如一結構體，當頭部一旦接觸地面，隨著軀幹與地面所呈角度之變化，頭部受力必受頸部與軀幹之影響。目前之測試標準僅止於考驗鋪面材料衝擊時之力學性能，未能考量兒童頭部與軀體對於頭部撞擊之影響，實際分析頭部傷害之風險。因此，若能以兒童人偶模擬墜落之頭部撞擊，應有助於瞭解頭部傷害之風險，以及探討檢測標準之合理性。

本研究研究目的在於建立一有限元素(finite element; FE)人偶模型，模擬兒童墜落過程頭部之撞擊，探討兒童墜落事故導致頭部傷害之機轉，並運用此有限元素模型探討現有鋪面測試標準之合理性。

### 三、材料與方法

本研究採用 Hybrid III 六歲兒童人偶為藍本，建立兒童人偶之有限元素模型。為減少人體四肢於模擬過程中造成之不確定因素，研究中將四肢與軀幹合成一質量單元，因此兒童之有限元素模型分為頭、頸及軀幹等三個單元。模型之動態分析使用 LS-DYNA3D (Rev. 970; Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA) 有限元素套裝軟體。

#### (一) 頭部模型

頭部模型係根據 Hybrid III 六歲兒童人偶之頭部幾何形狀及尺寸[5]建置而成，質量為 3.5 kg。頭型外表包覆一層乙烯基人造皮層(vinyl skin)，用於模擬兒童之頭皮組織與顱骨結構之力學性質。皮層模型由 136 個八節點之六面體元素(8-node solid element)組成(圖一)，假設為具有黏彈性質(viscoelasticity)之材料，在 LS-DYNA 有限元素分析軟體中設定為 MAT\_VISCOELASTIC 材料模型；而頭骨部分則視為剛體，由 160 個元素組成。

為獲得符合人類頭皮組織之力學性質，吾人依據 FMVSS Part 572 [6]之測試規定(圖二)，建立一頭型由 37.6cm (2.71 m/s)高度掉落、撞擊平面剛砧(anvil)之有限元素模型，經由試誤法(try and error)調整皮層厚度及力學性

質，使撞擊時頭型承受之最大加速度值落於 225~275 G ( $G=9.8 \text{ m/s}^2$ )之範圍。

#### (二) 頸部模型

為簡化人偶模型，本研究將頸部簡化為外徑 60 mm、長度 100 mm 之橡膠圓柱體(50 shore hardness)，質量為 0.94 kg。頸部模型由 640 個六面體元素組成，以 MAT\_BLATZ-KO\_rubber 材料模擬其力學性質。

為模擬人體頸部之動態特性，根據美國機動車輛安全標準 part 572 的規定[6]，進行頭頸部擺錘測試模擬(圖三)，並調整頸部之力學參數，使頭頸部於彎曲(flexion)、伸展(extension)時頭部承受之加速度符合標準之規定(表一)。

#### (三) 軀幹模型

為模擬兒童軀幹於頭部撞擊時之影響，軀幹模型根據我國六歲兒童之肩寬(25.2 cm)、胸下點至背側最外緣(15.3 cm)及肚臍至胸上點(25.9 cm)之距離建置而成，並將軀幹外型簡化為橢圓柱，質量為 11 kg 之剛體(圖一)。

### 四、結果與討論

#### (一) 頭部校正

頭部模型自 37.6 cm 落下撞擊剛砧，頭部承受之加速度波形有如倒立之鐘形，以波形的峰值為分界，左右兩側波形相當對稱，此結果與實驗值相符合，惟波形持續時間較長。最大加速度值為 281 G，HIC 值為 1574；對照實驗結果(最大加速度值為 274 G、HIC 為 734)，最大加速度與 HIC 值誤差分別為 3%及 114%。HIC 指標之模擬結果與實驗值差異較大，主要原因可能在於材料模型之誤差，造成波形持續時間較長之故，又因 HIC 指標係考量加速度值之 2.5 次方及其持續時間，故誤差較大。

#### (二) 兒童人偶墜落撞擊

人偶自 37.6cm 高度墜落、撞擊剛性地面，在軀幹軸線與地面呈  $90^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 及  $30^{\circ}$ 三種墜落角度時，以  $60^{\circ}$ 撞擊時頭部承受最小之最大加速度(圖四)與 HIC 值(表二)，而  $30^{\circ}$ 撞擊時頭部承受之評估指標最大。此結果可能是 x 方向的摩擦力在  $60^{\circ}$ 最大，撞擊過程消耗部分頭部之撞擊能量，在總能量不變的條件下使得頭部承受之合加速度下降。當身體軸線與地面呈  $30^{\circ}$ 時，z 方向的最大加速度值比身體呈  $90^{\circ}$ 時還高，可能原因在於小角度撞擊時，撞擊能量減少分散至摩擦力及頸部結構，幾乎全由頭部所吸收所

致，此現象也說明了 30° 撞擊之最大加速度值最接近僅頭部掉落撞擊時之最大加速度與 HIC 值 (281 G, HIC=1574)。

當人偶由 37.6, 60, 90 及 120 cm 墜落撞擊 4.5cm 厚之橡膠地墊時，頭部承受之最大加速度值隨著墜落高度的提高而顯著增加、撞擊持續時間則顯著降低 (圖五)，其中以 90° 撞擊時頭部承受之最大加速度與 HIC 值最小，但是隨著墜落高度提升至 90 cm 以上時，則以 60° 撞擊時頭部承受最小之評估指標 (表三、表四)。這是因為 90° 撞擊時，頸部的壓縮與變形吸收部分撞擊能量，並抑制頭部的反彈時間；當墜落高度提升至 90 cm 以上時，60° 之撞擊過程中頭部與地墊之間有明顯滑動現象，部分撞擊能量轉為摩擦力消散，因此頭部受力變小。

## 五、結論

本研究建立 Hybrid III 兒童人偶之有限元素模型，模擬兒童墜落之頭部撞擊，模型中將人體簡化為頭部、頸部及軀幹三大部份，藉由顯性有限元素模擬人偶撞擊時之動態過程，探討頭部承受之加速度與頭部傷害指數，進而推估頭部傷害的風險，結果顯示人偶墜落模型比僅使用頭型之墜落測試更能夠評估實際之頭部傷害風險。

兒童人偶墜落撞擊過程中，頭部承受之最大加速度及 HIC 值不增反降，這是因為頸部的彈性變形吸收部分撞擊能量，並抑制頭部的反彈時間。人偶之長軸與地面呈 60° 姿勢之頭部撞擊時頭部受力最小，這是因為此撞擊角度分散較多的能量在側向之摩擦力之故。橡膠地墊之力學性質近似一彈性體，防護頭部傷害能力決定於厚度，厚度愈大，其可變形之體積愈大，頭部受力自然愈低。

目前評估兒童遊戲場鋪面材料防護能力之測試標準，均使用一金屬頭型進行墜落測試，取代一完整之兒童人偶，此測試方法雖然無法評估頸部及軀幹之影響，頭部之動態響應與真實碰撞亦不相同，但是前者頭部承受之最大加速度與 HIC 值卻是較高。為避免兒童發生頭部傷害，本研究建議以只有頭部模型撞擊鋪面材料，將可從嚴考驗鋪面之防護能力。

## 六、參考文獻

1. F 1292: Standard specification for impact

attenuation of surface systems under around playground equipment. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA, 1999.

2. EN 1177: Impact absorbing playground surfacing – safety requirement and test methods. CEN, 2000.
3. Versace, J., A review of the severity index, Proc. 15th Stapp Car Crash Conference, New York, 1971.
4. FMVSS 208, Occupant crash protections, Federal Motor Vehicle Safety Standard, Washington, 2005.
5. Irwin, A. and Mertz, H. J., Biomechanical basis for the CRABI and Hybrid III child dummies, SAE paper No. 973317, 1997.
6. Federal Motor Vehicle Safety Standards Part 572, “Anthropomorphic Test Devices,” 1999.

表一、FMVSS Part 572 [6]擺錘測試時頭部承受加速度與時間關係。

Time (ms)	Flexion Decel. (G's)	Extension Decel. (G's)
10	22.5~27.5	17.2~21.2
20	17.6~22.6	14.0~19.0
30	12.5~18.5	11.0~16.0
>30	<29.0	<22.0

表二、人偶自 37.6cm 高度撞擊剛砧之最大加速度(G)與 HIC 值。

	撞擊角度		
	90°	60°	30°
HIC	938	770	1168
G <sub>R</sub>	225	185	263
G <sub>Z</sub>	225	185	263
G <sub>X</sub>	10.0	12.8	8.7

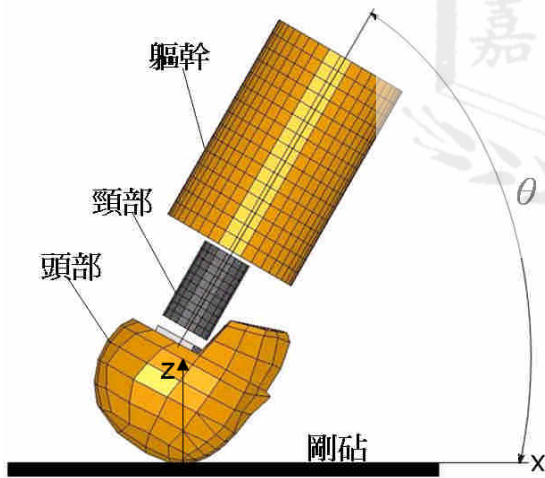
註：G<sub>R</sub>：最大合成加速度；G<sub>Z</sub>：Z 軸方向最大加速度；G<sub>X</sub>：X 軸方向最大加速度。

表三、人偶撞擊厚度 4.5 cm 之橡膠地墊時頭部承受之最大合成加速度值。

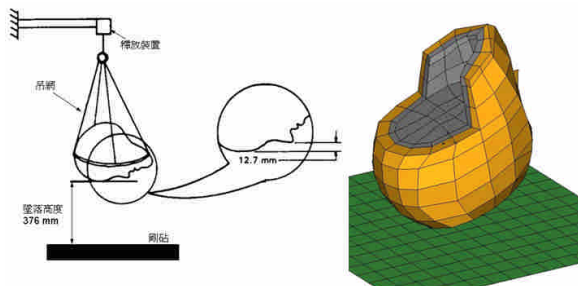
	墜落高度 (cm)			
撞擊角度	37.6	60	90	120
90°	108	149	202	242
60°	121	158	196	228
30°	128	206	215	258

表四、人偶撞擊厚度 4.5 cm 之橡膠地墊時頭部承受之 HIC 值。

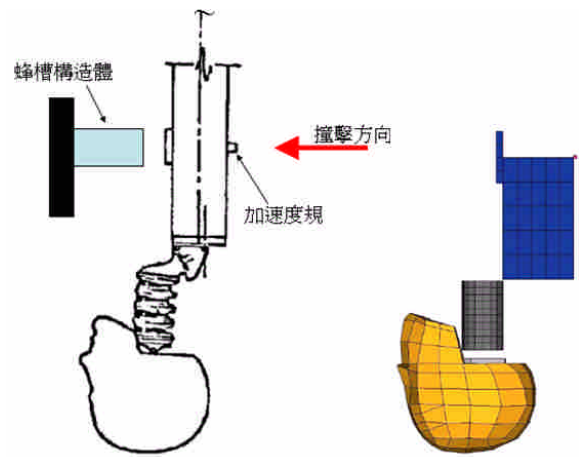
	墜落高度 (cm)			
撞擊角度	37.6	60	90	120
90°	264	595	1071	1696
60°	350	682	1170	1675
30°	390	728	1413	2082



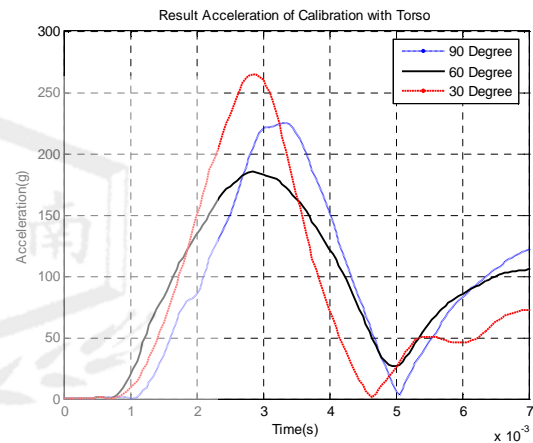
圖一、兒童人偶之有限元素模型



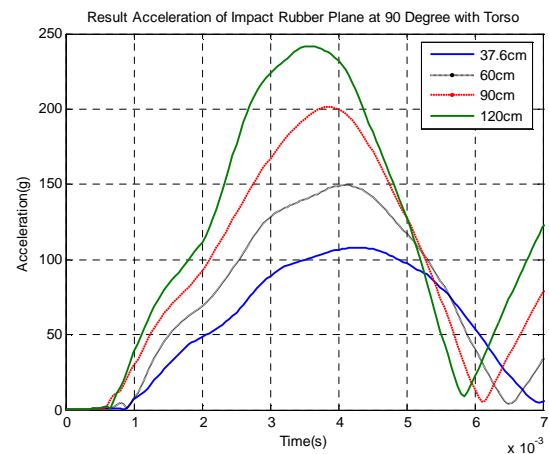
圖二、FMVSS Part 572 [6]規定之頭型測試示意圖及本研究建立之有限元素模型。



圖三、FMVSS part 572 [6]規定之頭頸部擺錘測試之示意圖及其有限元素模型。



圖四、人偶自 37.6cm 高度撞擊剛砧時，頭部承受之合成加速度與時間關係圖。



圖五、人偶撞擊橡膠鋪面時 (90°)，頭部承受之合成加速度與時間關係圖。