

Head Injury Analysis Based on Accident Data of Side Impact

Xu Wei¹, Wan Xinming¹

(1. Vehicle Test and Research Department, China Automotive Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: In the past several decades, there had significant achievements in study of head injury protection during frontal impact. But there should be more efforts in the research of head injury in side impact and pedestrian accident. Experimental and mathematical analysis were very important in the research of injury type and mechanism, because of the limitation in implement of human test. This study started a kinematic analysis with HBM head FE model to study the public head injury data of occupant in side impact. Head injury criteria and intracranial parameters were evaluated with the real injuries. The results with different speeds were compared with the ones of WSU and SIMon head models. The biofidelity of this model in the study of head injury mechanism and parameter analysis was evaluated. It's shown that HBM model is effective to identify mild and severe head injury in side impact and the predicted injuries have a corresponding distribution according to real injuries.

Keywords: Head Injury, Side Impact, Accident Reconstruction, Finite Element Model

基于侧碰事故数据的头部损伤分析

许伟¹, 万鑫铭¹

(1. 中国汽车工程研究院碰撞试验研究部, 重庆, 400039)

摘要: 虽然在过去的几十年中在正面碰撞乘员头部防护的研究已经取得了显著的效果, 但是对于侧面碰撞和行人碰撞中的头部损伤的研究仍然需要进一步的努力。在伤害模式和损伤机理的研究方面, 由于人体试验受到严重限制, 基于事故数据的试验分析和数学分析占据了重要的地位。本文基于国外公开的侧碰乘员头部损伤数据, 采用 HBM 头部有限元模型, 进行头部的动力学响应分析, 得到不同碰撞条件下的头部损伤评价指标和相关参数与伤情的对比, 并与 WSU 和 SIMon 头部模型的结果进行对比分析, 评估模型在头部损伤机理研究和损伤参数分析方面的有效性。结果表明, HBM 头部模型在用于汽车事故的损伤分析中, 能够有效辨别侧面碰撞事故中的轻微和严重的头部损伤, 并且在损伤部位分布上具有较好的对应性。

关键词: 头部损伤, 侧面碰撞, 事故重建, 有限元模型

1 引言

汽车碰撞事故中, 侧面碰撞往往造成碰撞侧乘员的严重伤害。针对NHTSA事故研究的数据表明, 脑损伤在两车侧碰事故中导致的死亡可以占到总数的 41%~64%^[1], 侧面碰撞的乘员保护, 尤其是乘员头部损伤的防护极为重要, 而防护措施的研究, 需要对于碰撞的模式和损伤机制有深入的了解。

人体头部损伤的机理较为复杂, 对其进行评估的方法极为有限, 头部损伤评价指标 HIC (Head Injury Criteria) 已经使用了几十年, 但是主要是跟平移加速度关联, 因此有本身的局限性。随着计算机技术的发展, 大量使用有限元方法的模型被开发出来, 其中就包括 WSUBIM、ULP 和新一代的 SIMon 头部模型, 这些模型被广泛用于头部损伤研究, 获得碰撞过程中颅内的各种力学响应。

头部损伤研究的困难另一方面来源于可用数据的缺乏, 目前只有美国和欧洲的少数实验室开展尸体和动物组织试验, 数据极为有限。通过深入的事故调查获得载荷条件和人体损伤数据, 进行事故重建, 了解人体损伤过程是现代比较流行的方法。但是事故重建不同于实验, 本身的准确性、可靠性和数据精度都较难保证。因此, 高质量事故数据具有很高的科研价值。

本文以HBM头部有限元模型^[2]为工具, 通过针对公共文献共享的事故数据进行仿真分析, 对比不同头部模型的计算结果, 分析头部损伤的作用机制和评估参数。

2 数据来源和分析用模型

本研究采用HBM头部有限元模型作为分析工具, 该模型基于真实人体解剖学结构, 并通过尸体试验数据验证。事故数据来源于Franklyn M.和Fildes B.在澳大利亚MUARC收集的侧面碰撞事故数据^[3]。

2.1 HBM 头部模型

HBM 头部模型采用三维解剖学图像数据建立, 描述了主要的解剖学结构, 包括头皮、颅骨、硬脑膜、脑脊液、软脑膜、大脑、小脑、脑室、脑干、脑镰和脑幕等组织结构。如图 1 所示。头部模型质量为 4.4 kg。

头皮使用两层实体单元描述, 平均厚度为 6 mm。其下是皮质骨和松质骨构成的三层颅骨结构, 紧贴内颅表面的硬脑膜使用一层膜单元模拟, 蛛网膜下腔的脑脊液使用低剪切模量的实体单元描述, 脑脊液层之下是紧贴脑组织表面的软脑膜。脑组织区分了大脑、小脑、脑干结构, 将大脑两半球分隔的脑镰结构和分离大脑和小脑的脑幕结构, 使用实体单元建模。颅骨

和脑之间的相对运动通过硬脑膜和脑脊液层之间的相对滑动来模拟。

生物组织材料是典型的载荷速率相关的粘弹性材料。脑组织含水量接近 78%，表现出不可压缩的特性，采用线性粘弹性材料模拟，颅骨采用弹性材料。其他组织材料参数见表 1。

表 1 模型各部分材料参数

成份	材料类型	E/K (MPa)	泊松比	G_0 (kPa)	G_∞ (kPa)	β (s^{-1})
皮质骨	弹性	15000	0.21			
松质骨	弹性	4600	0.05			
脑镰						
脑幕	弹性	31.5	0.45			
小脑	粘弹性	2190		10	2	80
大脑	粘弹性	2190		12.5	2.5	80
脑脊液	粘弹性	1050		1	0.9	80
脑干	粘弹性	2190		22.5	4.5	80

HBM模型验证的实验数据来源于国外尸体试验，分别采用Nahum头部试验、Trosseille试验对模型进行了验证^[4]，得到的头部压力、加速度曲线吻合较好。使用Hardy试验的颅脑相对运动数据进行了分析，表明HBM模型能够较好的模拟出颅脑相对运动的数量级。

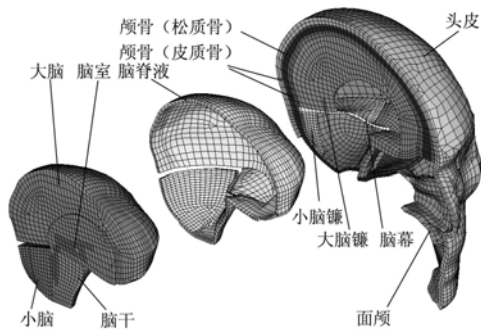


图 1 HBM 头部模型

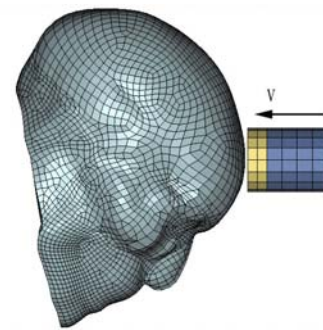


图 2 Nahum 试验验证

在 Franklyn M.等人的研究中使用了 SIMon 模型和 WSUIM 模型。HBM 模型计算的结果将与它们的结果进行对比。SIMon 模型仅描述了大脑、脑镰和颅骨等结构，没有描述小脑和脑干，颞叶部分极大的简化了结构以获得计算的效率。整个模型质量为 4.77 kg，包括 5948 个单元。WSUIM 模型模型由韦恩州立大学开发，模型数量超过 30 万单元，描述了几乎全部的头部结构，具有目前最高的精度，并且通过了多项尸体试验的数据验证。

2.2 事故案例

事故案例来源于澳大利亚 MUARC 事故调查队伍的研究，这一调查团队由调查员、护士、工程师和专家组成，开展深入的现场事故调查工作。收集的数据包括车辆信息、现场信息和伤情报告等。

在 Franklyn M.等人的研究中使用了两个侧面碰撞的案例。案例 1 是丰田车闯红灯后撞击了 Commodore 车的右侧驾驶员侧，车内驾驶员和乘客均使用安全带，安全气囊均起爆，驾驶员肋骨骨折及血气胸，全身多处擦伤。案例 2 是一辆 Commodore 车型在失去控制后先碰撞了左前的车辆后，右侧驾驶员位置严重的撞击了电线杆，驾驶室严重变形。驾驶员遭受了硬膜外血肿、颞骨骨折和脑挫伤、连枷胸和肋骨骨折及血气胸。两起案例的相关信息见表 2。

表 2 事故案例相关信息

信息	伤者信息			车祸信息	伤情信息	
类型	性别	身高	体重	碰撞类型	损伤部位	头部评级
案例 1	男	1.79 m	80 kg	两车侧碰	头部、胸部	AIS 0
案例 2	男	1.80 m	80 kg	侧面柱碰	头部、胸部	AIS 5

2.3 头部损伤仿真分析

在详细分析整理事故信息的基础上，M. Franklyn等人进行了碰撞速度计算、实车模拟碰撞试验，来进行事故重现，获得车辆的碰撞速度，模拟出车辆的碰撞过程和变形情况，并获得车内乘员的运动响应和身体各部分的损伤评价指标。最后，通过采用SIMon和WSUIM头部模型进行仿真分析^[3]，研究在不同载荷条件下颅内的力学响应。

为了模拟头部损伤，假人头部安装了 3-2-2-2 型的加速度传感器阵列，通过头部质心三轴向和 X、Y、Z 三轴上两向加

速度传感器记录数据的换算,得到头部的平移和旋转加速度,作为有限元模型的输入条件。HBM 头部模型通过定义强制运动模拟假人头部的运动学过程,从而得到颅内的动力学响应。因此,对模型进行局部修改,将颅骨定义为刚性材料,通过将假人头部的平移和旋转运动加载在颅骨上,模拟这一过程。假人头部的加速度曲线如图 3 和图 4 所示。

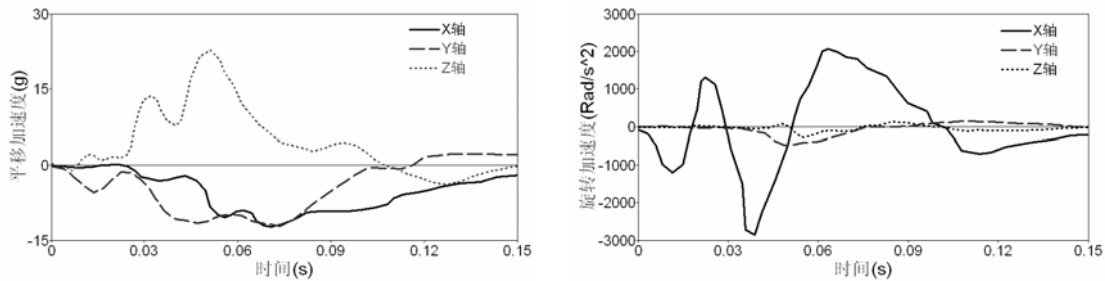


图 3 AIS0 案例中的头部平移和旋转加速度

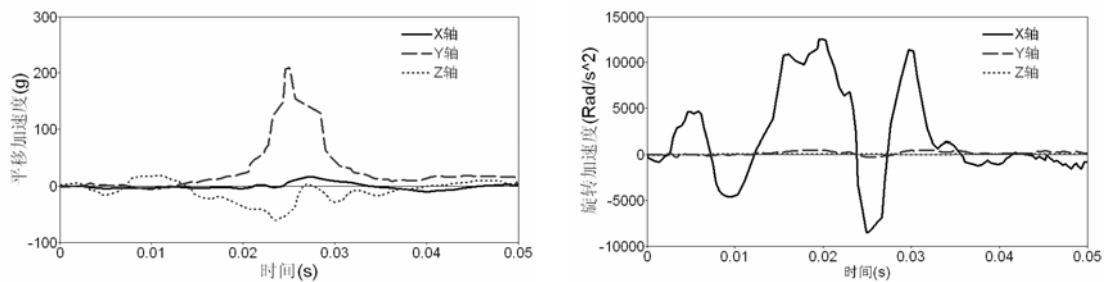


图 4 AIS5 案例中的头部平移和旋转加速度

3 损伤仿真分析结果

使用 HBM 头部模型针对两起侧碰案例的驾驶员头部损伤进行仿真分析,计算得到了碰撞过程中颅内单元的动力学响应过程,并对相关物理参数进行了比较。

在 M. Franklyn 的研究中,仅给出了不同模型计算累积应变伤害指标 (CSDM) 对应的超过 15% 应变的单元体积百分比。本研究计算了颅内压力和应变,颅内压力主要用于评价碰撞同侧和对侧挫裂伤的严重程度, Ward 等人^[5]的研究指出,当颅内压力大于 235kPa,会导致严重伤害,在 173-235kPa 之间,会产生中度损伤。1994 年由 Bandak^[6]提出的一种测量方法—累积应变伤害指标 CSDM,测量脑部遭受不同水平应变的区域占整个脑部的体积百分比,当这一百分比超过一定量值,就可以判断损伤产生。CSDM 作为一个评价指标,通过对整个脑部应变在 2 ms 的时间增量内超过 15% 的单元总体积的计算获得,5.5% 意味着轻微的 DAI,而超过 22.7% 意味着严重的 DAI 损伤。

AIS0 案例:在达到平移加速度峰值的 51ms 后,颅内表现出明显的压力梯度分布,左侧为正压力,右侧为负压力,但是最高正压力出现在左侧颞叶前下部,为 60.8 kPa,最大负压力出现在右侧颞叶前侧,为 -71.8 kPa。颅内压力的结果表明,脑挫伤发生的可能性极低。

模型显示大于 15% 的颅内应变在 39ms 旋转加速度达到第一个峰值时,并没有出现,但是当头部达到 61-66ms 的第二个波峰时,超过 15% 的应变单元体积达到了总体积的 3~5%。这一数值小于 5.5% 的阈值,产生颅内 DAI 损伤的风险很小。

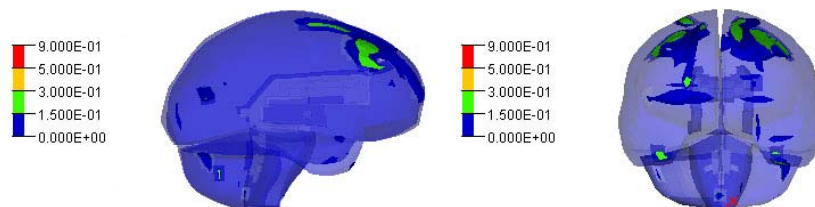


图 5 AIS0 案例中应变大于 15% 的单元分布

AIS5 案例:在 25ms 平移加速度达到峰值时,颅内出现明显的压力梯度分布,头部右侧为正压力,左侧颞叶部位为负压力。在这一时刻右侧顶叶偏后的位置,最大正压力可以达到 195kPa,在右侧颞叶前下部,在头部旋转加速度达到峰值的 29ms

时,达到了-102 kPa。在左侧颞叶前下部的负压力达到了-216.8 kPa。头部的双侧颞叶位置以及右侧顶叶偏后位置存在严重脑挫伤的风险。

模型显示颅内产生了较高的应变,在 X 轴旋转加速度达到负向最大值的 25 ms 时刻,大于 15%的应变等级的单元占到总体积的 20~25%,并且分布区域涉及到双侧顶叶侧上部、双侧额叶前部、接近颅中窝的额叶颞叶交接区域、中脑及脑核心部位。这一数值表明头部遭受严重 DAI 损伤的风险极高。

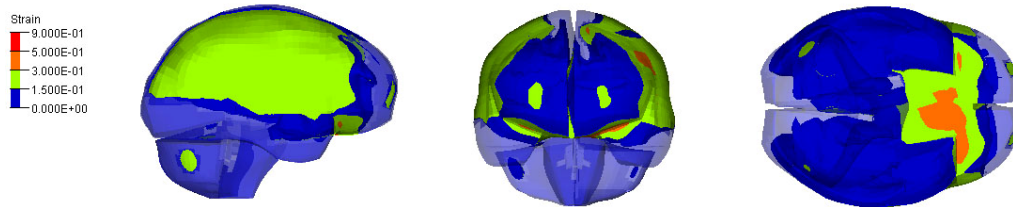


图 6 AIS5 案例中应变大于 15%的单元分布

4 讨论

侧面碰撞中乘员头部的运动响应与行人碰撞存在相似之处,但是由于空间的狭小,存在多次碰撞的可能性,且头部旋转加速度的变化更为剧烈。由于两个案例头部加速度和角加速度存在相当大的差距,后者的加速度接近为前者的 10 倍,因此 HBM 模型计算得到的头部动力学响应与其它模型一样,能够较好的区分两例事故中的不同伤情。

HBM 模型对 AIS0 案例的分析结果,表明头部损伤的风险极小,与实际结果吻合。对 AIS5 案例的分析,表明头部的双侧颞叶位置以及右侧顶叶偏后位置存在严重脑挫伤的可能,并且在双侧顶叶侧上部、双侧额叶前部、接近颅中窝的额叶颞叶交接区域、胼胝体、中脑及脑核心部位出现了较高的应变。在 SIMon 模型中由于颞叶部位的高度简化,无法观察到这一现象。而 WSUBIM 模型中,高应变出现在脑的核心处、中脑、上脑干、间脑、枕叶内侧和胼胝体。医疗记录表明,伤者遭受了双侧颞部的硬膜外血肿 (AIS5)、颞叶挫伤 (AIS3) 和双侧蝶骨骨折 (AIS3)。这也说明,模型预测的损伤部位与实际结果相当吻合,除了双侧的顶叶上部没有损伤,这一问题的原因在 Franklyn M.的研究中就已经指出,应当归因于事故重建中头部碰撞点位置比实际更为靠后。

在 AIS0 案例的分析中,HBM 模型得到的超过 15%的应变单元体积与 WSUBIM 模型的计算结果更为接近,而不同于 SIMon 模型,但是没有在脑干部位观察到高应变区域的出现。这一问题可以认为是由于不同模型的精确程度决定,说明更为精确的模型能够更好的模拟出准确的颅内应力应变分布情况,但是在这一强度的碰撞条件下,脑干区域的高应变,更主要的反映了不同模型在蝶骨大翼附近颅脑结构特点。

在 AIS5 案例中,头部的右侧以正压力为主,但是右侧颞叶前下部,在头部旋转加速度达到峰值的 29ms 时出现负压力的峰值,说明头部在冠状面内剧烈的旋转运动有导致局部颅骨不规则区域脑挫伤的可能。CSDM 的最大值并不是在 X 轴旋转加速度的第一个峰值时出现,而是在达到第二个负向峰值的前后出现,这说明颅内 CSDM 指标的计算和 DAI 损伤,与旋转加速度和加速度的变化率都密切相关。

分析的结果表明,HBM 模型能够很好的分辨出侧面碰撞中人体头部无损伤和严重损伤的事故案例,但是需要更多的,不同级别头部损伤的案例数据和尸体试验数据来对模型进行评估,以便在不久的将来通过大量的可靠的数据评估,可以将优秀的人体生物力学模型像机械假人一样,通过合理的标定程序标定后,就可以用于人体损伤的评估。

5 结论

(1) 使用基于人体解剖学结构并采用尸体试验数据验证的 HBM 头部模型进行侧面碰撞事故的人体头部损伤研究,分析结果表明,HBM 模型具有较好的生物逼真度,可以正确反映碰撞过程中人体头部的动力学响应过程,并准确预测头部损伤。

(2) 颅内压力对于准确预报脑挫伤而言具有重要意义,而且脑挫伤与平移加速度联系紧密,但是头部在冠状面内剧烈的旋转运动,可能在具有不规则的内颅表面的颞部造成脑挫伤的可能。

(3) CSDM 通过计算出现较高应变的单元体积百分比来评价 DAI 损伤,这一指标较大幅度依赖于模型的精确程度,对于简化较少具有较高精度的模型,CSDM 的计算结果更为准确。同时 CSDM 与头部的旋转加速度和旋转加速度变化率有密切关系。

参考文献

- [1] Leslie O. Highway Data Ties Side-Impact Crashes to Brain Injury [[DB/OL]]. 2004-7-28/ 2008-10- 21.<http://www.urmc.edu/pr/news/story.cfm?id=599>.
- [2] 许伟,杨济匡. 研究颅脑交通伤的有限元模型的建立及验证[J].生物医学工程学杂志,2008,25(3):556-561.
- [3] Franklyn M., Fildes B., Dwarampudi R., et al. ANALYSIS OF COMPUTERMODELS FOR HEAD INJURY INVESTIGATION [C]//In: Proc. Of 18th Enhanced Safety Vehicle Conference. Nagoya: NHTSA, 2003, 1-15.
- [4] 许伟.车辆碰撞事故中头部生物力学响应和损伤机理分析[D].湖南长沙:湖南大学,2008,53-68.
- [5] Ward C and Thompson R. The development of a detailed finite element brain model[C]//In: Proc of 19th Stapp Car Crash Conference. San Diego: Society of Automotive Engineers, 1975, 641-674.
- [6] Bandak F and Eppinger R. A three-dimensional FE analysis of the human brain under combined rotational and translational accelerations[C]//In: Proc of 38th Stapp Car Crash Conference. Florida: Society of Automotive Engineers, 1994, 145-163.