

The Comparison of Simulation Research Based On The 3-Year-Old Child Abdomen Finite Element Model

Ruirui Lu, Haiyan Li*

Center for Injury Biomechanics and Vehicle Safety Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, China, 300222
Email: luruirui@tust.edu.cn, lihaiyan@tust.edu.cn

ABSTRACT:

Background: With the rapid development of the finite element method and medical imaging technology, according to the living human CT scanning images, the 3-year-old child abdomen finite element model was developed. The model and 3-year-old finite element model which was got by scaling down the adult finite element model and the 3-year-old dummy finite element model together laid the foundation for the injury biomechanics simulation analysis.

Objective: Explore the biofidelity of the model constructed from the different methods and the injury effects of abdominal viscera at the different velocities.

Method and Material: Based on the 3-year-old finite element model, the impactor with velocities was constructed to impact the left abdomen and impact responses were output.

Results: The maximum impact force of the 3-year-old child abdomen finite element model at the 4.8m/s was 599.12N and the maximum abdominal deformation was 64.57mm. It had the observable differences from the 3-year-old finite element model scaled down the adult finite element model and the 3-year-old dummy finite element. The abdomen viscera injury increased as the impact velocity turned higher.

Conclusion: The 3-year-old child abdomen finite element model based on the living human anatomy had the higher biofidelity. At the same time, it would provide the accurate data for the research and development of childhood abdomen protection facilities.

Keywords: 3-year-old child, Abdomen, Finite element, Injury analysis

基于三岁儿童腹部有限元模型的对比仿真研究

芦瑞瑞, 李海岩*

天津科技大学损伤生物力学与车辆安全工程中心, 天津, 中国, 300222
Email: luruirui@tust.edu.cn, lihaiyan@tust.edu.cn

摘要: 有限元方法和医学影像技术的快速发展, 基于真实人体 CT 图像并参照人体解剖学结构的三岁儿童腹部有限元模型得以构建, 其与成人缩放得到的三岁儿童有限元模型以及假人模型为损伤生物力学仿真分析奠定了基础。探讨不同方法构建的 3 岁儿童腹部有限元模型的生物仿真度及碰撞速度的不同对腹部内脏的影响。基于所构建的三岁腹部有限元模型, 对撞锤施加速度, 撞击儿童腹部左侧, 分析其力学响应。3 岁儿童腹部有限元模型在 4.8m/s 速度撞击下, 最大碰撞力为 599.12N, 最大变形为 64.57mm, 与成人缩放 3 岁儿童有限元模型、3 岁假人有限元模型相比具有显著差异。随着碰撞速度的增加, 儿童腹部内脏损伤程度会加重。真实人体解剖学结构的三岁儿童腹部有限元模型具有更高的生物仿真度, 为后期儿童腹部防护设施的研发提供基础数据。

关键词: 三岁儿童; 腹部; 有限元; 损伤分析

1 引言

根据美国国家公路交通安全协会统计, 每年美国有 1400 名 14 岁以下儿童死于汽车事故, 有超过 28 万名的儿童因汽车事故受伤^[1]。Williamson 提到 3 到 4 岁的儿童比其他年龄的儿童更容易受伤死亡 (接近 45.5%)^[2]。美国国家事故采样系统关于道路交通事故对人体各部位损伤数据显示, 交通事故中除了头胸部易受损伤外, 腹

部是人体第三处易受损伤部位^[3]，约占 26.7%。

从人体解剖学角度分析，三岁是一个重要的身体成长的分水岭。其腹部在整个身体中所占比例比成人的要大，更容易发生腹部损伤，但其防护却很少。由于伦理道德等原因，不可能直接用人体来进行研究。Jun Ouyang 等^[4]的研究用 9 具儿童尸体，有小孩组 2-4 岁，大孩组 5-12 岁，分别通过相应装置，给予腹部 6m/s 速度冲击儿童腹部，该研究为之后的 3 岁儿童有限元仿真提供了理论参考。随着有限元的快速发展，研究人员构建了人体腹部有限元模型，用仿真方法来进行有关方面的研究与开发。2005 年日本名古屋大学的 Mizuno K. 等^[5]构建了 3 岁儿童人体有限元模型，但此模型是通过 50 百分位成人人体有限元模型缩放所得。Koizumi T^[6]继续该方面的研究，得出缩放的 3 岁儿童有限元模型的仿真结果与假人模型有限元模型的仿真结果确实存在很大的差异。3 岁儿童身体结构并不是成人结构的简单缩放，其内脏与成人缩放的有很大差别。就拿肝来说，儿童时期的肝以比例上特别大为特征，占有腹腔容积 2/5 左右，特别是右叶充满于右膈穹窿顶。肝在腹上部占有的位置比成年人大得多。符合人体真实解剖学结构的有限元模型会具有更高的生物仿真度。

本文基于符合人体真实解剖学结构的 3 岁儿童腹部有限元模型，对其施加与 Koizumi T. 等人一致的载荷约束，对比查看其碰撞响应。接着对模型施加不同速度，对比研究不同速度下，儿童腹部的损伤情况。

2 材料与方法

2.1 有限元模型

本文所用的 3 岁儿童腹部有限元模型是基于真实儿童 CT 图像，提取几何特征所建。模型包含有骨盆、脊椎、肝、胃、脾、肾、大肠、小肠、子宫、膀胱、腰大肌、腰方肌、腹肌（腹直肌、腹横肌、腹内斜肌）、背阔肌、皮肤等组织。在 HyperMesh 软件中进行网格划分、单元检查以及部分组织构建，形成最终模型如图 1 所示：该模型共有节点 273322，单元总数 313233，其中八节点六面体单元 194684，壳单元为 118549。在实体单元中，最小雅克比为 0.20，雅克比大于 0.5 的单元占到总数单元的 95%，长宽比大于 5:1 的单元占到总单元的 98%。均符合单元建模质量要求。赋予相应材料属性后，该模型参照 Jun Ouyang 尸体试验条件通过了有效性验证。

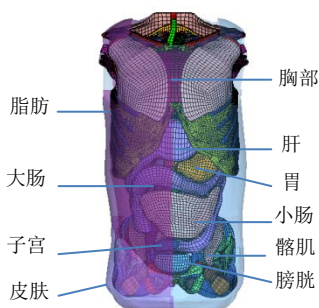


Figure 1. The finite element model of 3-year-old child abdomen
图 1 3 岁儿童腹部有限元模型

2.2 试验方法

现实中，儿童会受到不同角度的撞击，不仅仅是正面碰撞。本文利用已验证过的 3 岁儿童腹部有限元模型，参照 Van Ratingen 等^[7]左侧部位撞击 3 岁儿童假人模型试验边界条件，模拟仿真儿童侧面撞击下腹部碰撞响应情况。

如图 2 所示，腹部有限元模型保持坐姿状态，构建撞锤，直径 82mm，质量 3.8kg，分别以 4.8m/s、6.8m/s 以及 9.4m/s 速度沿着身体前后方向旋转 60° 撞击儿童左侧腹部小肠部位，此模型各组织材料均与验证试验中各组织材料一致。碰撞响应时间为 40ms，定义接触后，在 Pam-Crash 软件中进行模拟，分别输出力-时间和力-挠度曲线。

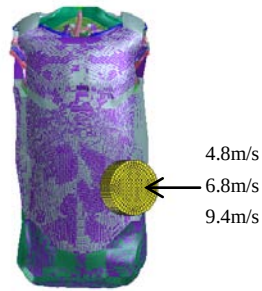


Figure 2. Child abdomen side impact
图 2 儿童腹部侧面撞击

3 结果

将撞锤 4.8m/s 速度撞击下力-时间曲线与力-挠度曲线分别提取出来，然后与 Koizumi T 进行对比，结果如图 3 所示。

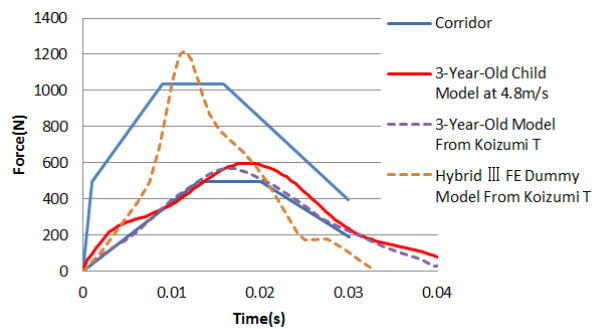


Figure 3. Child abdomen side impact force-time curve at 4.8m/s
图 3 儿童腹部侧面碰撞力-时间曲线 (4.8m/s)

将模拟仿真所得的力-时间曲线与变形-时间曲线进行数据处理，得到儿童腹部侧面撞击力-变形曲线，见图 4。

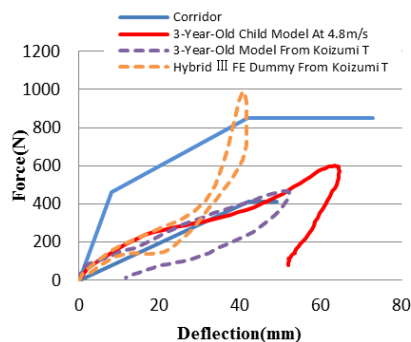


Figure 4. Child abdomen side impact force-deflection curve at 4.8m/s
图 4 儿童腹部侧面碰撞力-变形曲线 (4.8m/s)

接着利用仿真软件分别增大 3 岁儿童腹部侧面撞击速度为 6.8m/s、9.4m/s，在 4.8m/s、6.8m/s、9.4m/s 三种速度下腹部碰撞力-时间曲线和碰撞力-腹部变形曲线如图 5、图 6 所示。

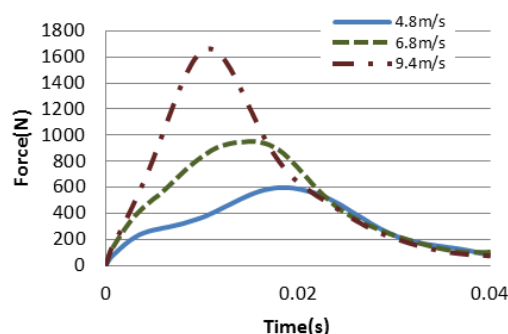


Figure 5. Child abdomen side impact force-time curves at different velocity

图 5 儿童腹部侧面不同速度撞击力-时间曲线

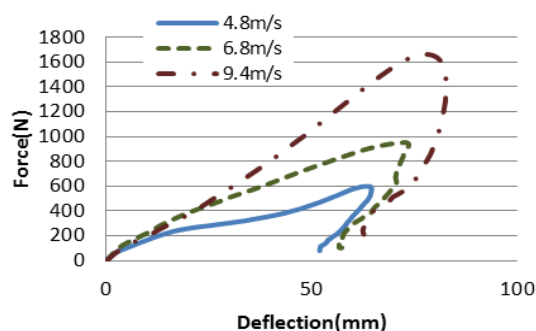


Figure 6. Child abdomen side impact force-deflection curves at different velocity

图 6 儿童腹部侧面不同速度撞击力-变形曲线

4 讨论

在图 3 中, 实线蓝色曲线为 Van Ratingen 按照一定比例缩放的成人尸体试验所得, 虚线曲线为 Koizumi T 3 岁儿童缩放有限元模型与 3 岁假人有限元模型所得。从中可以看出, 本文所构建的 3 岁儿童腹部有限元模型在 4.8m/s 速度时撞击, 最大撞击力为 599.12N; Koizumi T 中其 3 岁儿童有限元模型最大撞击力为 563N, 3 岁儿童假人模型最大撞击力为 1216N。假人有限元模型撞击力比人体解剖学结构的有限元模型撞击力要大的多, 本文所构建的 3 岁儿童腹部有限元模型在侧面碰撞中与 Koizumi T 所研究的 3 岁缩放有限元模型撞击力-时间曲线趋势大致相同, 但也存在一定的差异。

将模拟仿真所得的力-时间曲线与变形-时间曲线进行数据处理, 得到儿童腹部侧面撞击力-变形曲线, 如图 4。从图 4 中可以看出, 本文所构建的 3 岁儿童腹部有限元模型在 4.8m/s 速度撞击下, 最大碰撞力为 599.12N, 最大变形为 64.57mm; Koizumi T 试验中, 3 岁儿童缩放有限元模型仿真中, 最大变形为 52mm, 3 岁儿童假人有限元模型最大变形仅为 42mm。存在这样的差异, 很好的说明 3 岁儿童有限元模型并不是简单的成人模型按照比例缩放那么简单, 其内部内脏等组织与成人相比, 从解剖学角度来讲, 有很大的差异性。所以, 构建符合人体真实解剖学结构的 3 岁儿童腹部有限元模型非常重要, 其较高的生物仿真度可为下一步儿童防护措施的研究以及儿童座椅开发优化等提供理论依据。

图 5 中可以看出, 4.8m/s、6.8m/s、9.4m/s 速度下其碰撞力分别为 599.12N、953.14N、1661.97N, 随着撞击块速度的增大, 其腹部碰撞力随之增大, 且出现峰值的时间越早, 不同速度下, 儿童腹部模型力-时间曲线有显著性差异。从图 6 可知: 4.8m/s、6.8m/s、9.4m/s 速度下其碰撞力分别为 599.12N、953.14N、1661.97N, 最大变形为 64.57mm、73.6mm、82.66mm。随着撞击速度的增大, 碰撞力与腹部变形也随之增大, 同时, 对腹部的冲击增大, 使内脏损伤的概率也就越大。

内脏损伤，一般通过其应变来分析。据 Melvin^[8]的研究，肝脏应变达到 30%左右，会发生损伤。Yamada^[9]的研究中，指出肠的损伤，应变可达到 120%，血管破裂的应变为 100%。Shigeta^[10]中的研究中，提出了中空性内脏损伤阈值应变为 120%，实质性器官损伤阈值为 30%。

不同速度下分别对腹部内脏通过仿真软件输出各内脏的最大应变。结果如表 1 所示，在 4.8m/s 速度碰撞下，肝的最大应变为 13.73%、脾的最大应变为 11.46%、左肾的为 19.22%、右肾的为 17.01%、胃为 27.87%、大肠为 60.52%、小肠为 129.28%。在 6.8m/s 速度下，肝的最大应变为 21.34%、脾的最大应变为 13.56%、左肾的为 34.81%、右肾的为 18.97%、胃为 35.63%、大肠为 62.80%、小肠为 139.75%。在 9.4m/s 速度下，肝的最大应变为 35.67%、脾的最大应变为 18.49%、左肾的为 39.58%、右肾的为 21.34%、胃为 42.72%、大肠为 67.03%、小肠为 161.11%。其柱状图如图 7 所示：

Table 1. The strain of child viscera at different velocities for impactor
表 1 不同速度下各内脏应变情况

名称	4.8m/s	6.8m/s	9.4m/s	损伤阈值
肝	13.73%	21.34%	35.67%	30%
脾	11.46%	13.56%	18.49%	30%
左肾	19.22%	34.81%	39.58%	30%
右肾	17.01%	18.97%	21.34%	30%
胃	27.87%	35.63%	42.72%	120%
大肠	60.52%	62.80%	67.03%	120%
小肠	129.28%	139.75%	161.11%	120%

从图 7 中可以看出，随着速度的增大，儿童各内脏应变值也随之增大。能看出，小肠部位的应变较其他部位要大的多，这是由于撞击部位恰好为儿童左侧小肠处原因所致。小肠部位在 3 种速度下均超过了其阈值 120%，所以小肠均损伤。肝在 9.4m/s 速度下撞击，其应变超过了 30%，损伤；左肾由于其位置在左侧，恰好位于撞击位置内侧，其应变在 6.8m/s、9.4m/s 速度下超过其阈值 30%，受到损伤。

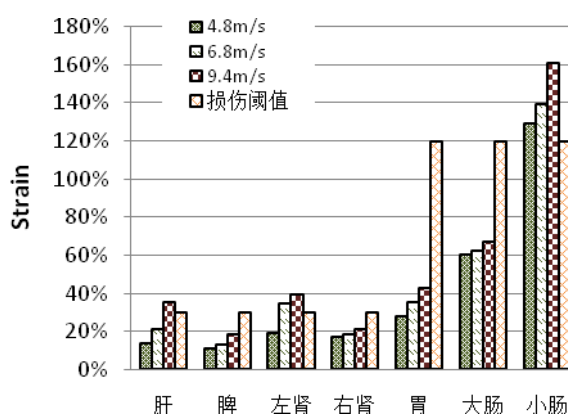


Figure 7. The strain of child viscera at different velocities
图 7 不同速度下各内脏应变情况

5 结语

本文应用真实人体解剖学结构的 3 岁儿童腹部有限元模型，与 Koizumi T 等人所用的成人缩放 3 岁儿童有限元模型、3 岁儿童假人有限元模型进行相同试验设置，其碰撞响应具有显著性差异。这是由于儿童腹部结构与成人相比，有显著差异，并不能简单的按照比例缩放所得。真实人体解剖学结构的 3 岁儿童有限元模型具有更高的生物仿真度。随着碰撞速度的增加，儿童腹部碰撞力与腹部变形也随之增大，同时，内脏的损伤概率以

及损伤程度也随之不断增大。本文的研究对于之后儿童有限元损伤的发展提供理论参考，并可为儿童腹部防护设施的开发与研究提供参考。

参考文献

- [1] National Highway Traffic Safety Administration, January 2004. Traffic Safety facts 2002. Washington, DC. Fatality Analysis Reporting System. Assessed April 2004. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-30/NCSA/TSF2002/2002chdfacts.pdf>.
- [2] Tanya Kapoor, William Altenhof, et al. Injury potential of a three-year-old Hybrid III dummy in forward and rearward facing positions under CMVSS 208 testing conditions[J]. Accident Analysis and Prevention, 2006, 38(4): 786-800.
- [3] Jingwen H. Toward designing pedestrian-friendly vehicles [R]. Michigan: The University of Michigan Transportation Research Institute, 2012: 1-53, 2012.
- [4] Ouyang J, Qingan Zhu, et al. Abdominal impact study on pediatric cadaveric subjects[C]. Proceedings of the 11th International Forum of Automotive Traffic Safety, 2014:303-310.
- [5] Mizuno K, Iwata K, Deguchi T, et al. Development of a Three-Year-Old Child FE Model. Traffic Injury Prevention, 2005, 6(4): 361-371.
- [6] Koizumi T, Tsujiuchi N, Taki N, et al. Development and impact analysis of 3-year-old child FE human model[J]. 2007.
- [7] Van Ratingen M R, Twisk D, Schrooten M, et al. Biomechanically based design and performance targets for a 3-year old child crash dummy for frontal and side impact[R]. SAE Technical Paper, 1997.
- [8] Melvin J W, Stalnaker R L, Roberts V L, et al. Impact injury mechanisms in abdominal organs[R]. SAE Technical Paper, 1973.
- [9] Yamada H, Evans F G. Strength of biological materials[J]. 1970.
- [10] Shigeta K, Kitagawa Y, Yasuki T. Development of next generation human FE model capable of organ injury prediction[C]//Enhanced Safety of Vehicle Conference, Stuttgart, Germany, June. 2009: 15-18.