

汽车侧门受侧向撞击动力响应的数值分析

赵隆茂 杨桂通

(太原理工大学应用力学研究所 太原 030024)

摘要 给出了一个汽车侧门受到侧向撞击时的动力响应的数值分析结果,由能量平衡图和时间步长的稳定性来判断,此数值分析是稳定可靠的。对关键测试点的速度-时间曲线和实验结果进行了比较,两者吻合较好。

关键词 侧向撞击 动力响应 数值分析

中图法分类号 O34*

1 引言

随着高速公路在世界各国的迅速发展,车辆数量的急剧增加和其运行速度的不断提高,公路交通事故造成的人员伤亡和财产损失有增无减。汽车工业界经过多年的努力,对乘员损伤防护进行了大量的研究,改进完善了一系列的防护设施。例如发展了各种类型的安全带、安全汽袋(airbag)和前后吸能装置等设施,从而使汽车在受到前撞时人员的伤亡大为降低。而对于侧向碰撞乘员的损伤一直无有效的防范措施。安全带对于汽车受到侧撞时乘员的防护作用甚微,而侧向安全汽袋仍处于研究试用阶段。又鉴于侧向结构空间有限,吸能装置也无法发挥有效的作用。故侧撞乘员损伤防护成为汽车工业界近年来关注的焦点之一。例如在美国,根据 1990 年颁布的 FMVSS214 标准(Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 214),每年大约有 8000 名乘客在侧撞中死亡,24000 名严重受伤。他们分别占汽车事故的 30%和 34%^[1]。由德国本茨公司公布的资料中也可看到,在欧洲 Mercedes Benz 汽车事故分析中,有 23%是侧撞事故。

图 1 为侧撞时乘员、车门和碰撞体速度间关系的示意图。 v_{dor} 为门速, v_{bar} 是碰撞体的速度, v_{pass} 是乘员速度,而 v_{veh} 是车辆速度。在车辆发生侧向碰撞时,碰撞体首先和车门相撞使之产生变形。此时 $v_{bar,0}$ 减速为 v_{bar} , 而门速 v_{dor} 由零迅速增加到最高速度,然后基本上在 $v_{dor} \approx v_{bar}$ 下减速。变形后的车门在 t_2 时刻和乘员相碰撞,使之至少加速到门速并损伤。乘员的

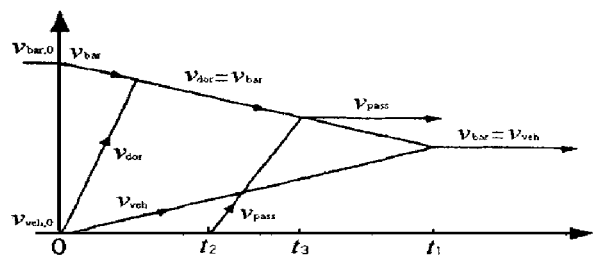


图 1 乘客速度的改变(Δv_{pass})与门速的关系
Fig. 1 Passenger velocity change (Δv_{pass})
versus door velocity

* 赵隆茂:男,1943 年 10 月生,硕士,副教授。
1998-03-30 收到原稿,1999-03-08 收到修改稿。

损伤是依赖于其加速度的值,即单位时间内的 Δv_{pass} , 而此值是由门速来决定的。由此可见,侧撞时,侧门上与乘员致命部位相接触点的速度是一至关重要的量。从相撞开始,车体加速,达到 v_{bar} 后与碰撞体一起运动,而乘员在车内有一定的侧向运动空间,可达到 $v_{\text{pass}} \geq v_{\text{veh}}$ 。

在本文中,我们给出了一个 B5 型车门受侧向撞击时的动力响应的数值分析结果。得到了和乘员致命部位相接触的两个关键点速度-时间曲线,并和有关实验结果进行了比较,从而评估了此类门的侧撞安全性能。

在模拟中,所采用的分析程序为 3D-Lagrangian 描述法的显示非线性动力学程序 PAM-CRASH V97(Engineering System International, France), 前处理用 HyperMesh V2.1E(Altair Computing INC.), 后处理过程用 PAM-UIEW V97(同 PAMCRASH)。

2 有限元模型的建立

图 2 给出了车门的网格图。其几何尺寸来自相应车门的工程部件图。采用 Hyper Mesh 前处理程序建立其网格图。其中图 2(a)为内侧视图,图 2(b)为外侧视图(为了显示内部结构,最外层的覆盖层的网格未显示)。在图 2(b)中, A、B 和 C 为一维棒单元,用以模拟门内部的防侧撞的加强结构。1 和 2 分别为速度测试点的位置。

在车门侧撞实验中,整扇后侧门被固定在一刚架上;车门一侧边用两个滑模结构模拟铰联接;另一侧边联接一薄钢板,而板的另一端用一刚性夹支装置夹支,从而形成有一定摩擦阻尼而又不滑落的状态,以满足 FMVSS 等法规中规定的在碰撞时门既不可上锁,又不允许从门框滑落的要求。为了模拟车体底部的作用,在实验中采用了一两端夹支的钢板及吸能材料来代替。而整个车门及刚架等固定在一小车上,以一定速度和圆柱体相碰撞。图 3 给出了整个装置的有限元模型。其中 A 为车门, B 为用壳单元模拟的圆柱体(定义为刚体), C 和 D 是用弹塑性壳单元模拟钢板, E 和 F 为用刚体模拟刚支架, G 为用弹塑性体单元模拟座椅, H 为用蜂窝状材料体单元模拟吸能材料。

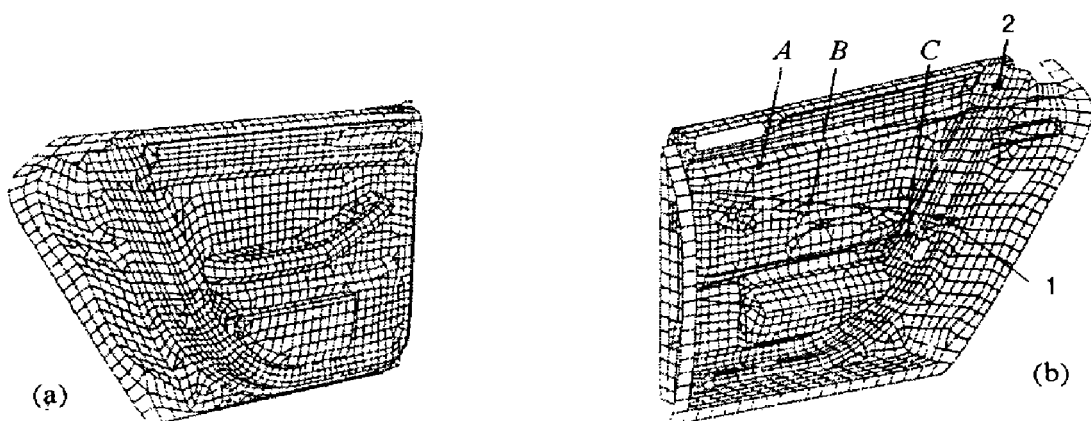


图 2 车门的网格图

Fig.2 Mesh of the door

图 3 中所示的整个模型由 14285 个节点, 3100 个 8 点体单元, 11081 个壳单元和 82 个梁、棒一维单元组成。侧门、座椅和支架等开始处于静止状态, 而 B 以 $u_y = 11.47\text{m/s}$ 的初速和门

撞击。B 的质量为 1800kg。从而模拟汽车侧门受侧向撞击时的受损情况。

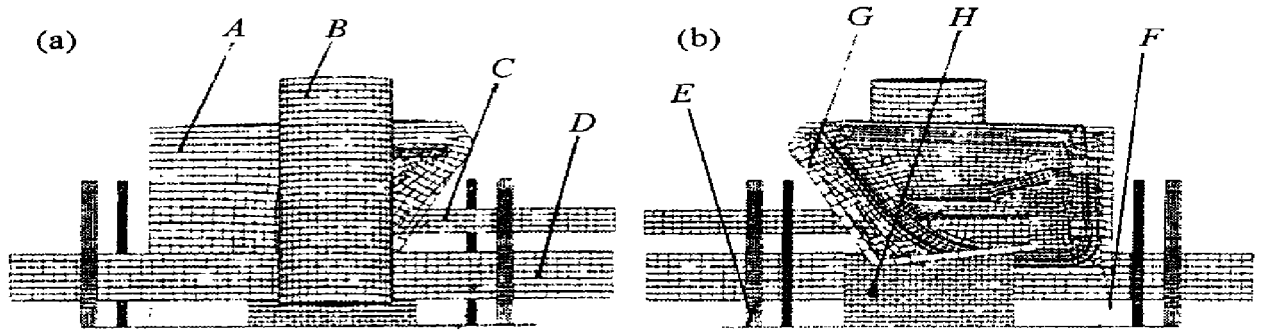


图3 装置的有限模型

Fig.3 Model of the set-up

在材料的选择上,车门结构和钢板等均采用图4所示的本构关系。图中的参数为: E 、 E_1 、 E_2 、 E_3 分别为 2.1×10^{11} 、 2.04×10^9 、 4.6×10^8 、 1.1×10^8 Pa, σ_y 、 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 2.5×10^8 、 2.6×10^8 、 3.0×10^8 、 3.04×10^8 Pa。 $\ln(l/l_0)$ 为应变, l_0 和 l 分别为变形前后的长度。

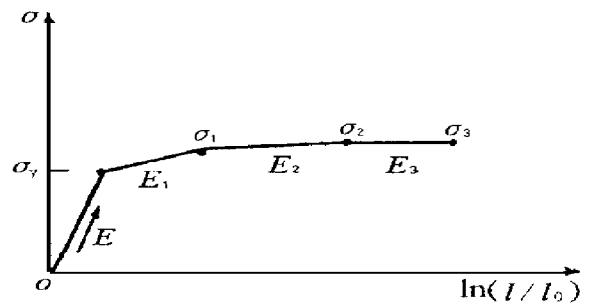
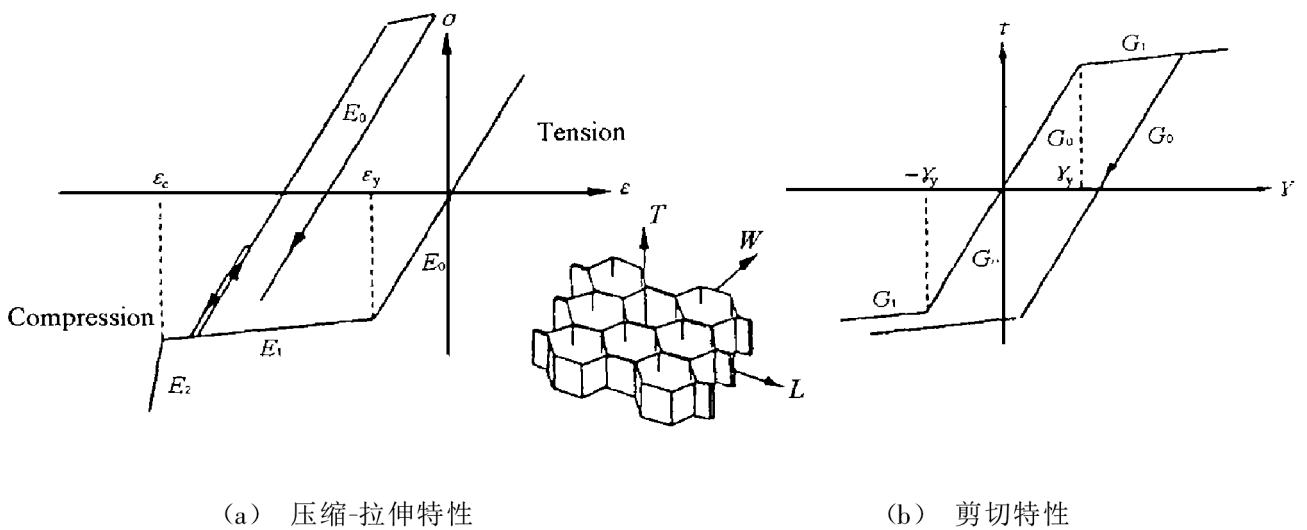


图4 弹塑性应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of elastic-plastic material

图5给出了蜂窝状材料的模型。图中 T 为轴向, L 、 W 分别为第一、第二侧向。在本文整体坐标 $o-xyz$ 设置下: $T \rightarrow y$, $L \rightarrow z$, $W \rightarrow x$ 。 $\epsilon_c = 1.6$, G_0 、 G_1 为剪切模量, τ 为剪切应力, 单位为 Pa, γ 为剪切应变。表1、2中给出了具体参数。



(a) 压缩-拉伸特性 (b) 剪切特性
 (a) Compression-tension characteristics (b) Shear characteristics

图5 蜂窝状材料的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of honeycomb material

表1 蜂窝状材料的材料参数(拉-压)

Table 1 The parameters of honeycomb material (compression-tension)

方向	ϵ_y	E_0/MPa	E_1/kPa	E_2/MPa
<i>T</i>	-0.04	56.3	100	100
<i>L</i>	-0.2	36	1	100
<i>W</i>	-0.2	18	1	100

表2 蜂窝状材料的材料参数(剪切)

Table 2 The parameters of honeycomb material (shear)

方向	γ_y	G_0/MPa	G_1/kPa
<i>TL</i>	0.05	24	1
<i>LW</i>	0.2	2.4	1
<i>WT</i>	0.2	17	300

3 结果与分析

在本文中,给出的模拟结果是在 HP 工作站上完成的。共模拟 50ms, 占用 CPU 时间 92.1ks。共得到两部分信息:整体结构的变形形态图和时间历史曲线。图 6 给出了 6 幅这样的图。和实验观察相比较,整体变形形态基本一致。

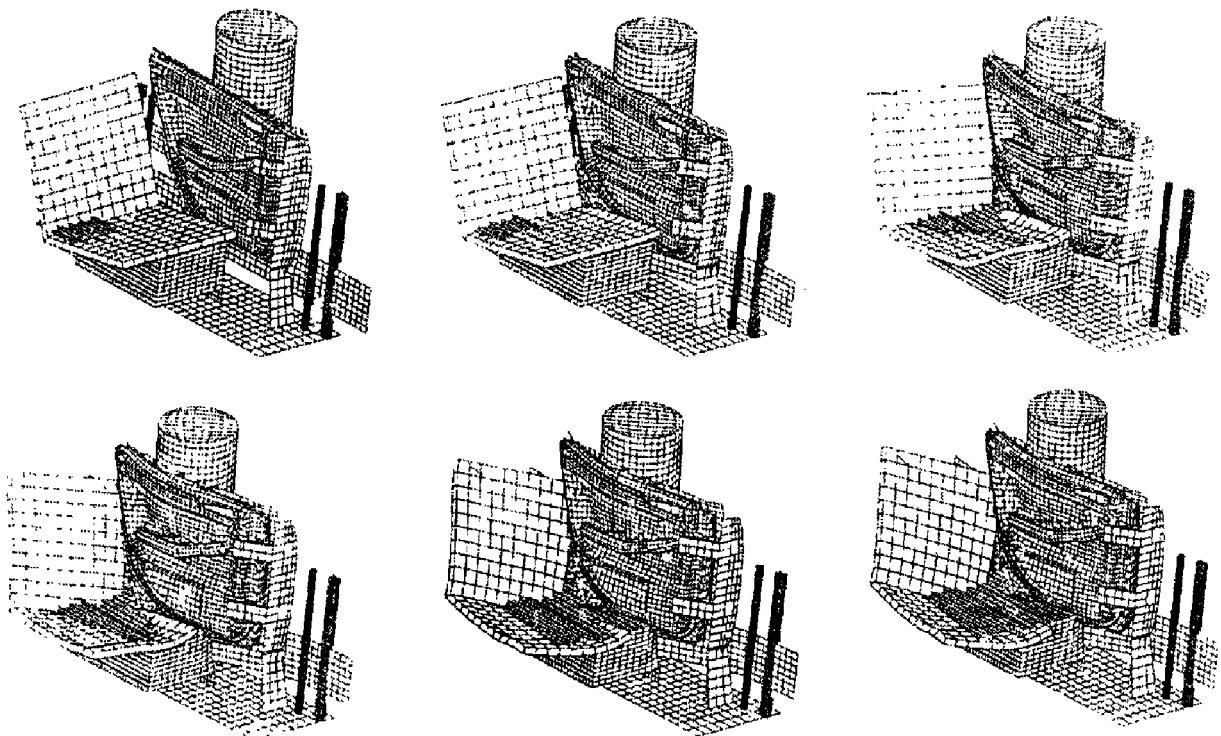


图6 门的变形图

Fig.6 Deformation process of the door

图 7 给出了小车的速度-时间曲线。这一参数至关重要。如果和实验相差较大,则难以进行比较门上测试点的速度。由图中可见,基本吻合。图 8 和图 9 分别给出了门上 1、2 两点的速度-时间曲线和实验结果的比较。过两点是门上和乘员胸腔等最易引起损伤部位的接触点。由图中可看出,速度的最大值和走向在 0.025s 之前模拟值和实验值基本一致。这是工程上最为关心的阶段,因为一般情况下,在这一阶段乘员的 v_{pass} 即达到较高值,之后变化幅值 Δv_{pass} 开始趋于平稳。2 点处的实验值在 0.03s 处有较大的波动。根据实验观察可能是如下原因:门体结构是由薄壁件组成的薄壁空心结构。测试点取于门的内侧,在外侧受到撞击时可能产生局

部屈曲而使内侧的变形发生急剧的变化。而在模拟中,如要想精确地模拟这类局部屈曲现象,必须在实验观察的基础上,采用合理地选取相当小尺度的单元分布等措施,这样将导致模拟成本的大幅度增加。我们提供的结果中未能更详细地模拟出这些现象,故造成较大误差。这是需要进一步改进的地方。

在动态数值分析中,时间步长必须保持稳定。在分析过程中,时间步长是由最小几何尺度的单元及材料常数等因数动态地决定的^[2]。一般略呈下降趋势,但不允许下降过甚。由图10中可见,时间步长的下降不超过0.07%,是相当稳定的。另一个判断运算稳定可靠的指标是整体结构的能量平衡。图11给出了分析过程中动能、内能和总能量的平衡图。随着时间的发展,动能逐渐下降,内能逐渐增加,总能量基本应保持不变。由图11可见能量保持了很好的平衡。由此可见整个模拟是稳定可靠的。

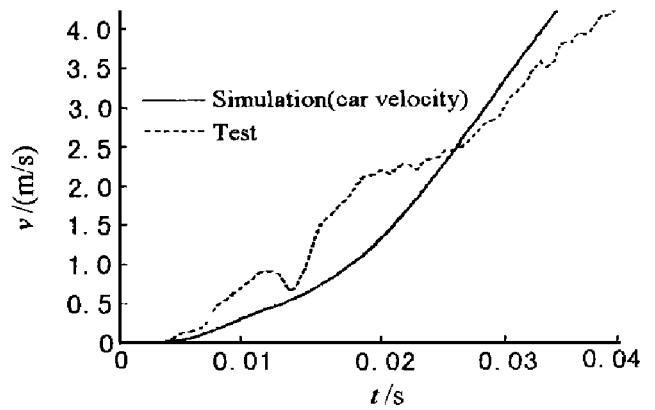


图7 小车速度的比较
Fig.7 Velocity of the car

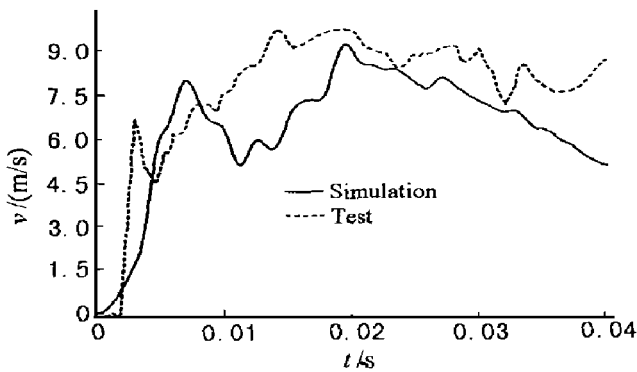


图8 1点处的速度-时间曲线
Fig.8 Velocity-time curve of point 1

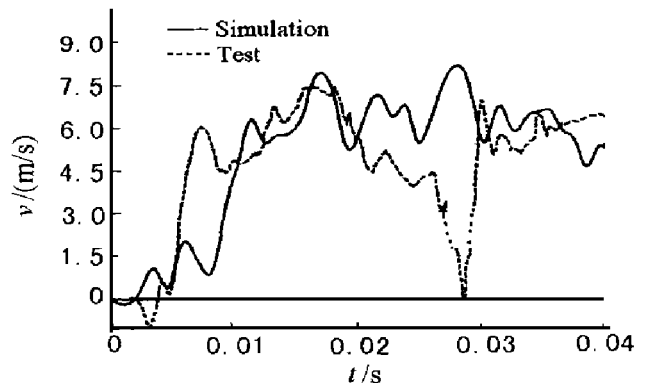


图9 2点处的速度-时间曲线
Fig.9 Velocity-time curve of the point 2

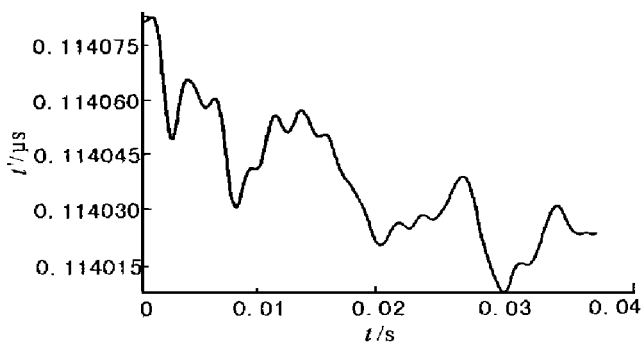


图10 时间步长曲线
Fig.10 Time-step curve

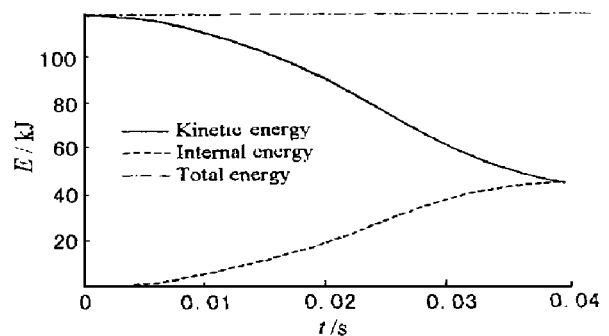


图11 能量平衡图
Fig.11 Energy balance curve

4 讨 论

在动态数值分析中,结构中某些部分之间的初始状态是相互不接触的,或相互接触形成一个界面,但不是用节点连接的。在变形过程中,他们可能相互接触而侵彻。在实际工程中这些界面之间是不允许相互侵彻的,仅传递作用力。为此必须在接触面间定义滑移接触面,滑移接触面是用来模拟结构和结构部分之间的相互作用。这些结构部分之间没有按标准有限元联接条件永久地连接,分析程序提供了多种选择形式。根据其机理可分为两类:一类是以大家熟知的罚函数公式为基础(Penalty fomulation),即接触面之间的几何侵彻是由和侵彻深度成正比的反作用力来阻止的;另一是运动约束型,它是利用运动方程去强加约束条件于接触界面而实现接触面间的相互作用。例如利用这一类滑移接触面可以去模拟工程上那些仅允许相互间滑移而不允许分离的界面。根据搜索方式的不同又可分为各种不同的形式。在本模拟中,共定义了18个这样的滑移接触面,很好地完成了整个动力响应的分析。

结构中某些部分在整个结构变形过程中变型相对较小,且对其内力和变形又不是我们的兴趣所在。可采用“null”类型的材料,然后定义为刚体,这样既可保证这些刚体部分在整个运动过程中和其他部分正确作用,而又可节省CPU的占用时间,从而降低了计算成本。如碰撞体、刚架等即被定义为刚体,这样大大加快了运算速度。

零能量变形模态(即Hourglass现象)是由于采用了较少积分点的高斯积分而产生的一种零能量无限变形的变形模态。本模拟中采用了适当的Hourglass控制系数及对不同种类的单元采用不同积分点的措施,收到很好的效果。更详细的讨论可参考文献[3]。

参 考 文 献

- 1 Cavanagh J, Zhu Y, Huang Y, et al. Injury and Response of the Thorax in the Side Impact Cadaveric Tests. SAE paper No. 933127
- 2 PSI, the Software company of ESI Group. PAM-CRASH Reference Manual. 1997
- 3 Flanagan D P, Belytschko I. A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with Orthogonal Hourglass Control. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1981, 17: 679 ~ 706

NUMERICAL DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS ON THE REAR SIDE DOOR OF A CAR SUBJECTED TO THE SIDE IMPACT

Zhao Longmao, Yang Guitong

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024)

ABSTRACT This paper represents a numerical dynamic response analysis on the rear side door of a car subjected to the side impact. This simulation is stable and creditable according to the energy balance results and the stability of the time-step curve. The result was validated by test.

KEY WORDS side impact, dynamic response, numerical analysis