

车辆与避险车道末端挡墙碰撞的数值模拟分析

覃频频, 莫基强, 侯晓磊, 张绍坤

广西制造系统与先进制造技术重点实验室(广西大学机械工程学院), 广西 南宁
Email: qpinyin@gxu.edu.cn

收稿日期: 2020年10月2日; 录用日期: 2020年10月12日; 发布日期: 2020年10月27日

摘要

设置在避险车道末端的末端挡墙, 是避险车道的最后一道屏障, 但其设置存在不合理性。为此, 利用 Ls-Dyna 软件分别建立素混凝土挡墙和钢筋混凝土挡墙有限元模型, 并根据不同的车辆及道路因素, 对失控车辆与挡墙的碰撞过程进行模拟仿真, 并对仿真结果进行评价。结果表明: 失控车辆与挡墙碰撞时的接触力、驾驶室侵入量均随着碰撞速度的增大而增大, 且素混凝土、钢筋混凝土挡墙的碰撞接触力、侵入量差距不大, 且钢筋混凝土挡墙对车辆的约束性更强, 能够使车辆速度进一步降低。

关键词

避险车道, 车辆碰撞, 有限元法, 钢筋混凝土

Numerical Simulation Analysis of Vehicle Crash with Retaining Wall of Emergency Escape Ramp

Pinpin Qin, Jiqiang Mo, Xiaolei Hou, Shaokun Zhang

Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System & Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi
Email: qpinyin@gxu.edu.cn

Received: Oct. 2nd, 2020; accepted: Oct. 12th, 2020; published: Oct. 27th, 2020

Abstract

The retaining wall set at the end of emergency escape ramp is the last barrier of EER, but its setting is unreasonable. In view of this, Ls-Dyna software was used to establish finite element models

of concrete retaining wall and reinforced concrete retaining wall; then the simulation of vehicles crash with the retaining wall was carried out, and the simulation results were evaluated. The results show that when the vehicle crashes with the retaining wall, the contact force and the intrusion amount of the cab increase with the increase of the crash speed, and the crash contact force and intrusion amount of the concrete and reinforced concrete retaining walls are not much different. The reinforced concrete retaining wall has a stronger restraining effect on the vehicle and can further reduce the vehicle speed.

Keywords

Emergency Escape Ramp, Vehicle Impact, FEM Reinforced Concrete

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

避险车道指为使主线车流中的制动失效车辆能够减慢行驶速度并且最终停止下来, 在主线道路旁设置的一种辅助车道[1]。避险车道通常靠制动床和末端减速消能设施使失控车辆强制减速, 但可能受天气、场地限制等原因造成有些制动失效车辆驶入了避险车道, 但驾驶员仍然不能逃脱严重伤残或死亡的厄运[2]。当末端挡墙强度过高时, 未能在制动床及消能设施的制动减速作用下静止的失控车辆与其发生碰撞时, 极易对车内乘员造成伤害, 严重时可能造成车毁人亡, 因此对末端挡墙进行合理地设计显得尤为重要。

2. 挡墙有限元模型

挡墙倾角 0%, 宽 4 m, 高 1.5 m, 厚度 0.25 m, 建模时对挡墙建立柱脚, 柱脚施加边界约束条件为全约束(即 3 个平动自由度和 3 个转动自由度均约束), 挡墙使用 C20 强度混凝土, 见图 1。

其中钢筋材料使用双线型随动强化模型**MAT_3*, 在该材料模型中使用应变失效准则来实现钢筋单元的失效, 在材料参数中定义钢筋的失效应力, 当仿真过程中钢筋应变达到设定的阈值, 则判定钢筋单元失效断裂, 本文使用 HPB235 钢筋。

在 LS-DYNA 中, 能够用来表达混凝土材料的材料模型有很多, 包括混凝土损伤模型[3] [4] (*MAT_72*)、HJC 模型[5] [6] (*MAT_111*)。根据不同的研究类型, 选用不同的材料模型, 例如 *MAT_72* 被广泛运用于混凝土爆炸冲击分析, HJC 模型[7]适用于较高应变率作用下的混凝土材料侵彻分析,

针对高速公路安全防护研究, 美国联邦公路局设计出一个能很好地模拟混凝土材料应力应变关系的**MAT_CSCM_CONCRETE* 材料模型, 用来模拟路边钢筋混凝土防护结构与车辆碰撞的动态性能[8], 本文混凝土材料使用 CSCM 模型。

3. 车辆及道路因素对挡墙应用的影响分析

对于行驶于国道以及省道上的货车, 不同的道路条件及限速的不同会导致车辆驶入避险车道时的速度不经相同, 而且现存的以及新建的避险车道的坡度不同也可能导致失控车辆在避险车道出现差异性。针对以上提出的三个因素, 包括失控车辆速度以及避险车道设置坡度, 本节将对不同车辆及道路因素对失控车辆与挡墙碰撞结果所产生的差异性进行研究, 车-挡墙碰撞模型如图 2、图 3 所示。

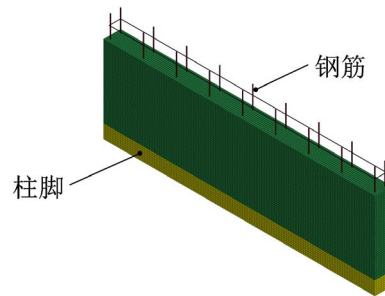


Figure 1. RC retaining wall
图 1. 钢筋混凝土挡墙

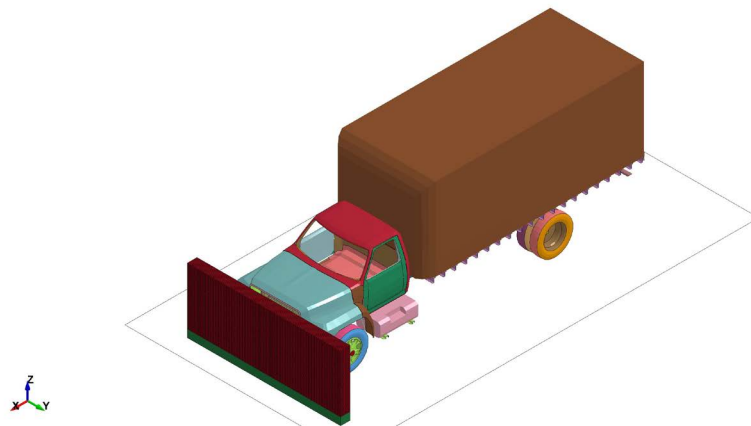


Figure 2. Crash model of concrete retaining wall
图 2. 素混凝土挡墙碰撞模型

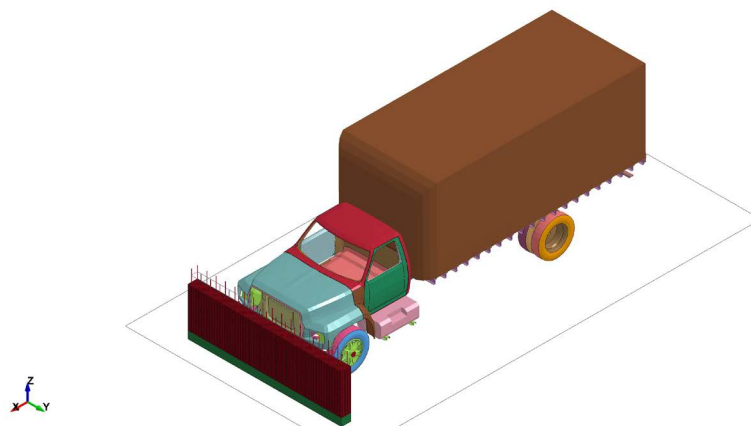


Figure 3. Crash model of RC retaining wall
图 3. 钢筋混凝土挡墙碰撞模型

3.1. 失控车辆速度的影响

3.1.1. 侵入量分析

失控车辆以较大速度与挡墙发生碰撞时，车辆会发生吸能变形，当变形量过大时很有可能会对车内驾驶员及乘员造成伤害。分别选取仪表台侵入量、踏板侵入量及车门变形量作为参考量，用以评价不同碰撞速度的车辆与挡墙发生碰撞时车内乘员的安全保障。图4、图5、图6和图7分别是碰撞速度为10 km/h、

20 km/h、30 km/h、40 km/h 的失控车辆与挡墙发生碰撞过程中仪表台的侵入量变化曲线。

从表 1 的分析结果可以知道, 车辆与挡墙发生碰撞后, 侵入最严重的位于仪表台初, 其中在碰撞速度 40 km/h 这一工况条件下, 无论是素混凝土挡墙还是钢筋混凝土挡墙, 其最大侵入量均在 45 mm 左右; 而踏板侵入量以及左右车门变形量均较微小, 而且随着碰撞速度的增大其侵入量及变形量也略微增加。除此之外, 无论是素混凝土挡墙还是钢筋混凝土挡墙, 两种形式的挡墙在结果上均相差不大。

最后, 踏板侵入量远小于法规[9]规定值 50 mm; 同时在参考了文献[10] [11]后, 在不同碰撞速度下的各个侵入量, 除了 40 km/h 碰撞速度时的仪表台侵入量略微超出其设定标准外, 其余侵入量及变形量不大且在符合设计标准。可见末端挡墙不仅能够给予车辆一定减速制动效果的同时, 而且不易对车内乘员造成伤害, 是给予失控车辆约束的最后一道关卡。

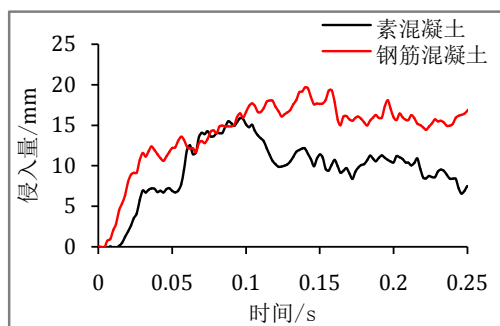


Figure 4. Curve of intrusion at 10 km/h
图 4. 10 km/h 仪表台侵入曲线

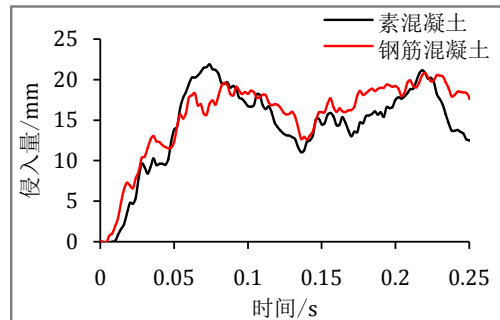


Figure 5. Curve of intrusion at 20 km/h
图 5. 20 km/h 仪表台侵入曲线

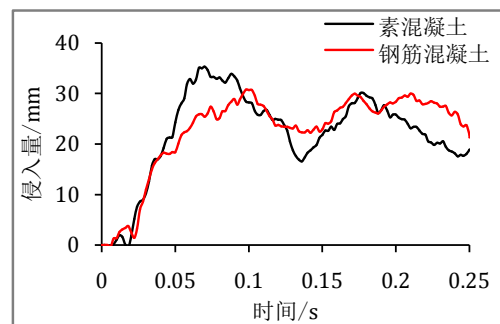


Figure 6. Curve of intrusion at 30 km/h
图 6. 30 km/h 仪表台侵入曲线

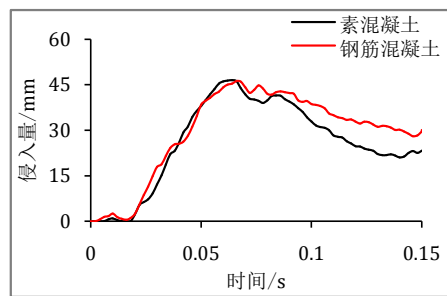


Figure 7. Curve of intrusion at 40 km/h

图 7. 40 km/h 仪表台侵入曲线

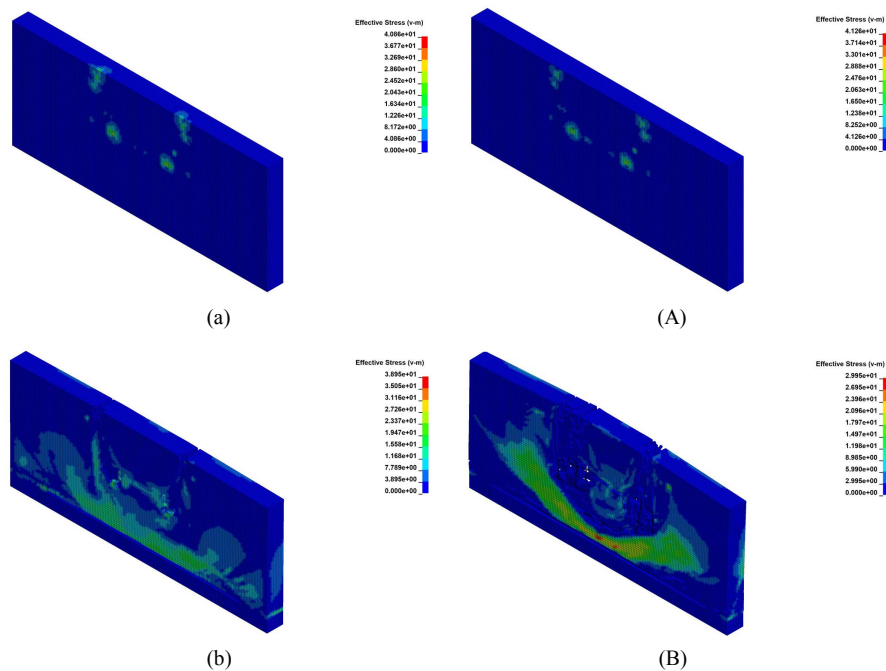
Table 1. The max intrusion at different crash velocity

表 1. 车辆在不同碰撞速度下的最大侵入量

测量项		10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h
仪表台最大侵入量(mm)	素	15.8	22.2	34.7	45.2
	钢筋	19.7	20.3	30.2	45.1
踏板最大侵入量(mm)	素	3.5	3.6	4.5	7.6
	钢筋	3.8	4.1	6.1	14.0
左车门最大变形(mm)	素	5.6	5.9	7.6	8.2
	钢筋	4.9	4.5	7.0	12.3
右车门最大变形(mm)	素	5.9	7.6	10.6	11.6
	钢筋	3.3	3.4	2.9	5.4

3.1.2. 挡墙应力分析

以碰撞速度 40 km/h 的车 - 挡墙模型为例, 分别对素混凝土挡墙以及钢筋混凝土挡墙在受到失控车辆撞击情况下的应力变化规律进行分析。如图 8 所示, 其中 a、b、c、d 为素混凝土挡墙, A、B、C、D 为钢筋混凝土挡墙。



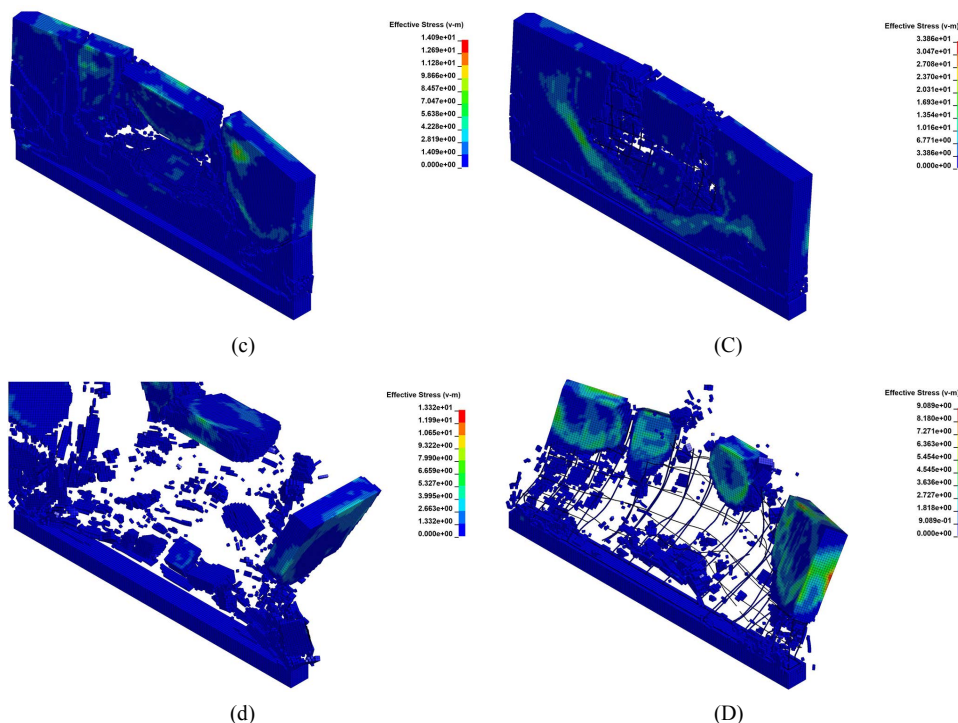


Figure 8. Process of stress distribution of retaining wall
图 8. 挡墙应力分布变化过程

1) 失控车辆与挡墙发生碰撞的初始阶段, 如图 8 中的(a)和(A)所示。失控车辆与挡墙发生接触, 挡墙应力主要分布在与车辆发动机舱前端突出部位, 素混凝土挡墙与钢筋混凝土挡墙情况相似。

2) 挡墙应力开始拓展, 如图 8 中的(b)和(B)所示。挡墙应力开始扩散, 并且主要集中于在挡墙与柱脚周围区域, 其中, 在挡墙左右两端分布较少, 更加集中分布在失控车辆与挡墙相接触的中部区域。并且挡墙开始出现裂纹破坏, 部分混凝土单元被破坏删除。

3) 挡墙柱脚连接处破坏, 并且产生大裂缝, 图 8 中的(c)和(C)所示。在这个阶段, 素混凝土挡墙柱脚连接处基本被完全破坏掉, 而钢筋混凝土挡墙的柱脚处也同样开裂, 柱脚处钢筋也断裂严重, 但程度要比素混凝土挡墙好一点; 并且, 随着柱脚处的破坏, 上一阶段的应力集中分布区域应力开始扩散与较少。

4) 挡墙被完全冲破, 失控车辆冲向网兜, 图 8 中的(d)和(D)所示。在碰撞后期, 素混凝土挡墙以及钢筋混凝土挡墙均被失控车辆完全冲破, 其中, 素混凝土挡墙碎裂严重, 钢筋混凝土挡墙钢筋断裂, 挡墙对于车辆的约束作用基本丧失。

3.1.3. 接触力分析

车辆与挡墙的碰撞是一个涉及材料非线性、接触非线性的过程, 本节将选用速度为 40 km/h、30 km/h、20 km/h、10 km/h 的失控车辆与素挡墙、钢筋混凝土挡墙碰撞的接触力随时间变化的曲线进行对比分析。

如图 9、图 10、图 11 和图 12 所示, 无论是钢筋混凝土挡墙还是素混凝土挡墙, 在受到失控车辆撞击时, 均在较短时间内完成了撞击过程。基于本文的车-挡墙碰撞模型, 为了提高计算时间和效率, 本节选取 0.15 s 作为结束计算时间。

图中可以观察到, 本文选取的任意一种碰撞速度中, 在碰撞初期接触力逐渐增大的过程中, 接触力均存在多段性, 即车辆与挡墙发生接触后, 接触力迅速增大到第一个峰值并震荡, 随后接触力继续迅速增大到最大值; 在同样的碰撞速度下, 无论是素混凝土挡墙还是钢筋混凝土挡墙, 其接触力峰值均相差

无几。接触力达到最大值后，随着挡墙被冲破撞毁，接触力迅速释放，并且其释放速率随着碰撞速度的增加而增大；在接触力释放阶段，相较于钢筋混凝土挡墙，由于素混凝土挡墙受到的更多为脆性破坏，所以其释放速率要比钢筋混凝土挡墙更快；而钢筋混凝土挡墙在接触力释放阶段仍然对失控车辆存在着一定的减速消能作用，但随着碰撞速度的增大，其在受到车辆撞击时所发生的脆性破坏也会增多，碰撞后期对车辆的约束作用也逐渐弱化。当碰撞速度为 10 km/h 时，最大接触力大约为 0.5 MN；当碰撞速度为 20 km/h 时，最大接触力大约为 1 MN；当碰撞速度为 30 km/h 时，最大接触力大约为 1.38 MN；当碰撞速度为 40 km/h 时，最大接触力大约为 1.5 MN。

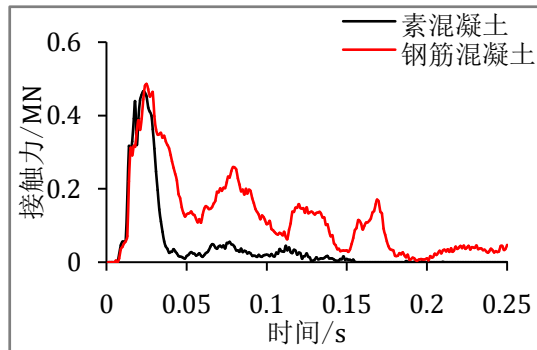


Figure 9. Contact force curve at 10 km/h

图 9. 10 km/h 接触力曲线

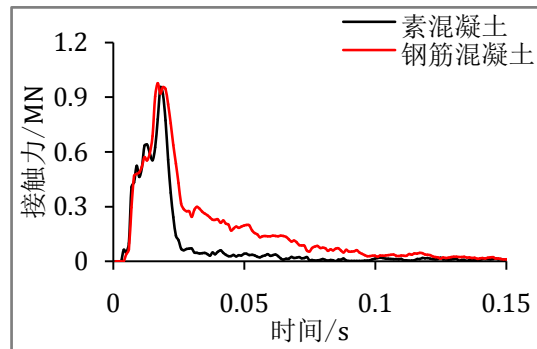


Figure 10. Contact force curve at 20 km/h

图 10. 20 km/h 接触力曲线

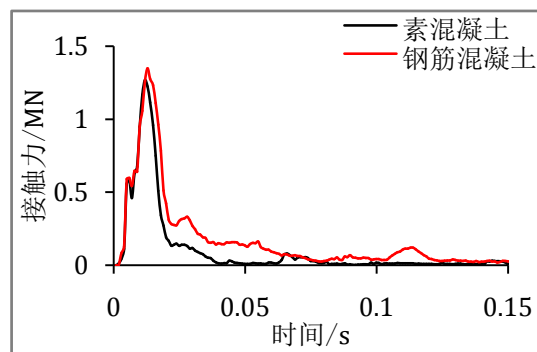


Figure 11. Contact force curve at 30 km/h

图 11. 30 km/h 接触力曲线

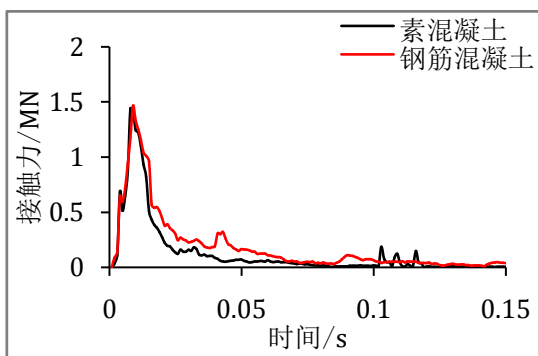


Figure 12. Contact force curve at 40 km/h
图 12. 40 km/h 接触力曲线

3.2. 避险车道坡度的影响

在山区公路及高速公路上，由于地形限制等原因，避险车道的坡度大小存在差异，为了研究不同坡度的避险车道对于车 - 挡墙碰撞的影响，考虑到设计中主要考虑上坡型避险车道，本节选取撞击速度为 30 km/h 的车辆分别在 0%、5%、10%、15% 的四个坡度条件建立碰撞模型并分析。下图 13 为坡度示意图。

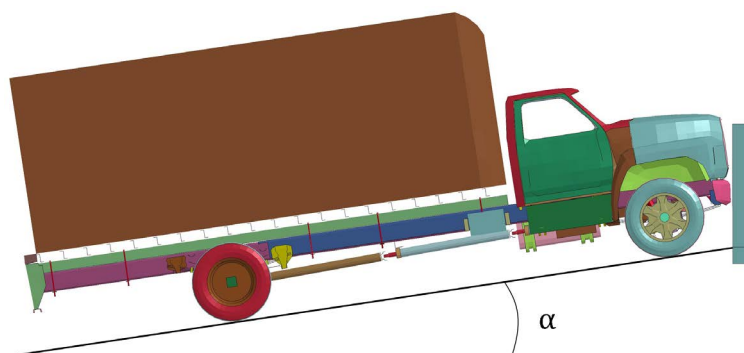


Figure 13. Diagram of slope of EER
图 13. 避险车道坡度示意图

3.2.1. 车辆速度及加速度变化

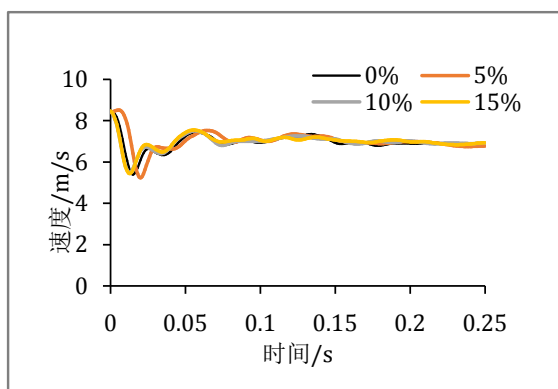


Figure 14. Curve of velocity of concrete
图 14. 素混凝土速度曲线

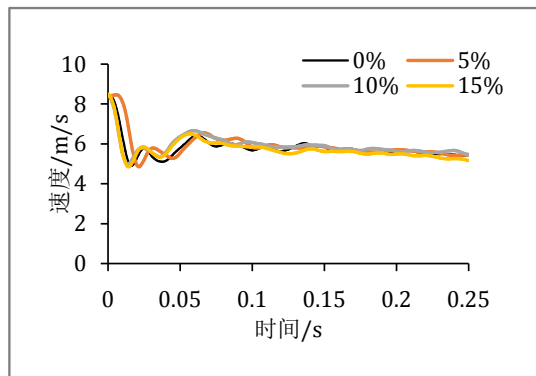


Figure 15. Curve of velocity of RC

图 15. 钢筋混凝土速度曲线

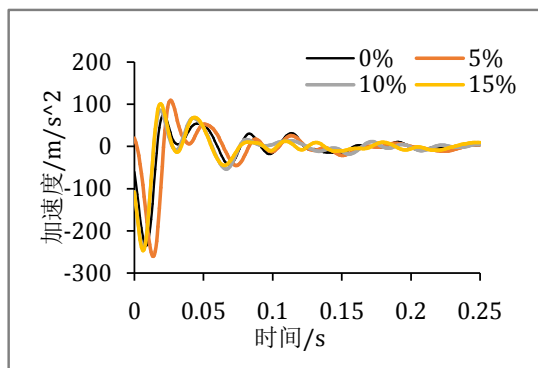


Figure 16. Curve of acceleration of concrete

图 16. 素混凝土加速度曲线

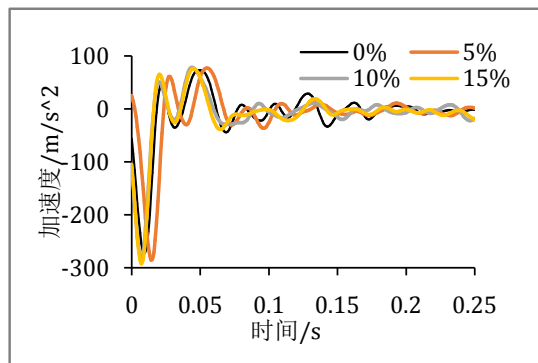


Figure 17. Curve of acceleration of RC

图 17. 钢筋混凝土加速度曲线

图 14 与图 15 展示的是在不同避险车道坡度的道路条件下, 失控车辆分别与素混凝土挡墙、钢筋混凝土挡墙发生接触碰撞后的速度变化曲线。可以知道, 在四个不同坡度下, 失控车辆与素混凝土挡墙碰撞后, 车辆速度由 30 km/h 迅速降低至最低 19 km/h 左右, 随后随着挡墙被冲破, 对失控车辆的约束性降低, 车速再次增加, 并最终维持在 25 km/h 左右。失控车辆与钢筋混凝土挡墙碰撞后, 车辆速度由同样的 30 km/h 降低至最低 18 km/h, 不同于素混凝土挡墙, 在挡墙受到撞击损坏后, 即使车速在达到最低值时有重新上升的趋势, 但钢筋仍然对车辆保持着约束作用, 失控车辆车速最终降低 18 km/h。无论是素混

凝土挡墙还是钢筋混凝土挡墙，不同坡度条件的失控车辆-挡墙碰撞速度都不存在太大的差异性。

图 16 与图 17 代表的是不同坡度条件下的加速度变化曲线，相比于素混凝土挡墙，钢筋混凝土挡墙能给失控车辆更大的加速度：与挡墙发生接触后，失控车辆在 0.07 s 左右达到最大加速度，其中素混凝土挡墙条件下，车辆最大加速度达到了 24.9 g；钢筋混凝土挡墙条件下，车辆的最大加速度达到了 29.8 g。

3.2.2. 能量变化

两种挡墙形式下的碰撞，均伴随有少量的沙漏能的增加，系统动能与内能相互转化，且在相同情况下，钢筋混凝土挡墙能够比素混凝土挡墙吸收更多的动能。不同形式挡墙，不同道路坡度的碰撞数值模拟的能量变化分析，见表 2：相同坡度的情况下，钢筋混凝土挡墙能够比素混凝土挡墙吸收更多的失控车辆动能，例如 0%坡度的道路下，车辆与素混凝土挡墙碰撞后动能剩余 0.272 MJ，而与钢筋混凝土挡墙碰撞后动能剩余 0.194 MJ。同时，随着道路坡度的增加，车辆的撞后动能也逐渐降低，例如，对于钢筋混凝土挡墙，15%坡度的条件下，失控车辆撞后动能降至 0.153 MJ，想比于 0%坡度条件下的车辆撞后动能，降低了 0.41 MJ。并且，得益于建模过程中对沙漏能的控制，各组仿真中沙漏能均小于 5%，数据结果可信性和有效性得到了验证。其中，坡度的存在以及碰撞过程中挡墙单元的损伤均会导致总能量的降低。

Table 2. Energy statistic at different crash slopes

表 2. 不同碰撞坡度能量变化

坡度	挡墙类型	初始能量	撞后动能	吸能率	沙漏能比	损能比
		MJ	MJ	%	%	%
0%	素	0.377	0.272	27.9	1.9	7.5
	钢筋	0.377	0.194	48.5	2.4	6.3
5%	素	0.377	0.271	28.1	1.8	9.5
	钢筋	0.377	0.189	49.9	2.5	1.6
10%	素	0.377	0.268	28.9	1.7	9.5
	钢筋	0.377	0.179	52.5	2.3	5.3
15%	素	0.377	0.260	31.0	1.8	12.5
	钢筋	0.377	0.153	59.4	2	7.4

4. 结论

通过建立素混凝土挡墙和钢筋混凝土挡墙，从车辆道路因素出发，分别对比研究了失控车辆与挡墙发生碰撞过程中的差异性，得到了以下结论：失控车辆与挡墙碰撞时的接触力、驾驶室侵入量均随着碰撞速度的增大而增大，且素混凝土、钢筋混凝土挡墙的碰撞接触力、侵入量差别不大；碰撞接触力随着避险车道坡度的增大而略微减小，但由于失控车辆与挡墙的碰撞过程时间较短，不同坡度对失控车辆剩余速度的影响不大。钢筋混凝土挡墙对失控车辆具有更好的约束性，但其也可能对车内乘员造成伤害。

基金项目

广西自然科学基金(2019JJA160121)。

参考文献

- [1] Truck Escape Ramps (1986) California: Traffic Bulletin (No. 24).
- [2] 陈垂策. 避险车道布设对车辆系统动力学的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2017.

-
- [3] 杜彬. 钢筋混凝土结构在车辆撞击作用下的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [4] 朱聪. 碰撞冲击荷载下钢筋混凝土结构的动态响应及损伤机理[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5] Malvar, L.J., Crawford, J.E. and Morrill, K.B. (2000) Concrete Material Model, Release III: Automated Generation of Material Model Input. Karagozian & Case Structural Engineers; Glendale, CA, USA: 2000. Report TR-99-24.
- [6] 吴琼. 基于 LS-DYNA 的车-桥墩碰撞分析及可靠度研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [7] Holmquist, T.J. and Johnson, G.R. (2011) A Computational Constitutive Model for Glass Subjected to Large Strains, High Strain rates and High Pressures. *Journal of Applied Mechanics*, **78**, Article ID: 051003. <https://doi.org/10.1115/1.4004326>
- [8] Murray, Y.D. (2007) Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159. United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology.
- [9] 中国汽车技术研究中心. C-NCAP 管理规则[M]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2018.
- [10] 赵强. 轻型货车正面碰撞安全性能分析与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2016.
- [11] 王大志. 基于乘员保护的汽车正面碰撞结构设计与变形控制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2006.