

车辆与新型柔性限高架碰撞简化模型研究

陶江峰

平顶山市公路工程公司, 河南 平顶山

收稿日期: 2023年5月23日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

本文提出了可供车辆与刚性、柔性两类限高架碰撞简化计算的三自由度质量-弹簧模型, 并从撞击力、位移等方面对比简化模型与两类限高架有限元模型的计算结果。结果表明: 柔性限高架撞击过程中的撞击力、累积撞击冲量、撞击力峰值、车辆位移、限高架横梁与立柱位移的计算较为准确, 刚性限高架撞击过程中的动力响应计算误差相对更大, 但在可接受范围内, 说明质量-弹簧模型对于车辆与限高架碰撞问题有较高适用性和准确性。

关键词

限高架, 质量-弹簧模型, 有限元分析, 碰撞

Research on Simplified Model for Collision between Vehicles and New Flexible Height Restriction Barrier

Jiangfeng Tao

Pingdingshan Highway Engineering Company, Pingdingshan Henan

Received: May 23rd, 2023; accepted: Jul. 21st, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

This paper presents a three degree of freedom mass-spring model for simplified calculation of vehicle impact with rigid and flexible height restriction barriers, and compares the calculation results of the simplified model with the finite element models of the two types of height restriction barriers in terms of impact force, displacement, and other aspects. The results show that the calculation of the impact force, cumulative impact impulse, peak impact force, vehicle displacement, and displacement of the overhead beam and column in the flexible height restriction barrier is

more accurate. The calculation error in the rigid height restriction barriers is relatively larger, but within an acceptable range, indicating that the mass-spring model has high applicability and accuracy for the impact problem between vehicle and height restriction barrier.

Keywords

Height Restriction Barrier, Mass-Spring Model, Finite Element Analysis, Collision

Copyright © 2023 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

车辆与结构的碰撞问题通常采用精细化的有限元数值模拟技术进行计算, 但因其建模复杂, 计算时间长, 在实际工程中难以大量推广应用。为推广研究成果在工程中的应用, 一些关于冲击碰撞问题的简化力学模型和动力学分析方法也被提出来。

Bischoff [1]将冲击问题分为软冲击和硬冲击, 软冲击指撞击体变形远远大于被撞结构物, 硬冲击指撞击体变形较小或与被撞结构物变形大小相当, 分别推荐采用单自由度和双自由度质量 - 弹簧模型对其进行分析。Vrouwenvelder [2]提出了单自由度的质量 - 弹簧和等效弹性杆撞击刚性墙模型, 模拟车辆碰撞问题, 并经过了试验数据的校正参数。刘少源[3]根据实车碰撞试验结果提出了柔性梁法, 来计算汽车与半刚性护栏碰撞问题。张誉、赵鸣、姚启明[4] [5] [6]等对车辆 - 护栏碰撞问题进行了简化, 根据刚体运动原理建立了车辆与护栏的质量 - 弹簧简化力学模型, 研究了汽车与护栏碰撞后的运动轨迹和撞击力。Cao [7]利用大量有限元模拟结果, 提出了车辆撞击时程曲线模型; Chen 等[8]采用质量 - 弹簧 - 阻尼模型对中型卡车的碰撞问题进行简化; 方乐[9]进一步地采用粒子群优化算法, 对中型卡车力学模型进行了参数优化。

本文针对限高架与车辆的碰撞问题, 提出可简化计算的三自由度质量 - 弹簧模型。建立动力微分方程, 通过准静态加载有限元模拟试验得到车辆、刚性限高架、新型柔性限高架的变形刚度参数, 从撞击力、位移等方面对比简化模型与两类限高架有限元模型的计算结果, 研究该模型在限高架碰撞问题中的适用性, 从而大大减少分析时间, 更适用于实际工程设计。

2. 质量 - 弹簧模型

文献[10]对车辆与新型柔性限高架的碰撞分析过程可以发现, 撞击力以水平方向的分量为主, 力学模型中可以仅考虑水平方向的平动自由度。新型柔性限高架横梁与立柱使用弹簧铰支座连接, 横梁表现出多段变形刚度的特征, 可以将限高架分为 2 个部分建立力学模型。车辆前围框架在变形过程中以塑性变形为主, 并有玻璃、蒙皮的破坏、框架断裂, 在速度降为 0 m/s 之后的阶段的恢复变形刚度的测量很困难, 限高架的恢复变形刚度受变形程度、构件变形耦合、重力作用等因素的影响, 难以建立简化力学模型, 且车辆与限高架的塑性变形在此之后基本停止, 因此以车辆速度降为 0 m/s 时刻作为简化力学模型的终止时间, 此时刻之前的数据为有效数据, 与有限元模型结果对比。

根据以上分析, 将车辆与限高架的撞击问题简化为三自由度的质量 - 弹簧力学模型, 并作出以下四点基本假设:

- 1) 忽略车辆与地面、车辆与限高架的摩擦力;
- 2) 忽略结构阻尼, 结构阻尼较小, 在短时间的撞击过程中对结构位移和撞击力影响较小;
- 3) 车辆简化为单自由度质量块, 考虑车辆在碰撞过程中前部的局部变形, 以弹簧系数 k_1 的无质量弹簧表示;
- 4) 限高架的横梁和立柱分别简化为单自由度质量块, 以弹簧系数 k_2 和 k_3 的无质量弹簧表示其变形刚度, 不考虑薄弱点螺栓断开。

车辆与限高架碰撞问题的质量 - 弹簧模型如图 1 所示, 对应的振动微分方程如公式 1 所示。

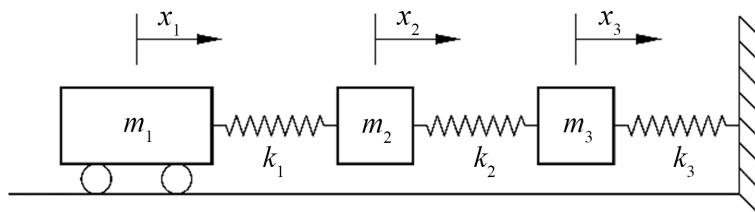


Figure 1. Mass-spring model
图 1. 质量 - 弹簧模型

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2 - x_3) + b_1 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 - k_1(x_1 - x_2 - x_3) - b_1 + k_2(x_2 - x_3) + b_2 = 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 - k_2(x_2 - x_3) - b_2 + k_3 x_3 + b_3 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_1, m_2, m_3 —— 车辆质量、限高架横梁和立柱的质量;

x_1, x_2, x_3 —— 车辆位移、限高架横梁位移、立柱位移;

k_1, k_2, k_3 —— 车辆、限高架横梁和立柱的变形刚度;

b_1, b_2, b_3 —— 弹性力 $k_i x + b_i$ 的截距。

车辆的初始速度为 10 m/s, 初始位移为 0 m, 限高架横梁和立柱的初始位移和速度均为 0 m/s, 上述方程初始条件为 $x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0$, $\dot{x}_1(0) = 10$, $\dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = 0$ 。

撞击力根据车辆的变形刚度和变形量计算, 如公式 2 所示。

$$F = k_1(x_1 - x_2 - x_3) + b_1 \quad (2)$$

3. 计算参数确定

3.1. 车辆参数确定

车辆为从 NCAC 模型数据库中选取一辆半承载式客车, 质量为 13.74 t。在与限高架的撞击过程中, 车辆多个构件的耦合作用和蒙皮玻璃等单元的失效使车辆变形刚度的测量和计算成为难点。本文通过对有限元模型[10]中的车辆进行准静态加载试验, 得到车辆的变形刚度, 虽然车辆的静态与动态力学性能有所差别, 但对于简化的质量 - 弹簧力学模型有一定适用性。

静态位移加载时, 将车辆固定, 对撞击高度的刚性梁施加位移边界条件, 以 0.01 m/s 的速度向车辆移动, 刚性梁的位移即为车辆前部的变形量, 根据有限元计算结果, 提取位移边界的边界力, 与刚性梁的位移组成边界力 - 位移曲线, 曲线的斜率即为车辆的变形刚度, 如图 2 所示。从图 2、图 3 中可以看出, 准静态的位移加载虽然速度较低, 仍然会使结构产生惯性力, 引起曲线波动, 但波动幅度不大, 边界力与位移有明显的分段线性正相关性, 因此将曲线简化为 2 段直线, 简化后边界力与位移的关系如公式 3 所示。

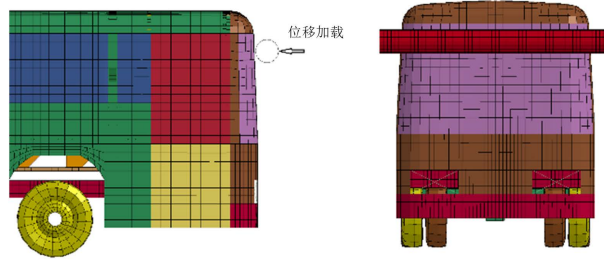


Figure 2. Quasi-static displacement loading of vehicle
图 2. 车辆准静态位移加载

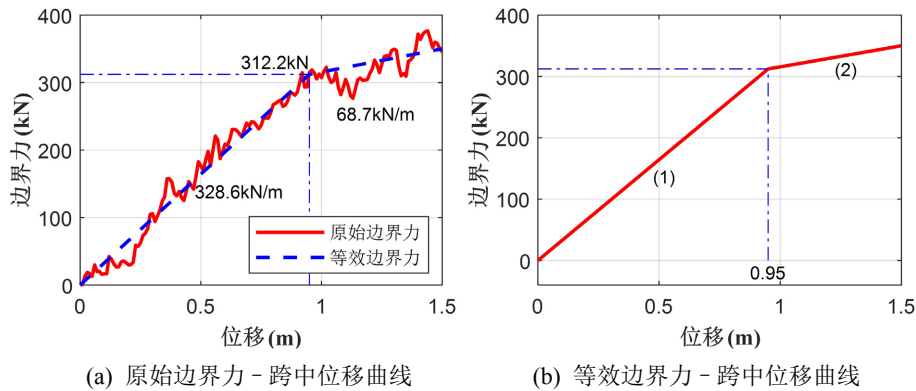


Figure 3. Vehicle boundary force-displacement curve
图 3. 车辆边界力 - 位移曲线

$$y = \begin{cases} 328.6x, & (1) x \leq 0.95 \\ 68.7x + 246.9, & (2) x > 0.95 \end{cases} \quad (3)$$

3.2. 刚性限高架参数确定

根据刚性限高架的体积和密度计算得到，横梁的质量为 1232 kg，立柱的质量为 556 kg。

采用准静态位移加载来计算刚性限高架横梁和立柱的变形刚度。横梁在准静态位移加载时，梁端设置为固定支座，根据车辆前围框架与限高架横梁的撞击位置，在横梁距离跨中 1.2 m 处的截面设置 2 个位移边界条件，以 0.01 m/s 的速度移动。立柱的准静态位移加载时，位移边界条件设置在柱顶截面，边界位移即为构件的变形量，如图 4 所示。提取位移边界的边界力，得到边界力 - 跨中位移曲线，如图 5、图 6 所示。

从图 5 中可以看出，刚性限高架横梁的原始边界力 - 位移可简化为 3 段直线，变形量达到 0.17 m 后变形刚度开始减小，这是材料的弹塑性特征引起构件的弹塑性变化；变形量达到 0.6 m 后变形刚度又开始增大。但是，实际撞击过程中，立柱对横梁端部的约束相当于半刚性固定支座，而准静态位移加载时横梁端部是完全刚性的固定支座，刚性固定支座会导致横梁的变形刚度偏大，这种刚度偏大会随横梁变形量增加而增加。因此，忽略曲线第三阶段的刚度增加，将原始边界力 - 位移曲线简化为 2 段，简化后边界力与位移的关系如公式 4 所示。

从图 6 中可以看出，立柱的边界力 - 位移曲线在位移大于 0.6 m 时有下降阶段，是柱底局部过度屈服导致的结构刚度下降。实际撞击过程中，结构的刚度在材料应变率硬化作用下有所增加，立柱刚度下降时对应的位移也会增加，而且负刚度在计算质量 - 弹簧模型的微分方程时会出现动力响应曲线的异常波动。因此，忽略刚度的下降阶段，将刚性限高架立柱的边界力 - 位移曲线简化为 2 段直线，对应的曲

线方程如公式 5 所示。

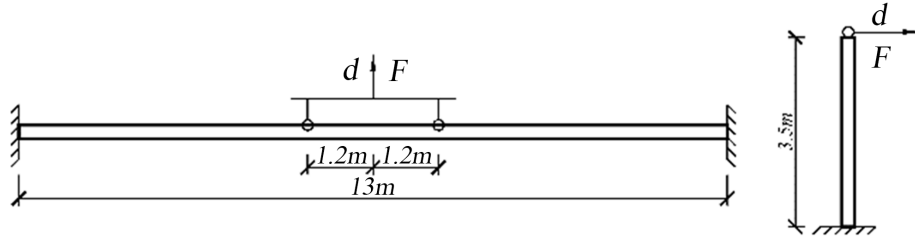


Figure 4. Quasi-static displacement loading of rigid limit elevated frame
图 4. 刚性限高架的准静态位移加载

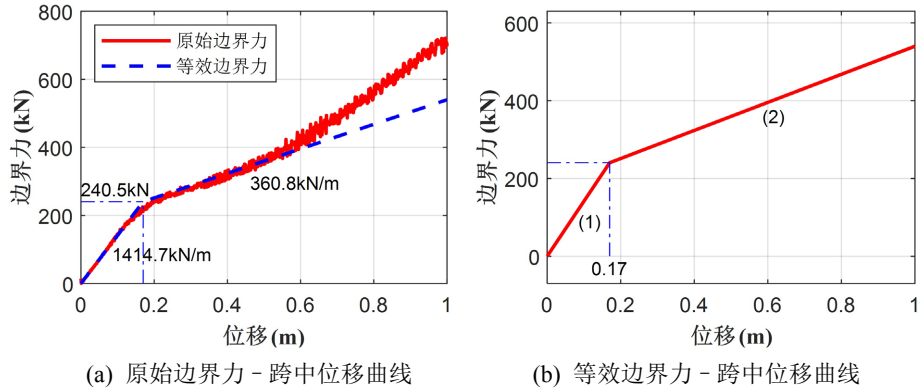


Figure 5. Boundary force-mid-span displacement curve of rigid limited overhead beam
图 5. 刚性限高架横梁边界力 - 跨中位移曲线

$$y = \begin{cases} 1414.7x, & (1) x \leq 0.17 \\ 360.8x + 179.2, & (2) x > 0.17 \end{cases} \quad (4)$$

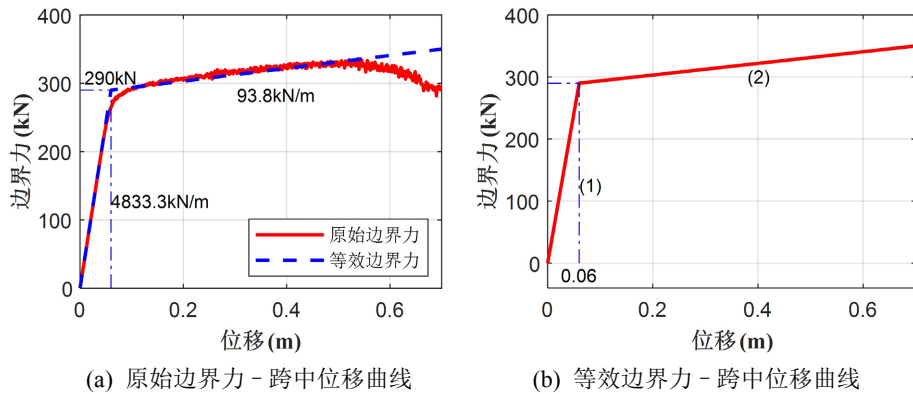


Figure 6. Boundary force-mid-span displacement curve of rigid limit elevated column
图 6. 刚性限高架立柱边界力 - 跨中位移曲线

$$y = \begin{cases} 4833.3x, & (1) x \leq 0.06 \\ 93.8x + 284.4, & (2) x > 0.06 \end{cases} \quad (5)$$

3.3. 柔性限高架参数选择

根据材料的密度和体积可以计算得到，壁厚 12 mm 柔性限高架横梁与缓冲橡胶块的总质量为 1800

kg, 立柱与上层横梁的总质量为 2136 kg。

柔性限高架也使用上文所述的准静态位移加载方法得到变形刚度, 不同的是, 在弹簧支座达到极限行程前的变形刚度为弹簧支座的弹簧刚度, 此阶段的变形刚度不用再测量。因此, 准静态位移加载时, 将弹簧铰支座改为固定铰支座, 只测量横梁在支座弹簧达到极限位移后的变形刚度。立柱的位移加载边界条件设置在立柱牛腿截面处, 如图 7 所示。提取位移边界的边界力 - 位移曲线, 如图 8、图 9 所示。

从图 8 中可以看出, 柔性限高架的边界力 - 位移曲线与刚性限高架的曲线变化趋势不同, 铰支座增加了柔性限高架横梁前期的变形能力, 横梁位移小于 0.1 m 时, 柔性限高架横梁的变形刚度只有刚性限高架横梁的一半, 但随着跨中位移的增加, 柔性限高架刚度增加到与刚性限高架横梁相同的数值, 且没有“塑性”阶段, 柔性限高架横梁达到相同跨中位移需要的边界力远远大于刚性限高架。在位移大于 0.35 m 时, 柔性限高架横梁的刚度会再次增加, 但根据文献中的分析, 柔性限高架横梁的跨中挠度最大只有 0.275 m, 所以仅取前 2 段曲线的数据。弹簧支座的刚度为 100 kN/m, 2 个支座达到极限压缩行程 0.4 m 需要的边界力为 80 kN, 将其与准静态位移加载试验的结果组合, 得到柔性限高架横梁分为 3 段直线的边界力 - 位移曲线, 对应的曲线方程如公式 6 所示。

从图 9 可以看出, 柔性限高架立柱的边界力 - 位移曲线与刚性限高架立柱的相似, 刚度变化时对应的位移也相近, 但柔性限高架的两层式结构导致重力更大、重心更高, 重力在加载方向的分量更大, 达到相同位移时需要的边界力更小, 所以第 1 阶段的变形刚度相比于刚性限高架立柱更小。将曲线简化为 2 段直线, 对应的曲线方程如公式 7 所示。

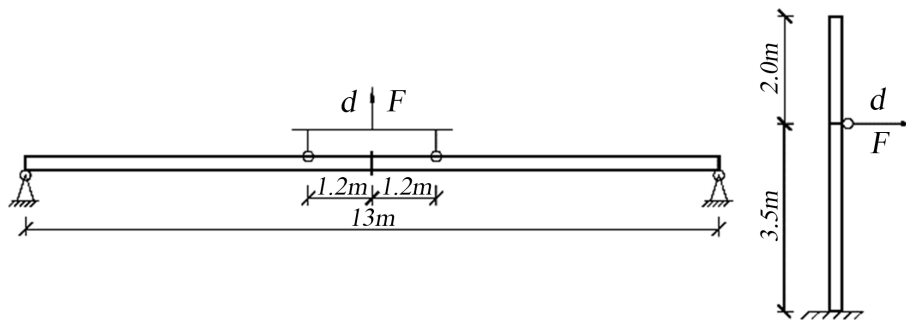


Figure 7. Quasi-static displacement loading of flexible limit elevated frame
图 7. 柔性限高架的准静态位移加载

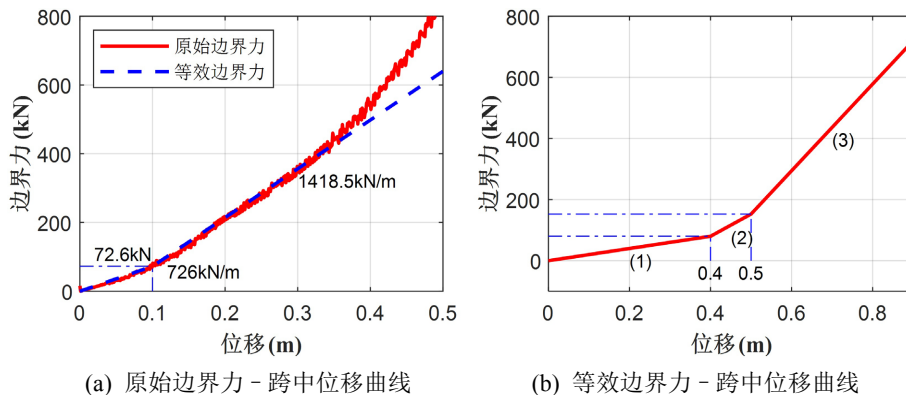


Figure 8. Boundary force-displacement curve of flexible limit elevated beam
图 8. 柔性限高架横梁边界力 - 位移曲线

$$y = \begin{cases} 200x, & (1) x \leq 0.4 \\ 726x - 210.4, & (2) 0.4 < x \leq 0.5 \\ 1418.5x - 556.6, & (3) x > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

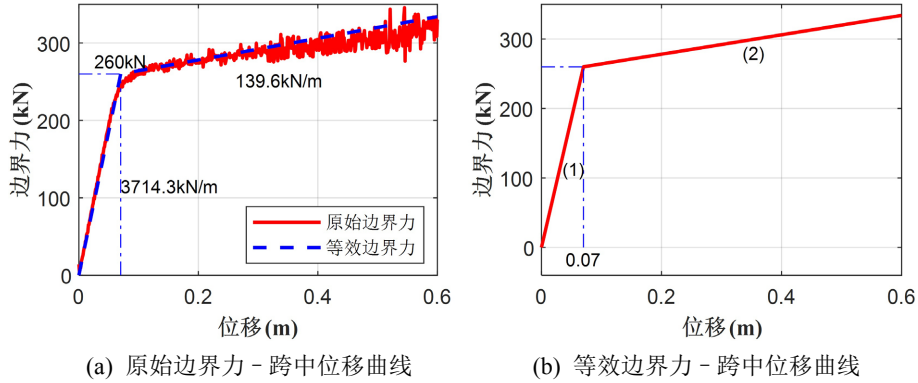


Figure 9. Boundary force-displacement curve of flexible limit elevated column
图 9. 柔性限高架立柱边界力 - 位移曲线

$$y = \begin{cases} 3714.3x, & (1) x \leq 0.06 \\ 139.6x + 250.2, & (2) x > 0.06 \end{cases} \quad (7)$$

4. 模型验证

4.1. 刚性限高架模型验证

在使用数值积分方法求解质量 - 弹簧模型的动力微分方程时，由于刚度的分段线性变化，需要在求解过程中对位移进行条件判断，并替换对应的刚度矩阵和荷载矩阵。

刚性限高架的质量 - 弹簧模型计算结果与有限元模型结果如图 10 所示。从图中可以看出，与有限元模型相比，质量 - 弹簧模型撞击力的整体波形在“平台”阶段有所偏差，但是在“上升”、“下降”阶段和峰值较为接近；位移曲线在车辆停止前重合度较高，在此之后阶段误差增加，但仍在合理范围内。

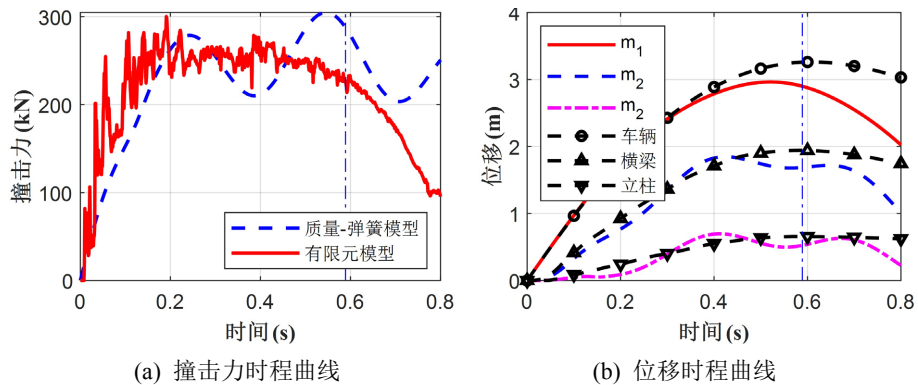


Figure 10. Comparison between rigid limit overhead finite element model and mass-spring model
图 10. 刚性限高架有限元模型与质量 - 弹簧模型对比

4.2. 柔性限高架模型验证

新型柔性限高架的质量 - 弹簧模型计算结果与有限元模型结果如图 11 所示。从中可以看出，质量 -

弹簧模型的撞击力的变化趋势与有限元模型结果相近, 有 2 次上升与下降阶段, 2 次峰值的数值非常接近, 误差均小于 2%, 但第一谷值的数值偏大, 第二峰值出现的时间偏后, 第二次下降阶段的撞击力偏大。以车辆速度降为 0 时刻为终止时间, 计算两种模型的累积撞击冲量, 质量 - 弹簧模型为 164.9 kN·m, 有限元模型为 147.2 kN·m, 误差为 12.1%。质量 - 弹簧模型的位移与有限元模型对比, 整体拟合度较高, 其中, 车辆与限高架的位移达到峰值的时间稍有提前, 横梁位移在车辆速度为 0 时刻的误差分别为 5.8% 和 2.2%, 限高架立柱的位移偏大, 最大误差达到 27.6%。综上所述, 质量 - 弹簧模型的对于柔性限高架的撞击力、车辆和限高架位移的估计比较为准确。

为进一步验证质量 - 弹簧模型在参数研究中适用性和准确性, 将其与文献中现有不同设计尺寸下的有限元模拟结果对比。

限高架横梁的壁厚减小时, 横梁的质量与变形刚度都会减小, 为控制影响因素变量, 此处只改变限高架横梁的质量。6~12 mm 壁厚的横梁对应的质量分别为 1173、1382、1591、1800 kg, 如图 12 所示。从图中可以看出, 质量 - 弹簧模型中, 横梁壁厚 (质量) 的减小使撞击力第一峰值减小, 对第二峰值影响较小, 由于没有改变刚度, 峰值减小量相比有限元模型更小。

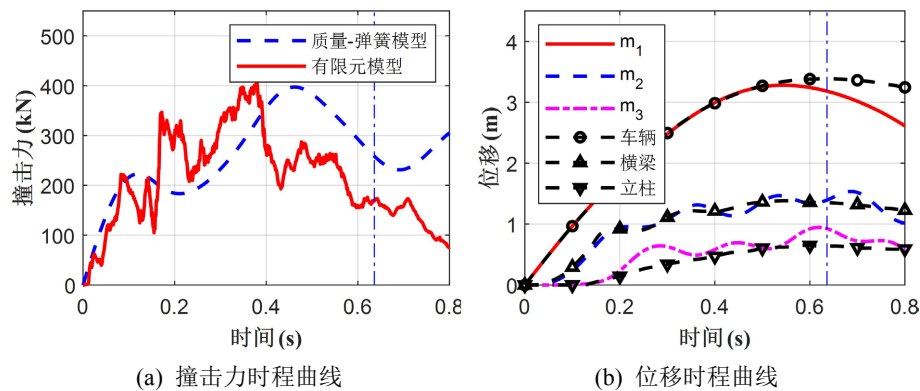


Figure 11. Comparison between the finite element model of flexible limit overhead and the mass-spring model

图 11. 柔性限高架有限元模型与质量 - 弹簧模型对比

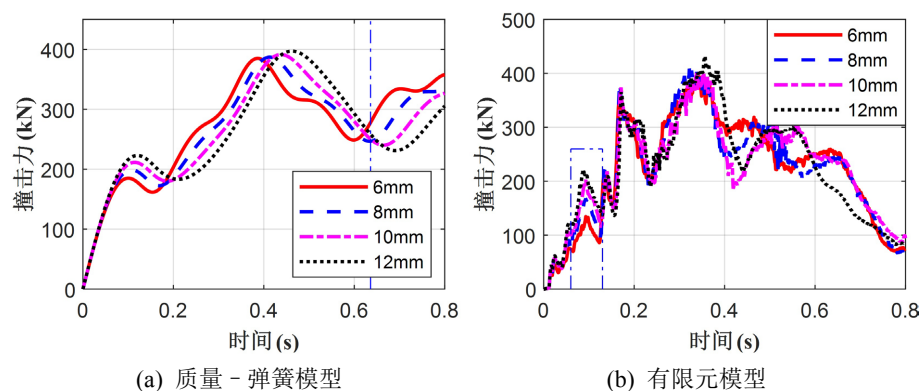


Figure 12. Time history curve of impact force under different beam wall thickness

图 12. 不同横梁壁厚下的撞击力时程曲线

改变质量弹簧模型中 m_2 的第一阶段的刚度 k_2 , 并与准静态位移加载试验的结果组合成新的边界力 - 位移曲线, 对比不同支座弹簧刚度下的撞击力, 如图 13 所示。从图中可以看出, 随着弹簧刚度的增加, 质量 - 弹簧模型的撞击力的第一谷值和第二峰值减小, 与有限元模型撞击的规律基本一致。

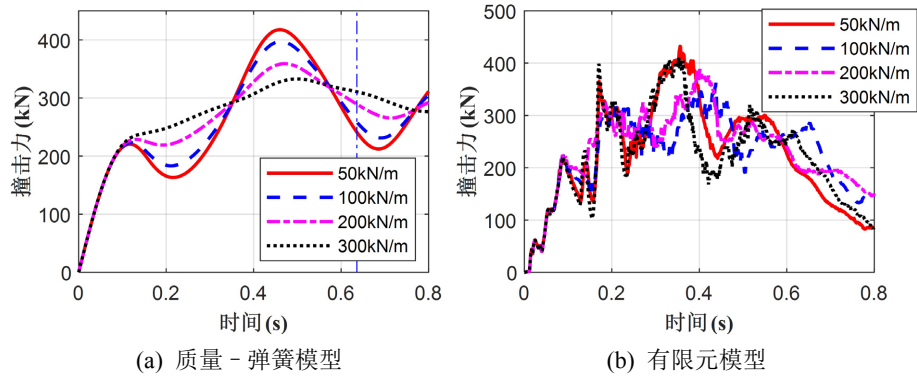


Figure 13. Time history curve of impact force under different spring stiffness
图 13. 不同弹簧刚度下的冲击力时程曲线

改变质量 - 弹簧模型中 m_1 的初始速度，研究不同车辆速度下的冲击力，如图 14 所示。从图中可以看出，车辆的速度减小是冲击力整体减小，与有限元模型结论一致。

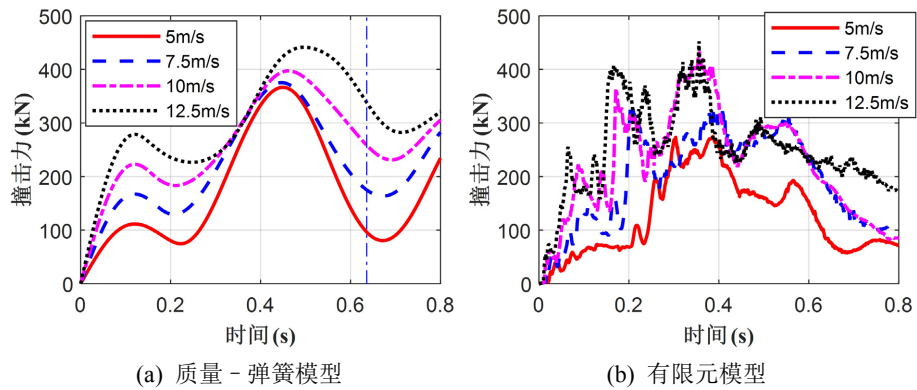


Figure 14. Time history curve of impact force at different vehicle speeds
图 14. 不同车辆速度下的冲击力时程曲线

改变质量 - 弹簧模型中 m_1 的质量，研究不同车辆质量下的冲击力，如图 15 所示。从图中可以看出，车辆质量的改变仅对第二峰值后的阶段有影响，即撞击过程后期冲击力的下降阶段，车辆质量越大，冲击力第二峰值越大，冲击力下降阶段的速度越小，与有限元模型结论一致。

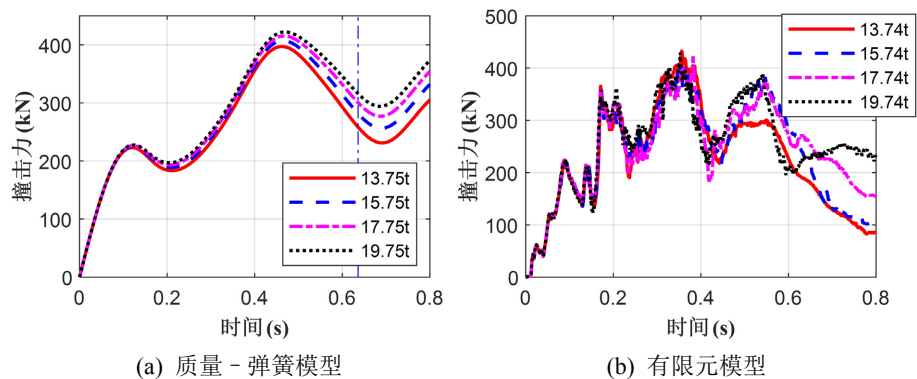


Figure 15. Time history curve of impact force under different vehicle masses
图 15. 不同车辆质量下的冲击力时程曲线

综上所述,使用质量-弹簧模型研究限高架参数的结论基本与有限元模拟结果一致,说明三自由度的质量-弹簧模型这种简化的力学模型对于车辆与限高架的碰撞问题有较高适用性和准确性。

5. 总结

本文将车辆与限高架的撞击问题简化为三自由度的质量-弹簧模型,通过准静态试验测得车辆、刚性限高架横梁与立柱、柔性限高架横梁与立柱的边界力-位移曲线,并将其简化为多段直线,得到结构的刚度参数。通过与有限元分析结果对比,得到以下结论:

1) 质量-弹簧模型对柔性限高架撞击过程中的撞击力、累积撞击冲量、撞击力峰值、车辆位移、限高架横梁与立柱位移的计算较为准确,对刚性限高架撞击过程中的动力响应计算误差更大,但在可接受范围内。

2) 通过质量-弹簧模型对柔性限高架的参数研究可以得到与有限元模型相同变化趋势的撞击力曲线,且曲线光滑,结果更直观,仅在具体数值上有微小误差,说明三自由度的质量-弹簧模型这种简化的力学模型对于车辆与限高架的碰撞问题有较高适用性和准确性。

参考文献

- [1] Bischoff, P.-H., Perry, S.-H. and Eibl, J. (1990) Contact Force Calculations with a Simple Spring-Mass Model for Hard Impact: A Case Study Using Polystyrene Aggregate Concrete. *International Journal of Impact Engineering*, **9**, 317-325. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(90\)90005-G](https://doi.org/10.1016/0734-743X(90)90005-G)
- [2] Vrouwenvelder, T. (2000) Stochastic Modelling of Extreme Action Events in Structural Engineering. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **15**, 109-117. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(99\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(99)00014-4)
- [3] 刘少源. 高速公路汽车与护栏碰撞的简化计算方法——柔性梁法[J]. 公路交通科技, 1995, 12(2): 26-34.
- [4] 赵鸣, 张誉. 汽车冲撞钢筋混凝土护栏系统的力学模型及仿真计算[J]. 土木工程学报, 1994, 27(6): 56-61.
- [5] 张誉, 赵鸣. 汽车冲撞刚性护栏冲击力的计算[J]. 土木工程学报, 1995, 28(6): 37-42.
- [6] 姚启明. 汽车碰撞防撞护栏碰撞力计算方法的研究[J]. 上海公路, 2003(S1): 122-127.
- [7] Cao, R., El-Tawil, S., Agrawal, A., *et al.* (2019) Behavior and Design of Bridge Piers Subjected to Heavy Truck Collision. *Journal of Bridge Engineering*, **24**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001414](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001414)
- [8] Chen, L., El-Tawil, S. and Xiao, Y. (2016) Reduced Models for Simulating Collisions between Trucks and Bridge Piers. *Journal of Bridge Engineering*, **21**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000810](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000810)
- [9] 方乐, 曾玉焯, 陈林. 针对轻型与中型卡车撞击桥墩的通用车辆力学模型[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 92-101.
- [10] 朱文彬, 罗辉. 新型柔性限高架动力分析[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(6): 146-154.