

文章编号:1005-0523(2020)05-0102-05

基于 LS-DYNA 的重型车辆撞击方形桥墩数值模拟分析

宣超,彭可可

(佛山科学技术学院交通与土木建筑学院,广东 佛山 528225)

摘要:为研究不同时速下的重型卡车与桥墩发生碰撞时的动力响应规律,使用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行非线性动力分析。考虑上部结构对碰撞过程的影响,用质量块模拟上部结构。以东风天龙重卡车为原型,建立有限元模型。选择质量为 30,40,50 t 车辆分别以时速 50,80,110 km/h 模拟碰撞过程,得出撞击速度、撞击质量对桥墩位移和碰撞力的影响规律。分析能量随时间的变化规律,验证碰撞模型的合理性。将碰撞力峰值与相关文献,与现行规范做对比,结果表明现行防撞设计规范难以满足实际工程中桥梁防撞的要求。

关键词:车桥碰撞;仿真模拟;非线性动力分析;动力响应

中图分类号:U447

文献标志码:A

本文引用格式:宣超,彭可可.基于 LS-DYNA 的重型车辆撞击方形桥墩数值模拟分析[J].华东交通大学学报,2020,37(5):105-110.

Citation format:XUAN C,PENG K K. Numerical simulation analysis of heavy-duty vehicle impact on square pier based on LS-DYNA[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):105-110.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.015

近些年,国内外很多学者对车桥碰撞展开了相关研究,主要通过落锤试验和有限元软件近似模拟碰撞过程。Buth^[1]采用 36.3 t 的卡车以 80 km/h 速度撞击直径为 900 mm 的实芯钢柱进行试验研究,建议采用 2 669 kN 作为桥墩抗撞设计荷载^[2]。Kazunori^[3]对钢筋混凝土梁进行落锤试验,分析了配筋率对梁的破坏形式和动力响应的影响。落锤试验不确定因素较多,且花费较大。随着计算机技术的快速发展,有限元软件模拟车桥碰撞过程被越来越多的桥梁专家和高校学者所接受并研究。王娟^[4]通过 ANSYS/LS-DYNA 软件,搭建了相对精细化模型,总结了箍筋间距、屈服强度和混凝土抗压强度等参数对碰撞过程的影响规律。杜伟^[5]通过有限元软件模拟了车辆在不同角度碰撞桥墩的过程,得出碰撞过程中的参数规律。陈林^[6]基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,对比不同边界条件和箍筋直径的桥墩在车辆碰撞下的损伤区域特征与水平位移变化。

现有研究模拟碰撞过程中选用车辆载重基本在 40 t 以下,未考虑高速行驶的重型车辆与车桥耦合规律。考虑上述因素,基于有限元软件 LS-DYNA 进行数值分析,模拟质量为 30,40 t 和 50 t 卡车分别以 50,80,110 km/h 撞击桥墩,分析碰撞过程中动力响应规律。

1 建立车桥模型

1.1 桥墩模型

桥墩原型是佛山市某钢筋混凝土桥墩。设计参数为 4 m×1.5 m,高度为 6.5 m,混凝土强度等级为 C35,主筋为 28 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋,共 15 根。基础和桥墩底部的连接以固端约束简化。桥墩用 Solid164 单元建模,考虑到碰撞部位的变形和力学响应较大,网格划分为单元尺寸 60 mm 的六面体实体单元;承台网格单元尺寸为 120 mm;上部结构以刚臂与质量点模拟,建立在桥墩顶端,墩顶边界条件以 Combin165 单元模拟。钢臂用 Solid164 单元模拟,质量点的质量提取自 Midas-civil 模型中的支反力,刚臂的高度为桥墩

收稿日期:2020-01-02

基金项目:国家自然科学基金(51608119);粤港澳大湾区高校土木工程专业创新创业体系研究(2020WQYB018);佛山科学技术学院 2019 年自由探索基金项目(2019ZYTS30)

作者简介:宣超(1995—),男,硕士研究生。研究方向为碰撞动力学。E-mail:1621265734@qq.com。

顶部到上部结构形心之间的距离,网格划分为 120 mm 的六面体单元。桥墩划分后的有限元模型共计节点数 62 473,单元数为 59 806。

1.2 车辆模型

车辆模型参考了东风重卡,车辆总长 11.55 m,车身宽为 2.5 m,高为 3.45 m。对车辆进行了简化设计后的车桥碰撞模型如图 1。车辆主要以 shell163 单元建立模型,通过定义壳单元的厚度,可以较真实的模拟车辆模型。整车分为车头和车身两个部分,车头部分是主要碰撞部位,划分为 50 mm 的四边形单元,车身划分后的单元尺寸为 100 mm,共划分了 26 431 个单元。

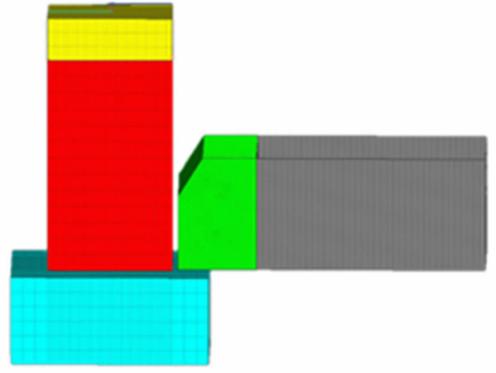


图 1 车墩碰撞模型

Fig.1 Vehicle-pier collision model

2 材料本构模型

2.1 混凝土材料

由于桥墩中混凝土材料要满足模拟高应变率,大应变下的混凝土力学性能,选择适用碰撞冲击的 Holmquist-Johnson-Cook 损伤积累模型(HJC 模型)^[7],其详细参数见表 1。

表 1 HJC 模型材料参数
Tab.1 HJC model material parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
ρ (密度)/(t/mm ³)	2.4×10 ⁻⁹	S_{max} (归一化最大强度)	7.0
E (弹性模量)/MPa	32.5	P_{cush} (弹性压强)/MPa	16
μ (泊松比)	0.2	μ_{cush} (弹性体应变)	0.001
G (剪切模量)/MPa	14 860	P_{lock} (压碎强度)/Pa	800
A (归一化粘聚性材料参数)	0.79	μ_{lock} (压碎体应变)	0.1
B (归一化压力硬化参数)	1.6	D_1 (损伤参数)	0.04
C (应变率系数)	0.07	D_2 (损伤参数)	1.0
N (压力硬化指数)	0.61	K_1 (压强参数)/MPa	85 000
F_c (抗压强度)/MPa	48	K_2 (压强参数)/MPa	-171 000
T (抗拉强度)/MPa	4	K_3 (压强参数)/MPa	208 000
ef_{mm} (断裂塑形应变)	0.01	EPS_0 (参考应变率)	0.001 ⁻¹

2.2 车辆材料

总结国内外碰撞研究和实际碰撞事故,发现碰撞过程中,车头处塑形变形较大,是主要吸收能量的部位,简化后车头选用线性强化弹塑性材料本构模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC),即 LS-DYNA 材料关键字中的 *MAT_003,车头材料模型参数见表 2。车身在碰撞过程中变形较小,以刚体模型模拟(*MAT_RIGID)^[8]。

表 2 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料参数
Tab.2 MAT_PLASTIC_KINEMATIC material parameters

参数	数值	参数	数值
ρ_0 (密度)/(t/mm ³)	7.85×10 ⁻⁹	$-E_t$ (切线模量)/MPa	1 180
E (剪切模量)	210 000	C (应变率参数)/s ⁻¹	40.4
M (泊松比)	0.3	P (应变率参数)	5
σ_0 (屈服应力)	235	f_s (应变率参数)	0.34

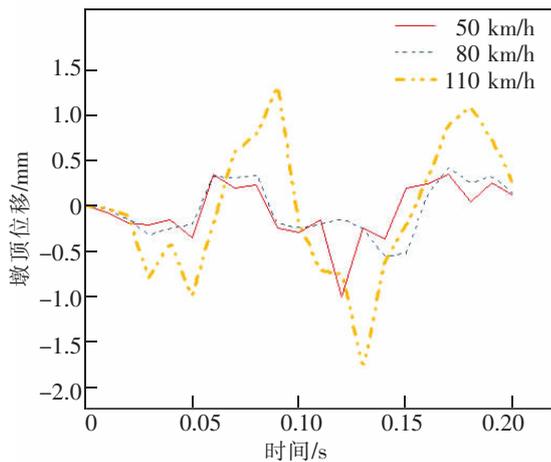
2.3 接触界面模拟

车-桥墩碰撞是很短暂的过程,持续时间大概在 200 ms 以内。桥墩算例未设置防撞设施,车辆在行驶过程中与桥墩发生正碰,故只要考虑车头处与桥墩之间的接触,接触类型设置为面面接触,摩擦系数为 0.3。

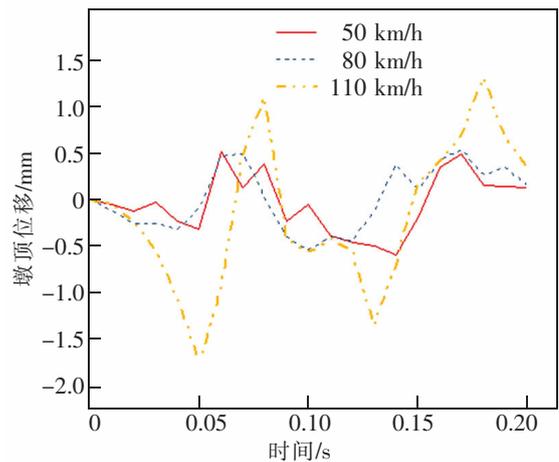
3 结果分析

3.1 墩顶位移

如图 2 所示,分别为 30 t 和 40 t 的车辆在时速 50,80,110 km/h 的条件下与桥墩发生碰撞的墩顶位移-时程曲线。墩顶位移能较为直观的反映上部结构的稳定性,故一直是碰撞研究的重要参数。在碰撞刚开始时,墩顶区域产生了负位移,这是由于开始时碰撞力较小,上部荷载的作用所导致的。车桥碰撞过程中墩顶位移的变化趋势基本相同,但墩顶的边界条件对位移有一定的约束作用,车速在 50 km/h 和 80 km/h 时墩顶位移最值很小,当车速提升到 110 km/h 时,墩顶位移最值有较大的提升;在相同时速下,40 t 车辆碰撞造成的墩顶位移较 30 t 车辆有显著提升。随着时间的推移,墩顶位移逐渐降为一个定值,碰撞过程结束。



(a) 30 t 汽车墩顶位移-时程曲线



(b) 40 t 汽车墩顶位移-时程曲线

图 2 墩顶位移-时程曲线

Fig.2 Time history curve of pier top displacement

3.2 碰撞区域位移

如图 3 为 40 t 的车辆以不同的时速下碰撞区域位移时程曲线,碰撞区域位移较墩顶位移更加复杂,大致围绕初始位置进行周期运动。因为碰撞区域是碰撞过程中直接接触的区域,且墩顶处的边界条件对墩顶位移的限制作用,墩顶位移峰值较墩顶位移峰值明显增大。随着车速的提升,碰撞区域位移时程曲线的振幅增大,峰值也有一定的提升。

3.3 有限元模拟的合理性

以载重 30 t,时速 50 km/h 的车辆碰撞桥墩,得出能量-时程曲线如图 4 所示。对时程曲线分析可以看出,碰撞刚开始时,动能与总能量相等,随着时间的推移,逐渐减少,碰撞结束

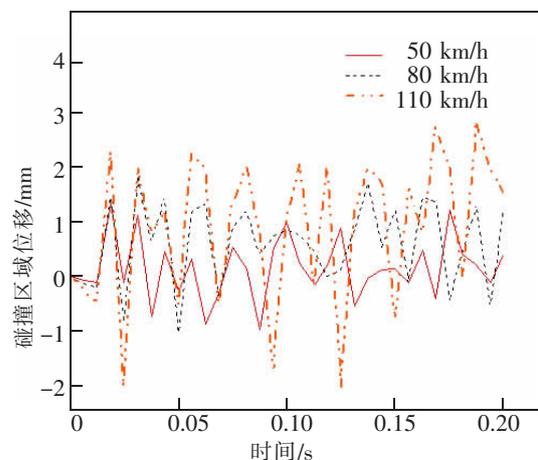


图 3 碰撞区域位移-时程曲线

Fig.4 Time history curve of collision area displacement

时降为 0;内能随着碰撞过程的进行,数值逐渐增加并趋于总能量;总能量在整个碰撞过程有略微的波动,是由有限元软件在计算时的误差导致的。总体来说,在整个碰撞过程中,车辆的动能逐渐减少,转化为沙漏能(碰撞过程是非线性动力学接触问题)^[9],在显示分析中因为采用缩减积分使单元计算时积分点数少于实际个数,这样可以加快计算进程,但也会造成一种单元零能模式,即为沙漏能、滑移能和内能。其中,内能吸收转化的能量所占比例最大。在碰撞结束后,沙漏能小于总能量的 5%,计算模拟结果具有可靠性。

3.4 碰撞力分析

在车桥模拟碰撞过程中,碰撞力是研究的重点之一。图 5 为 30 t 车辆在不同时速下与桥墩发生碰撞的碰撞力时程曲线,整个碰撞过程大概持续在 0.2 s 内。随着车速的增加,碰撞力到达峰值的时间减少,碰撞力峰值也逐渐提高。50 km/h 的车辆碰撞力峰值为 12.6 MN,碰撞时间为 150 ms;80 km/h 的车辆碰撞力峰值为 18.7 MN,碰撞时间为 160 ms;110 km/h 的车辆碰撞力为 26.2 MN,碰撞时间为 200 ms。碰撞过程大致可分为 3 个阶段,即上升期,下降期和平稳期。上升期车头部位与桥墩接触,碰撞力到达最大值;下降期车桥振动依然存在,碰撞力逐渐下降为 0;平稳期碰撞过程结束,碰撞力为 0。图 6 为车辆初始时速为 80 km/h 时,不同载重的车辆与桥墩发生碰撞时的碰撞力时程曲线。可知,当车重增加,碰撞力峰值也随之上升。当车重为 50 t 时,因为初始动能较大,车头部位被迅速压扁,车辆与桥墩发生二次碰撞,即车身与桥墩的碰撞,碰撞力会再次上升,到达一定数值后降为 0,碰撞结束。

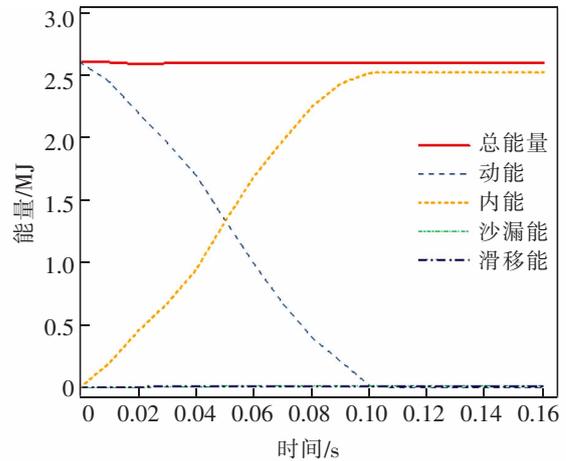


图 4 能量时程曲线

Fig.4 Time history curve of energy

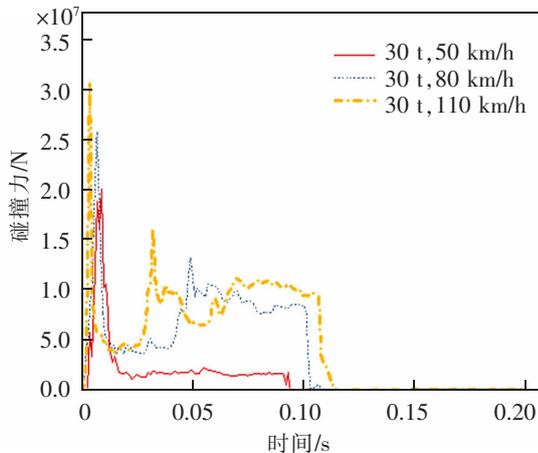


图 5 30 t 车辆碰撞力时程曲线图

Fig.5 Time history curve of 30 t vehicles of impacting force

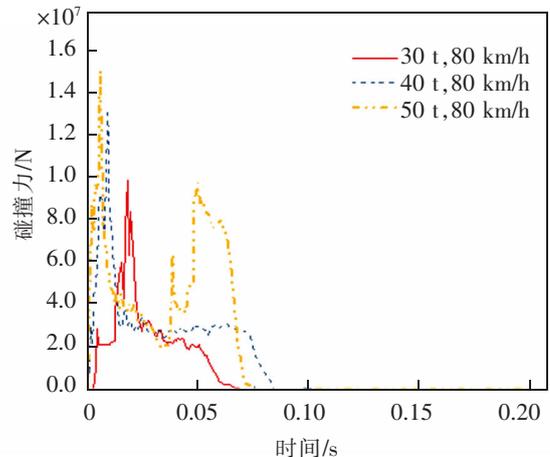


图 6 不同载重车辆碰撞力时程曲线

Fig.6 Time history curve of different vehicles of impacting force

3.5 与参考文献和相关规范结果对比

由表 3 可知,数值模拟后的碰撞力峰值与参考文献结果成正比。与参考文献中数值模拟结果大于相关规范。考虑到行驶道路中大载重车辆增多,现行规范难以满足实际桥梁防撞设计的需要。

表3 与相关规范撞击力峰值对比
Tab.3 Comparison of peak impacting force with relevant specifications

类型	顺车道向峰值/kN	垂直车道向峰值/kN
公路桥涵设计通用规 ^[10]	1 000	500
Eurocode ^[11]	1 000	500
AASHTO-LRFD ^[12]	1 800	1 800
刘明慧 ^[13]	-	8 500(8.5 t,80 km/h)
本文	20 100(30 t,80 km/h)	18 700(30 t,80 km/h)

4 结论

基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,以东风汽车和佛山某大桥数据,建立精细化模型。模拟了不同时速和载重的车辆与钢筋混凝土桥墩发生碰撞的过程,得出了不同的碰撞参数对桥墩的动力响应变化规律,具体结论为:

1) 车辆与桥墩发生碰撞过程中,墩顶会先经历一段负位移,之后围绕着初始位置做周期运动,最后位移降为一个定值。随着车辆时速和载重的增加,桥墩墩顶处的位移峰值逐渐上升。

2) 在碰撞过程中,碰撞区域位移较墩顶位移的变化更为复杂,碰撞区域位移峰值大于墩顶位移峰值,随着车速的上升,峰值逐渐增大。

3) 车辆与桥墩碰撞过程,碰撞力变化经历3个阶段:上升期、下降期和稳定期。当车辆撞击桥墩时,碰撞力逐渐上升到达峰值,随后经过数次振动后下降,最后逐渐降为0,碰撞结束。

4) 随着车速的增大,碰撞力峰值近似线性增大,到达碰撞力峰值的时间缩短。同等时速的车辆,当载重增加,碰撞力也明显上升。

参考文献:

- [1] BUTH C E, BRACKIN M S, WILLAMS W F, et al. Collision loads on bridge piers: phase 2. Report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions[R]. 9-4973-2, Austin, TX: Texas Transportation Institute, 2011.
- [2] 李瑞文, 周德源. 车辆撞击下桥墩动力响应与撞击荷载研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(2): 83-92.
- [3] KAZUNORI F, BING L, SAM S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(8): 938-950.
- [4] 王娟, 钱江, 周德源. 重型车辆撞击桥墩的碰撞力峰值参数分析[J]. 力学季刊, 2016, 37(2): 337-344.
- [5] 杜伟, 廖浩博. 车辆与钢管混凝土桥墩碰撞的数值模拟[J]. 工程与建设, 2018, 32(1): 11-13.
- [6] 陈林, 曾玉焯, 颜泽峰, 等. 车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的动力响应及损伤特征[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 261-267.
- [7] 周佳音, 杜伟. 船桥碰撞中桩土相互作用数值模拟方法[J]. 工程与建设, 2017, 31(1): 12-14.
- [8] 王建国, 陈涛. 船舶与大跨度斜拉桥碰撞的有限元数值模拟[J]. 桥梁建设, 2016, 46(5): 12-17.
- [9] 涂文兵, 何海斌, 刘乐平, 等. 汽车前保险杠碰撞过程动力学仿真与分析[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(1): 75-81.
- [10] JTG D60--2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [11] BS EN 1991-1-7 Eurocode 1: actions on structures Part 1-7: general actions-accidental actions [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2010.
- [12] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge design specifications. fourth edition, american association of state highway and transportation officials[S]. Washington DC, 2008.
- [13] 刘明慧. 车辆与公路桥墩动力碰撞的初步研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

Research on Slippage Characteristics of Rolling Elements of High-Speed Train Axle Box Bearings

Tu Wenbing, Chen Chao, Xiang Yunpeng

(School of Mechatronic and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Rolling elements slippage aggravates the wear and bearing vibration, which has an important impact on the life and stability of high-speed train axle box bearings. In this paper, with the double-row cylindrical roller bearing of high-speed train as the object of study, considering the factors such as pocket clearance and radial clearance, a two-dimensional finite element model of the bearing was established. The model's explicit dynamics was solved by central difference method, and the slippage characteristics of roller elements under steady conditions, deceleration conditions and track excitation conditions were analyzed. The results show that the RMS value of the sliding speed between the rolling elements and the outer ring is larger under stable conditions and track excitation conditions; the RMS value of the sliding speed between the rolling elements and the inner ring is larger under the deceleration conditions, and the increase is more obvious as the deceleration increases.

Key words: high-speed train; axle box bearing; variable working conditions; rolling element slippage

(上接第 106 页)

Numerical Simulation Analysis of Heavy-Duty Vehicle Impact on Square Pier Based on LS-DYNA

Xuan Chao, Peng Keke

(Institute of Transportation and Construction, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: In order to study the dynamical response of heavy trucks collision with piers at different speeds, the nonlinear dynamic analysis was carried out by using the finite element software LS-DYNA. Considering the influence of superstructure on collision process, the superstructure was simulated by mass block. Taking Dongfeng Tianlong heavy truck as a prototype to establish a finite element model. The weight of 30, 40, 50 t vehicles were simulated at 50, 80, 110 km/h respectively, and the influence of impact velocity and impact mass on pier displacement and collision force was obtained. The law of energy variation with time was analyzed to verify the rationality of the finite element model. The peak value of collision force was compared with the relevant literature and codes. The results show that the current anti-collision design code is difficult to meet the requirement of bridge collision prevention in practical engineering.

Key words: vehicle and bridge collision; simulation; nonlinear dynamic analysis; dynamic response