

城市跨线桥梁的车—桥墩碰撞模拟分析

王向阳, 吴琼

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 近年来,随着经济社会的发展、城市化的推进,城市跨线桥梁的数量与日俱增,车辆撞击桥墩不再只是一个小概率事件。文中建立卡车撞击桥墩的精细有限元分析模型,采用通用显示动力分析程序 LS-DYNA 计算分析桥墩在不同质量卡车以不同速度撞击时的应力与位移;同时利用有限元软件 ANSYS 模拟分析桥墩在《铁路桥涵设计基本规范》和《公路桥涵设计通用规范》给出的汽车等效静力作用下的应力与位移,并与模型分析结果进行比较,结果显示,规范中与之相关的内容并不保守,在现实碰撞中可能导致严重破坏。

关键词: 桥梁;城市跨线桥梁;车—桥墩碰撞;数值模拟

中图分类号:U443.22

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)05-0142-04

近年来,随着中国经济社会的不断发展及城市化的推进,城市道路立交桥等跨线结构物不断增加。由于各结构物难免存在空间侵占,加上驾驶员违章驾驶等,车辆与桥墩间的碰撞事故时有发生。车辆撞击桥墩是一个动态过程,但在通常设计中采用静力分析实现。《铁路桥涵设计基本规范》和《公路桥涵设计通用规范》均给出了撞击力标准值,其被定义为产生与冲击荷载相同应力与应变的静力荷载,但规范中并未给出这些等效静力的来源及其依据。考虑到实际情况中车辆与桥墩各式各样,规范中的规定显得较笼统,与实际情况存在较大出入。由于足尺车辆撞击桥梁试验难度大、成本高,该文通过建立有限元模型进行车—桥墩碰撞模拟分析。

1 工程概况

以某匝道立交桥为背景,选取其中一联(2×20)m 为研究对象,计算分析桥墩在车辆撞击作用下的应力与位移,为桥墩的抗撞击设计提供参考和借鉴。

该桥的桥跨结构为单箱单室箱梁,截面尺寸见图 1。桥墩为花瓶形,截面尺寸为 150 cm×300 cm,高 7 m,采用 C30 砼,纵筋为 HRB335 钢筋。在日常实际车—桥墩撞击中,上部结构的作用不容忽视,考虑到上部结构主要对桥墩产生重力荷载作用和梁体惯性力的影响,为提高计算效率,在不影响计算准确性的前提下将重力荷载施加在墩顶支座处,并用横向弹簧单元模拟支座对墩顶的约束。为了研究最不利情况,静力荷载及冲击荷载作用于截面惯性矩较小的方向,即沿桥的纵向(见图 2)。

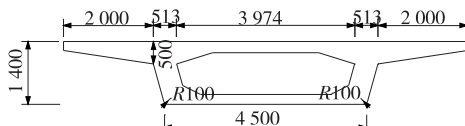


图 1 箱梁截面(单位:mm)

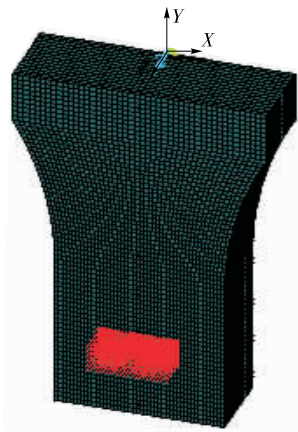


图 2 静力荷载及冲击荷载方向

2 车撞桥墩有限元模型

为精确分析不同质量和速度的车辆撞击桥墩后桥墩的应力与位移,尽可能准确地模拟桥墩的尺寸、材料性质、边界条件等,对车辆则尽量简化,能体现出真实的撞击效果即可。

2.1 车辆模型

采用东风牌 EQ3166GT3 型自卸汽车,其整备质量约 8 t,总质量约 16 t,外形尺寸为 7.425 m×2.5 m×2.98 m,货箱尺寸为 4.25 m×2.3 m×0.8 m,最高行驶速度为 80 km/h。该文模拟分析车辆

总重分别为 8 和 16 t 时,20、40 和 60 km/h 车速下与桥墩的碰撞。车辆有限元模型主要由车头、保险杠、车架、车厢等部位构成,能体现出实际卡车的材料特征、碰撞刚度、质量和速度即可。车辆模型材料参数见表 1。

表 1 车辆模型的材料参数

仿真对象	单元类型	材料模型	弹性模量/ ($\times 10^{11}$ Pa)	泊松 比
车头	Shell163	塑性随动模型	1.7	0.3
保险杠	Solid164	塑性随动模型	1.7	0.3
车架	Solid164	双线性各向同性模型	2.0	0.3
车厢	Shell163	刚性体模型	2.1	0.3

在车—桥墩碰撞中,车辆的车头和保险杠往往变形很大,必须考虑到材料的应变率和失效。采用 Cowper-Symonds 模型,相应屈服应力公式如下:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_P \epsilon_P^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中: σ_0 为初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 和 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数, $C = 40.4$, $P = 5.0$; ϵ_P^{eff} 为有效塑性应变; E_P 为塑性硬化模量。

对于钢材,失效应变一般取 0.35,屈服强度为 235 MPa。

车厢并非撞击部位,故当作刚体进行模拟以提高计算效率,同时通过改变车厢的壳单元厚度模拟车辆不同质量情况。

2.2 桥墩模型

桥梁的墩身均采用 Solid164 实体单元模拟,砼等级为 C30,材料模型采用 Brittle_damage 本构模型,砼弹性模量为 3×10^{10} Pa,泊松比为 0.2。车—桥墩碰撞有限元模型见图 3。

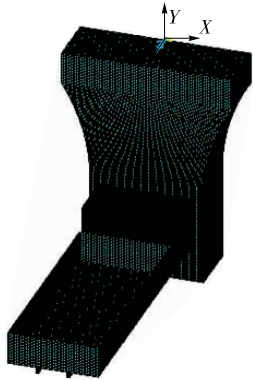


图 3 车—桥墩碰撞有限元模型

划分网格时,为保证计算的准确性,适当将桥墩划分得细些;为提高计算效率,将车辆划分得稍大。由于撞击过程一般持续时间较短,且桥墩的桩基一般较深,将墩底视作与地面固接。车辆与桥墩的接触采用面—面自动接触,砼和钢材间的静、动摩擦系数均取 0.3。

3 撞击工况

模拟不同质量的卡车以不同速度沿桥梁纵向与桥墩正面碰撞,工况设置见表 2。

表 2 撞击工况

工况 编号	质量/ kg	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	工况 编号	质量/ kg	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	8 000	5.56	4	16 000	5.56
2	8 000	11.11	5	16 000	11.11
3	8 000	16.67	6	16 000	16.67

4 仿真结果分析

4.1 桥墩应力

以工况 3 为例,桥墩不同时刻的应力云图见图 4。从图 4 可看出:撞击的瞬间,在桥墩的被撞区域局部压应力与范围迅速增大;随着时间的推移,在撞击力作用下继续增大直至部分砼屈服,进入塑性阶段,应力基本保持不变。而其附近砼应力大小和范

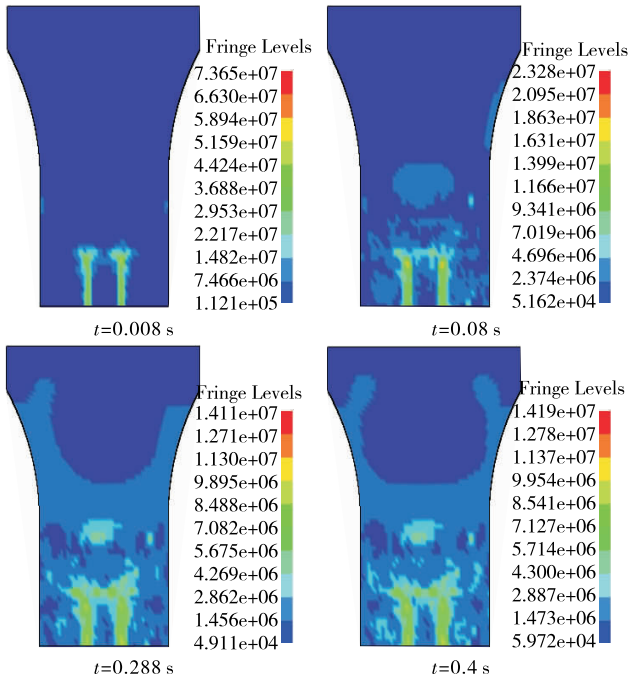


图 4 工况 3 时桥墩不同时刻的应力云图(单位:Pa)

围则不断波动,表明此处砼处于弹性阶段,符合砼弹塑性破坏规律。

表3为不同工况下桥墩的最大 Mises 应力。从中可见,桥墩的最大 Mises 应力随着车辆质量和速度的增大而增大。

表3 不同工况下桥墩最大 Mises 应力

工况编号	最大 Mises 应力/MPa	工况编号	最大 Mises 应力/MPa
1	49.14	4	51.39
2	55.92	5	69.66
3	73.65	6	80.49

4.2 桥墩位移

以工况3为例,选取桥墩被撞区域位移最大的节点及撞击力的合力点进行位移分析(见图5)。近似地,取卡车重心高度为合力点,本例中,取距地面1.5 m处,得到时间与冲击荷载方向位移关系曲线(见图6)。

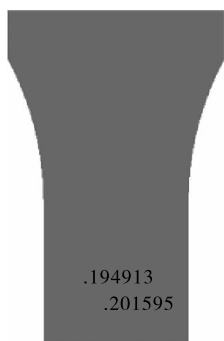
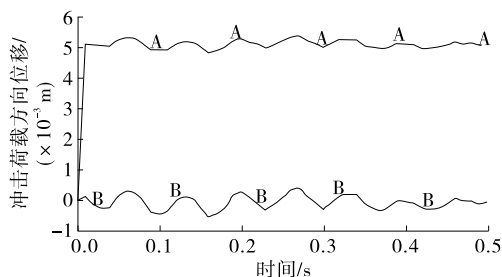


图5 桥墩被撞区域所选节点



A、B为节点号, A为201595; B为194913

图6 工况3时时间与冲击荷载方向位移关系曲线

从图6可看出:桥墩在车辆撞击作用下,被撞区域某些节点的位移迅速增大后回落,达到某一值后基本保持不变(如节点A201595),说明该区域砼已经由弹性阶段进入塑性阶段,符合砼弹塑性规律;而某些区域砼一直处于弹性阶段,节点位移(如节点

B194913)呈现上下波动的规律,随着时间的推移最终趋于零,同样符合砼弹塑性规律。

表4为不同工况下桥墩被撞区域与撞击力合力点在冲击荷载方向的最大位移。从中可见,桥墩在撞击力作用下的位移与车辆质量及速度正相关。

表4 不同工况下被撞区域与合力点的最大位移

工况编号	被撞区域最大位移/mm	合力点最大位移/mm
1	2.13	0.23
2	3.38	0.45
3	5.68	0.78
4	3.79	0.46
5	5.05	0.60
6	8.10	0.94

5 等效静力计算

对于车辆与桥墩碰撞,《公路桥涵设计通用规范》和《铁路桥涵设计基本规范》的规定如下:规范撞击力(平行方向)为1 000 kN;作用位置离地高度为1.2 m;作用面积未提及。

采用整体式模型,单元为带钢筋的 Solid65 实体单元。砼采用多线性各向同性材料模型,其应力—应变曲线参考 GB 50011—2002《混凝土结构规范》。为了提高计算效率,取一半对称结构进行分析。为了防止产生应力集中现象导致应力奇异而造成收敛困难,撞击力以分布荷载的形式作用在桥墩的下部。因国内规范未提及作用面积,借鉴文献[9]的规定:作用面积小于0.6 m(高)×1.5 m(宽)。同样地,墩底与地面视作刚性连接,墩顶则用横向弹簧单元模拟支座的约

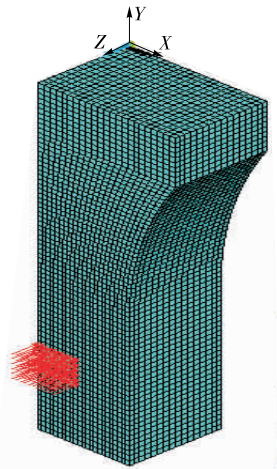


图7 半桥墩有限元模型

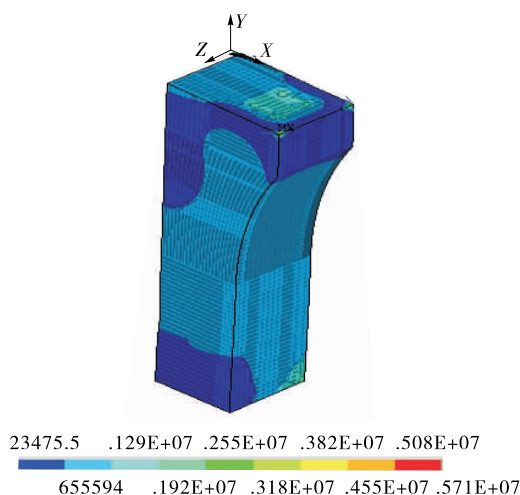


图8 桥墩应力云图(单位:Pa)

束作用,通过 ANSYS 建立有限元模型(见图7)。模型的收敛精度采用缺省设置,通过不断调整网格密度和子步数,经计算收敛后得到等效静力作用下桥墩的应力与位移。图8为桥墩的应力云图。

从图8可看出:在等效静力作用下,桥墩最大应力为 5.71 MPa,最小为 0.023 MPa。桥墩所用砼为 C30,砼均处于弹性阶段。

位移计算结果表明:在施加荷载的方向上,桥墩施加等效静力区域的最大位移为 0.09 mm,合力点的位移为 0.08 mm。

6 结论

该文初步讨论了车辆与桥墩发生碰撞后桥墩应力与位移的变化规律,主要结论如下:1) 桥墩在车辆冲击力作用下,被撞区域的应力随着时间的推移而增大,达到最大值后又随着时间的增加而减小,体现出砼弹性阶段的特点。但某些区域砼的应力极速增大后,随着时间的推移基本保持不变,这部分砼已由弹性阶段进入塑性阶段,符合砼的弹塑性规律。2) 与应力类似,在桥墩被撞的某些区域,节点位移达到某一值后呈现上下波动的规律,数值不断减小,最终趋于零,体现出砼弹性阶段的特点。但在某些区域,节点位移迅速增大达到某值后,随着时间的推移基本保持不变,这部分砼已由弹性阶段进入塑性

阶段,同样符合砼的弹塑性规律。3) 将桥墩在车辆冲击荷载和规范给出的等效静力作用下的应力与位移进行比较,等效静力作用下桥墩的应力与位移远小于前者。而规范提供的撞击力偏小,在现实状态中可能导致结构物破坏。

中国现行规范仅给出了撞击力的大小与作用高度,并未给出动态撞击力的计算方法。显然,车辆类型、速度及结构物的形状、材料组成等因素与之有关,需进一步研究。

参考文献:

- [1] 马祥禄.跨线桥梁在超高车辆撞击下的动态响应分析[D].北京:北京工业大学,2009.
- [2] Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. 2th Edition. Prentice-Hall, 2000.
- [3] Avinash S Joshi, Laxmikant M Gupta. A simulation study on quantifying damage in bridge piers subjected to vehicle collisions[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2012, 4.
- [4] Sherif El-Tawil, Edward Severino, Priscilla Fonseca. Vehicle collision with bridge piers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3).
- [5] 徐林枫.车辆撞击下桥墩的撞击力和墩身的应变研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [6] 王泽鹏,胡仁喜,康士廷,等. ANSYS13.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [7] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [8] TB 10002.1—2005,铁路桥涵设计基本规范[S].
- [9] AASHTO LRFD bridge design specifications: 6th Edition[S].
- [10] 段敏,王银辉,袁伟东.船舶撞击桥梁分析方法探讨[J].公路与汽运,2015(6).
- [11] 王银辉,袁伟东,张存辉,等.船桥碰撞的质量—弹簧等效模型研究[J].公路与汽运,2016(1).
- [12] 张存辉.基于船舶等效模型的船桥碰撞分析[D].重庆:重庆交通大学,2014.

收稿日期:2017—02—16

(上接第64页)

能研究[J].公路交通科技,2014,31(5).

- [6] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

- [7] 傅搏峰,周志刚,陈晓鸿,等.沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析[J].郑州大学学报:工学版,2006,27(1).

收稿日期:2017—03—09