

桥梁在爆炸荷载作用下的动态响应及 坍塌的数值模拟*

赵 羿, 陈华燕, 宋族栏, 曾祥国
(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

[摘要] 探究了桥梁在爆炸荷载下的动态响应以及模拟爆炸荷载下桥梁的损毁过程, 选用了 ANSYS 软件建立桥梁、空气以及炸药模型, 利用了通用显示动力分析程序 LS-DYNA 进行显示求解。分析了在爆炸过程中冲击波的传播规律, 得到了关键桥梁单元的位移响应, 模拟了全桥坍塌的损毁过程, 探究了不同爆炸距离以及不同炸药量对桥梁动态响应的影响, 并通过 Tuler-Butcher 损伤模型计算出了特定单元的损伤累计曲线。

[关键词] 桥梁; 爆炸; 动态响应; 损伤累计; 坍塌模拟

中图分类号: TU997 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2015)S2-0523-05

Numerical simulation of dynamic response and collapse of bridge under blast loading

Zhao Yi, Chen Huayan, Song Zulan, Zeng Xiangguo

(College of Architecture and Environmental, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The dynamic response of bridge was explored and the damage process of bridge under explosion was simulated. ANSYS and the explicit dynamic analysis program LS-DYNA were chosen to build and compute the bridge, air and explosive models. Also, the characteristics of shock wave propagation were analyzed, and the displacement response of some specified elements was obtained. Besides, the failure and collapse process of the bridge was simulated, and then the influence caused by different explosion distances and different explosive quantities on dynamic response of the bridge was analyzed. Finally, according to the Tuler-Butcher damage rule, the damage accumulation curves of specified elements were obtained.

Keywords: bridge; blasting; dynamic response; damage accumulation; collapse simulation

0 引言

在国家交通基础建设中, 桥梁占有重要的地位, 因此桥梁的安全问题不容忽视。在桥梁施工设计方面, 台风、地震、轮船撞击等荷载对桥体的作用都在考虑范围之内, 且制定有相应的规范, 然而对于结构的抗爆设计并没有明确的要求。因此研究爆炸冲击下桥梁的损毁效应, 为桥梁的安全评估以及综合防护提供理论依据和支撑, 具有十分重要的工程价值。

炸药爆炸的爆轰过程是指炸药中化学反应区的传播速度大于炸药中声速时的爆炸现象, 是炸药典型的能量释放形式。炸药爆炸时化学反应速度非常快, 化学反应过程复杂。爆轰过程与炸药的化学成分、热力学特性和初始物性参数等密切相关。爆炸过程非常复杂、爆炸时间短。试验的方法研究桥梁的爆炸问题成本高代价大, 危险大, 不易于进行大量的桥梁爆炸试验。解析方法求解桥梁的爆炸问题也非常困难, 采用数值模拟的方法来分析桥梁的爆炸过程也许是当前解决桥梁爆炸问题的有效途径。本文通过有限元软件 ANSYS 建立了桥梁、空气和炸药模型, 通过显示动力分析程序 LS-DYNA 进行求解, 分析爆炸冲击

波在空气中的传播规律以及爆炸中桥梁的动态响应, 以及不同爆炸距离和炸药量对桥梁爆炸的影响, 通过定义失效应变的方式完成全桥坍塌的模拟, 最后利用 Tuler-Butcher 损伤模型绘制出特定单元的损伤累计曲线, 为桥梁的安全评估与检测提供参考依据。

1 理论依据和材料参数

在本文的计算中, 炸药采用 LS-DYNA 中的 ALE 单元^[1], 同时设置炸药材料模型的状态方程; 桥梁采用 Lagrange 单元; 空气采用 ALE 单元, 以供炸药可以在其中流动。三种材料之间通过定义网格耦合实现爆炸过程模拟。在计算中, 通过修改 K 文件中的关键字来实现对 ALE 算法的控制: 用关键字 * SECTION_SOLID_ALE 来定义单元算法类型, 用 * CONTROL_ALE 来定义与 ALE 算法相关的基本特性, 用 * ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP 来定义多物质单元, 用 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 来定义流固耦合^[2]。

* 2014 年四川大学大学生创新创业训练计划校级重点项目 (20140139)。

作者简介: 赵羿, 本科, Email: 371815604@qq.com。

1.1 空气材料模型及其状态方程

选用 *MAT_NULL 材料模型以及空气状态方程 *EOS_LINER_POLYNOMIAL 来对空气进行描述。线性多项式状态方程为:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (1)$$

式中: P 为爆轰压力; E 为单位体积内能; V 为相对体积; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 为状态方程参数。

V 和 E 的初值为 V_0 和 E_0 。空气材料及状态方程参数值见表 1。

空气材料及状态方程参数值^[3] 表 1

$\rho_0/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C_0/Pa	E_0/Pa	V_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.225	-1.0×10^5	2.5×10^5	1	0	0	0	0.4	0.4	0

1.2 炸药模型

炸药模型的状态方程采用 JWL 状态方程。该方程的参数均可由试验确定,被广泛应用于爆炸问题的数值模拟中。JWL 状态方程的具体形式如下:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中: P 为压强; V 为相对体积,即爆轰产物体积与炸药初始体积之比; e 为炸药的比内能,其初值为 e_0 ; A, B, R_1, R_2 和 ω 是与炸药性质有关的常数。

本文选用炸药类型为 TNT 炸药,采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型。装药密度为 $1.63\text{g}/\text{cm}^3$,爆速为 $5500\text{m}/\text{s}$,爆轰波波阵面压力 $P_{\text{cj}} = 0.206 \times 10^5 \text{MPa}$,炸药材料及状态方程参数值见表 2。

炸药材料及状态方程参数值^[4] 表 2

A/Pa	B/Pa	R_1	R_2	ω	E_0/Jm^{-3}
3.74×10^{11}	3.75×10^9	5.56	4.15	0.35	6×10^9

1.3 桥梁模型

桥梁模型为连续刚桥,梁体为预应力混凝土变截面箱梁。全桥跨度为 $31.5\text{m} + 63\text{m} + 31.5\text{m}$ 。桥墩高约 21m ,横断面为 $10\text{m} \times 4\text{m}$,纵向 4m ,横向 10m ,两桥墩中心距离为 8.2m ,混凝土等级为 C30。箱梁采用一室一箱截面形式,梁高沿纵向线性变化,箱梁根部梁高 4.8m ,跨中和边跨端部梁高 1.2m 。壁厚均为 30mm 。箱梁顶面宽 8.2m ,箱底宽 5.2m 。单侧翼缘板悬臂 3m ,混凝土等级为 C55。

本文选用各向同性塑性随动强化材料模型作为桥梁混凝土材料的本构模型。许多材料的动力学试验表明,动态屈服应力比静态屈服应力有明显的提

高。在大量的试验基础上 Cowper 和 Symonds 提出了一个关于动态极限屈服应力 σ_y 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 之间的简单经验公式,即:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/p} \quad (3)$$

式中: σ_y 是静态极限屈服应力; C 和 P 是与材料性质有关的常数。

因此, $1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/p}$ 也被称为放大因子^[1]。塑性随动强化模型就是在 Cowper-Symonds 关系式基础上建立起来的。用与应变率有关的因数表示屈服应力:

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/p}\right](\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (4)$$

式中: σ_0 为初始屈服强度; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C, P 同上; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; β 为可调参数, $\beta = 0$ 为塑性随动强化模型, $\beta = 1$ 时为等向强化模型。

比较式(3)和(4)可以看出静态极限屈服应力 σ_s 为初始屈服强度加上增加部分 $\beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}$ 。这里 E_p 为塑性强化模量,其表达式为:

$$E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}} \quad (5)$$

式中 E_{tan} 为切线模量^[5]。

在 K 文件中通过关键字 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 定义桥梁的本构模型。此外,为了模拟桥梁的坍塌过程,需要给桥梁材料定义失效准则。采用最大拉应变强度理论,即当单元的最大线应变大于定义的最大失效应变(0.3%)时,该单元失效,软件自动将其从计算模型中删除。

2 有限元模型及工况设置

在有限元的模型中,箱梁以及桥墩均受重力的作用。在桥墩底部施加约束并且限制箱梁两端的竖向位移。本文进行了三种爆炸工况下桥梁的动态响应及损毁过程的模拟:

工况一:炸药位于两相邻桥墩之间,与桥墩相距 4.1m ,与桥墩底面相距 16m ,即图 1 中在位置 1 起爆。

工况二:炸药位于箱梁跨中正上方,即图 1 中在位置 2 起爆。

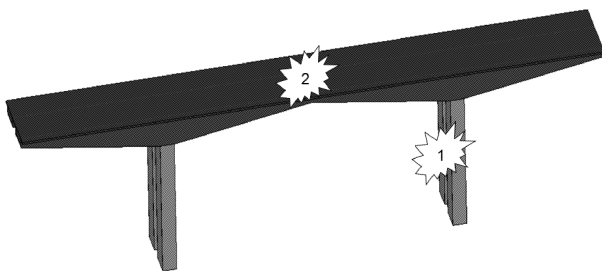


图 1 爆炸位置工况说明

工况三:在箱梁跨中正上方和俩相邻桥墩之间分别设置炸药,桥墩处炸药位置同工况一相同,即图1中位置1、位置2同时起爆。

3 模拟结果及分析

3.1 爆炸冲击波的传播规律

在空气中,炸药爆炸的化学反应非常迅速,会瞬间产生高温高压的爆轰产物。爆轰产物迅速膨胀并且冲击周围的空气,从而使得周围的空气局部压力和温度升高,形成空气冲击波。随着冲击波的传播,正压区不断拉宽,冲击波波阵面压力初期迅速衰减,后期衰减变缓^[6]。

在工况一的计算结果中选取离炸药不同远近的空气单元(图2,单元78630,78509,78388,78267,78146距离爆炸中心的距离依次增加)绘制各单元的压力时程曲线,见图3,结果显示随着距离的增加,空气冲击波超压峰值迅速减小,峰值到达的时间越来越晚,符合冲击波在空气中的传播规律。

爆炸冲击波在桥面的传播过程可分为两个阶段,第一阶段的应力云图见图4,起爆后爆炸应力由爆炸中心向四周迅速扩散,且延纵向首先有单元破坏。由于桥梁截面一室一箱、在纵向中线处为薄弱部位,模拟结果的破坏形式与桥梁模型保持一致。第二阶段的应力云图见图5,当应力扩散至桥梁侧面边界后,应力波在边界处反射,造成边界处应力增加的效应。

3.2 桥梁在爆炸作用下的动态响应

在工况二中,箱梁单元16175位于炸药正下方,从该单元起,沿纵向每隔1.5m选取一个单元,共选取

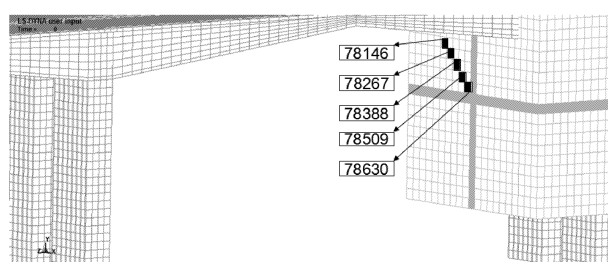


图2 空气单元的选取

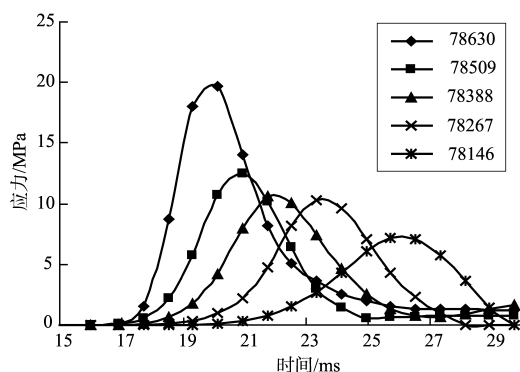


图3 空气单元压力曲线

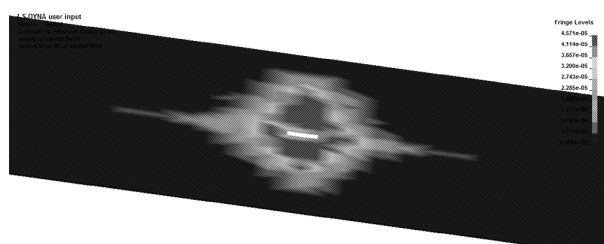


图4 第一阶段应力分布/MPa($t = 1.98 \times 10^{-3}$ s)

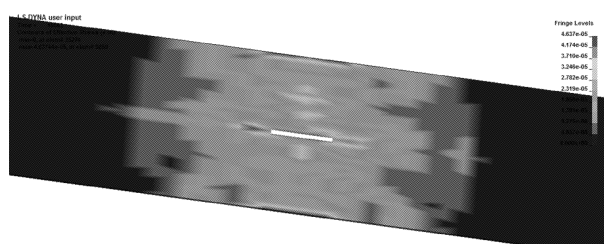


图5 第二阶段应力分布/MPa($t = 12.26 \times 10^{-3}$ s)

四个单元(距爆炸中心距离由近到远依次为单元16175,16173,16171,16169)。观察这组单元在前20ms内y向位移变化曲线,如图6所示。由单元y向位移图可知,跨中单元16175在20ms时位移已经接近7cm。随着离炸药距离的增加,单元的位移迅速减小,在单元16169处,前20ms中只产生了微小的位移。由此可得出:跨中的爆炸冲击只对爆炸点周围的局部区域有着比较大的影响,并不能直接引起整体结构的大幅度变形,随着距离的增加,这种影响将会迅速减弱。

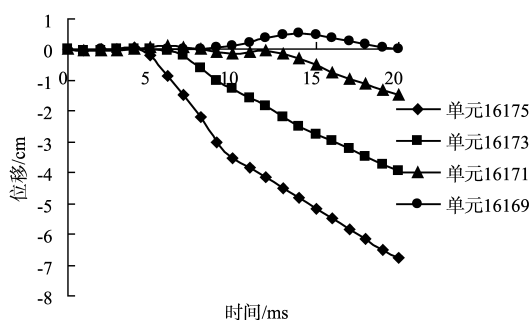


图6 桥梁单元y向位移曲线

为进一步研究不同爆心距以及不同炸药量对桥梁动态响应的影响,在爆炸过程中采用失效桥梁单元的数量来衡量桥梁的损毁情况。在工况二中,在一定爆心距下,分别设置100,150,200kg的装药量,得出失效单元数量随时间的变化曲线见图7。在一定装药量下,设置爆心距分别为0.8,1.2,1.6m,得出失效单元数量随时间的变化曲线见图8。结果显示随着爆炸距离越来越近,炸药量增加,失效单元数量增加。验证了近距离、大药量的炸药能够对桥梁造成更大程度的破坏,建立起了炸药量、爆心距与破坏程度之间的定量关系。

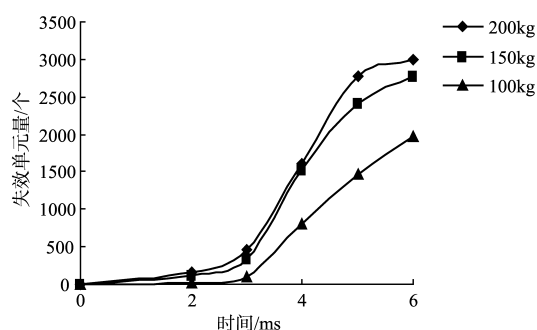


图7 失效单元量变化图

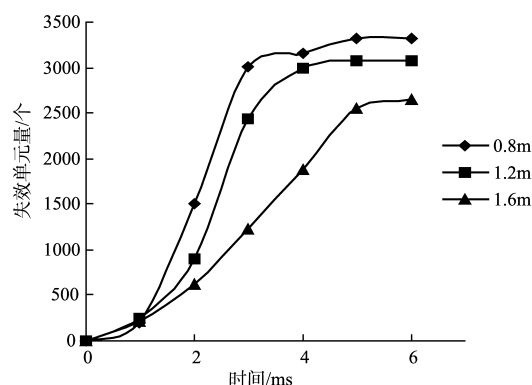


图8 失效单元量变化图

3.3 爆炸荷载下桥梁的坍塌过程模拟

大型结构受到炸药作用而引起的坍塌问题的研究,对于评估结构破坏程度、以及预计修复结构所需的时间和经济花销方面有重要意义。桥梁的坍塌过程在理论计算中难以展开,采用数值模拟的方法也许是当前分析解决桥梁坍塌问题的有效途径。

在工况三中对连续刚架桥在不同时刻的破坏形态进行了模拟。图9为不同时刻全桥 von-Mises 应力分布,反映了不同时刻桥梁的坍塌程度。模拟结果符合桥梁在桥面和桥墩同时受到爆炸时从炸药爆炸到失稳坍塌全过程的实际情况,可作为桥梁破坏程度的参考。与参考文献[2],[7]中的坍塌形式比较,可发现炸药的放置方式会导致不同的桥梁坍塌方式,造成不同程度的破坏。

4 桥梁的损伤分析

桥梁在爆炸荷载作用下的响应非常复杂,但是可以用损伤力学的方法来对桥梁的破坏程度进行量化。层列准则一直是近年研究的热门话题之一,至今多种层裂准则已被人们提出。Tuler 和 Butcher 提出了一种积分型的损伤累积准则,与大多数基于“离散度量型”准则不同,它进一步给出了材料动态损伤累积的连续度量以及发生宏观层裂的下限条件,虽然该损伤准则完全局限于宏观力学领域,但由于在实际中便于应用,所有在工程上被普遍采用^[8]。

Tuler-Butcher 损伤累积准则的形式如下^[9]:

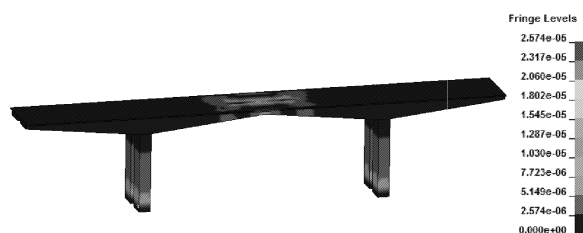
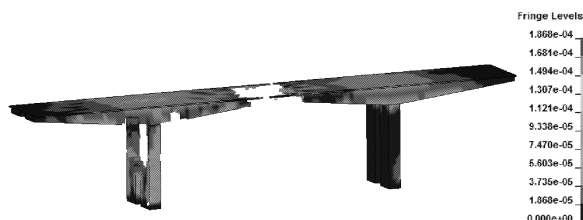
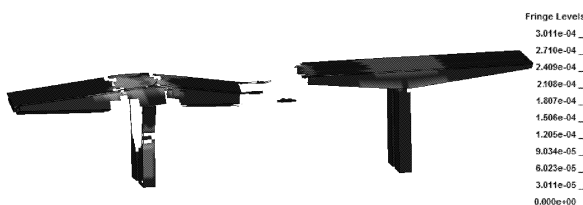
(a) 桥梁开始发生局部破坏时应力分布 ($t = 6.97\text{ms}$)(b) 桥墩和桥面跨中完全破坏时的应力分布 ($t = 74.99\text{ms}$)(c) 桥梁发生整体坍塌 ($t = 950\text{ms}$)

图9 不同时刻全桥 Von-Mises 应力分布/MPa

$$\int_0^{t_c} \left[\frac{\sigma(t)}{\sigma_0} - 1 \right]^\lambda dt = \psi \quad (6)$$

式中: σ_0 为材料损伤阈值应力; $\sigma(t)$ 为层裂面上拉应力历史;积分上限 t_c 为材料在拉应力作用下发生层裂所需要的时间; λ, ψ 为材料参数。

当 $\lambda = 1$ 时,该式为冲量准则;当 $\lambda = 2$ 时,该式为能量准则;如果 λ 取其他值,虽然上式没有具体的物理意义,但通过数值模拟发现,特定的 λ 能更好地拟合试验结果,可能会更适合工程上的应用。由于左边积分变量是无量纲量, ψ 是一个具有时间量纲的物理量。该准则说明,当时间达到某一个 ψ 值时材料断裂。

Tuler-Butcher 损伤累积层裂准则定义的损伤 D :

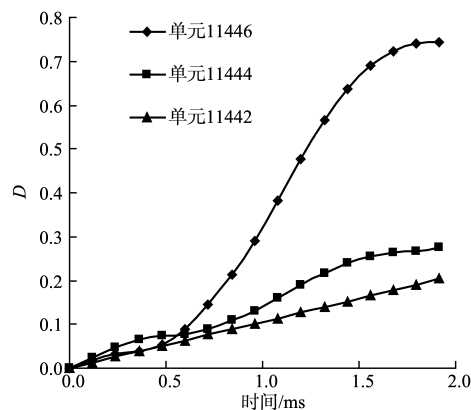


图10 桥梁单元的损伤累积曲线

$$D = \frac{\int_0^{t_c} \left[\frac{\sigma(t)}{\sigma_0} - 1 \right]^{\lambda} dt}{\psi} \quad (7)$$

图10是工况二箱梁顶板跨中边缘沿桥梁轴每隔2m选取一个单元的损伤累积曲线,单元距离炸药由近到远依次为11446,11444,11442。由该曲线可以得出:爆心距和炸药量一定的情况下,距离爆炸中心距离越近的桥梁单元的损伤积累越大。损伤累积曲线表明了单元的受损情况,有望用于结构残余寿命的后续研究中。

5 结论

(1)利用LS-DYNA有限元程序,建立连续刚构桥、炸药和空气有限元模型,通过状态方程定义炸药和空气。

(2)模拟了爆炸冲击波在空气中的传播,由应力图像表示,随着距爆炸中心的距离的增加。空气冲击波的超压峰值迅速衰减,出现峰值的时间也逐渐变晚,结果满足冲击波在空气中的传播规律。同时得出冲击波在桥面跨中的应力扩散规律。

(3)分析桥梁在爆炸冲击波下特定单元的位移动态响应,得出了跨中的爆炸冲击只对爆炸点周围的局部区域有着比较大的影响,并不能直接引起整体结构的大幅度变形。并分析了不同爆心距、不同炸药量对桥梁损毁程度的影响,结果表示:随着爆炸距离的减少,炸药量的增加,失效的桥梁单元数量增加,建立起了炸药量、爆心距与破坏程度之间的定量关系。

(4)引入了Tuler-Butcher模型对跨中边缘的桥梁

单元进行了损伤量化,得到了桥梁单元的损伤累积曲线,结果表明:随着距离炸药单元越远,炸药对桥梁单元造成的损伤越小。本文的损伤分析结果可以为桥梁的安全评估和残余寿命的计算提供参考数据。

参 考 文 献

- [1] 石少卿,康建功,汪敏,等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 陈华燕,曾祥国,朱文吉,等. 爆炸荷载作用下桥梁动态响应及其损毁过程的数值模拟[J]. 四川大学学报,2011(6):15-19.
- [3] CHENG M, HUNG K, CHONG O. Numerical study of water mitigation effects on blast wave[J]. Shock Waves, 2005,14(3):217-223.
- [4] 李建阳. 爆炸荷载下水中混凝土损伤破坏规律研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [5] 王泽鹏,胡仁喜,康士廷. 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.
- [6] 卢红琴,刘伟庆. 空中爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报,2009,30(11):105-108.
- [7] 杨喻淇,曾祥国,韩荣辉,等. 爆炸荷载作用桥梁动力响应及其损伤的数值模拟[J]. 成都:四川建筑科学研究,2012(5):19-23.
- [8] 曹结东. 含损伤热粘塑性本构数值算法和铝锂合金动态响应研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2006.
- [9] 蒋东,李永池,郭扬. Tuler-butcher 模型中考虑已有损伤影响的一种修正[J]. 高压物理报,2009,23(4):271-276.