DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0135-10

桥梁结构抗爆安全评估研究进展*

张 宇[1,2,3],李国强[2],陈可鹏[4],陈艾荣[2]
(1.武警后勤学院建筑工程系,天津 300162;
2.同济大学土木工程学院,上海 200092;
3.西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室,陕西 西安 710049;
4.浙江大学建筑设计研究院,浙江 杭州 310000;)

摘要:随着恐怖袭击和偶发爆炸事故造成的桥梁爆炸事故不断增多,桥梁结构抗爆安全问题越来越受到关注。本文中系统总结了桥梁结构抗爆安全评估的研究进展,分析桥墩、桥面、桥索和桥塔爆炸载荷作用下桥梁的理论简化方法和结构的动力响应,和桥梁的连续性、冗余性和鲁棒性对结构连续性倒塌的影响,通过对建筑和桥梁抗连续倒塌的研究现状及相关规范的归纳,明确了桥梁连续倒塌的特性及现行桥梁设计方法的缺陷。而后,就承载能力评估、耐久性评估和适用性评估等桥梁安全评估问题的研究进展进行了梳理,并对桥梁爆破拆除技术和近地下爆炸对桥梁产生的响应和破坏作用进行分析,并针对当前研究的现状,分别提出建议。

关键词:爆炸力学;安全评估;结构加固;动力响应;爆炸荷载;桥梁结构
中图分类号:O383 **国标学科代码**:1303510 **文献标志码**:A

桥梁作为交通线的枢纽,一旦遭受破坏会造成巨大损失,且修复困难[1]。之前关于桥梁安全问题研究主要集中在桥梁自重荷载、车辆冲击力、船舶的撞击力和抗震和抗风方面。“9·11 事件”后,恐怖袭击威胁和偶发爆炸造成的桥梁事故不断增多,使桥梁结构抗爆安全问题越来越受到关注。桥梁所受的爆炸荷载可以归结为常规爆炸荷载、偶然性爆炸荷载(如车辆运营过程中危险物品爆炸)和城市桥梁爆破。关于建筑结构的抗爆,学者们开展了大量研究[2],并制定了相应的设计规范[3]。相对于建筑结构,关于桥梁在各种爆炸荷载下的研究较少,主要采用有限元和试验方法[4],仍未形成系统的理论体系。同时,各国桥梁规范[5-12]中甚至军用规范中均未单独考虑爆炸荷载对桥梁的影响,仅把爆炸荷载归结为偶然荷载一类,设计中也没有具体的计算规定。本文中从桥梁受爆的动力响应、桥梁特殊爆炸问题和桥梁的爆炸安全评估 3 个方面阐述了国内外桥梁的抗爆的研究进展,对研究中采用的方法、措施和取得的成果进行总结同时指出研究中存在的不足,并针对研究现状提出建议,以期对设计人员进行桥梁抗爆设计提供参考,并为桥梁抗爆规范的编制提供借鉴。

1 桥梁受爆的动力响应

1.1 桥墩受爆结构的响应

1.1.1 桥墩受爆荷载简化方法

桥墩目标易接近且在结构上起着主要支撑作用,对于爆炸荷载的敏感性最大。爆炸在极短的时间内化学能迅速释放出来,并迅速向外膨胀,在空气中形成冲击波,并对外做功。国内外对桥墩爆炸进行了大量研究[13-22],根据爆炸荷载离桥墩的远近,荷载可以简化为不同的分布形式[13]:远桥墩爆炸条件下的爆炸荷载可以等效为平面波的均布荷载,如图 1(a)所示,而近桥墩爆炸条件下的爆炸荷载一般可以等效为三角形荷载,如图 1(b)所示,荷载数值可以用等效静荷载确定。

* **收稿日期**:2014-01-02;**修回日期**:2014-03-10
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51508412);中国博士后基金项目(2014M551451);
西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室开放基金项目(SV2014-KF-17)
第一作者:张 宇(1983—),女,博士,讲师,zhangyu1983xinxin@163.com。

1.1.2 桥墩附近爆炸下桥梁结构的动力响应

桥墩附近爆炸不仅会引发桥墩的破坏，还会影响桥梁的整体稳定性。A. Islam[14]用常用有限元软件 STAAD. Pro 分析了典型的 AASHTO 梁桥爆炸作用下的响应，研究者把恐怖袭击下峰值压力作为等效静载对梁桥进行了爆炸作用模拟，但是爆炸荷载的施加用的是等效静荷载方法，并没有考虑不同材料和结构运动对于爆炸荷载的作用，不能真实的反映爆炸场景。M. Rutner 等[15]用有限元方法对汽车爆炸下桥梁柱的响应进行了研究。A. K. Agrawal[16]给出了桥梁的动力分析模型。特别需要注意的是，D. G. Winget 等[17]在桥墩与桥面较为封闭的条件下爆炸，爆炸荷载会在封闭环境产生多次反射叠加增强，增强的爆炸荷载将会对桥面产生一个托力，让桥的面板和桥墩脱离，如图 2 所示。另外不同约束条件下，柱的弯矩分布不同，因此对于不同约束条件下的桥梁进行抗爆设计和加固时需采用不同方法。同时，由于桥板的悬链线效应[13]，单墩的破坏通常不会引发整体桥梁的坍塌，多墩破坏才会产生危险。

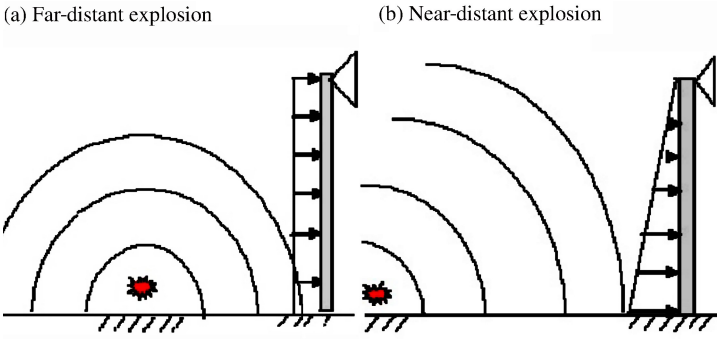

图 1 桥墩爆炸下荷载确定方法[13]

Fig. 1 Load determination methods for bridge pier under blast load[13]

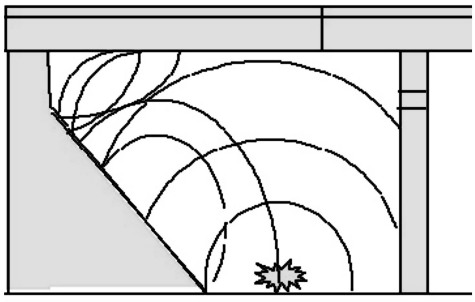

图 2 桥板下爆炸示意图[17]

Fig. 2 Response of bridge under blast load[17]

1.1.3 不同动力荷载作用下桥墩的破坏模式

桥梁可能遭受的动力荷载主要有爆炸荷载、地震荷载和风荷载[13]，不同动力爆炸荷载和地震荷载有一定的相似性，运用地震荷载的一些结论对分析爆炸问题有一定的借鉴意义。学者对地震作用下桥墩的作用进行了大量的研究[18]，ACI 建筑标准[19]和 AASHTO LRFD 标准[5]给出了建筑和桥梁结构混凝土构件在动力作用下的详细分析方法；H. Sezen 等[20]测试了 4 个钢筋混凝土原型在模拟地震荷载作用下的破坏模式。对于爆炸与地震荷载下结构响应的区别，K. N. Suthar[21]把桥墩在爆炸荷载作用下结构的响应和在地震情况下结构的响应和破坏模式进行了对比，如图 3 所示。研究表明：爆炸荷载由于其瞬时会释放出大量的能量，桥墩在爆炸荷载的作用下会发生局部的破坏，但是并不会发生较大的水平位移。而在地震荷载的作用下，桥墩的主要响应为发生水平位移；E. B. Williamson[13]分别对风荷载、地震荷载和爆炸荷载作用下混凝土柱的受力情况和动力进行了对比分析，如图 4 所示。研究表明：风荷载和爆炸荷载作用下，最大弯矩均出现在跨中位置，地震荷载的最大弯矩出现在约束部位。

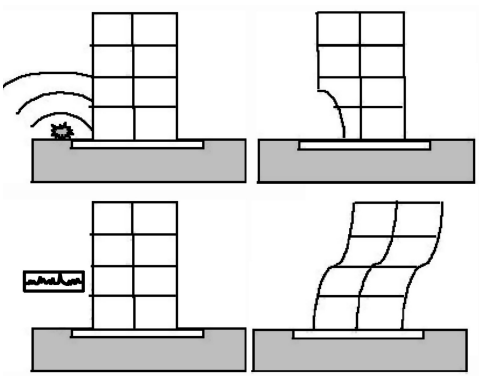

图 3 桥墩在爆炸与地震作用下破坏模式对比[21]

Fig. 3 Contrast of pier damage models of pier under blast load and earthquake[21]

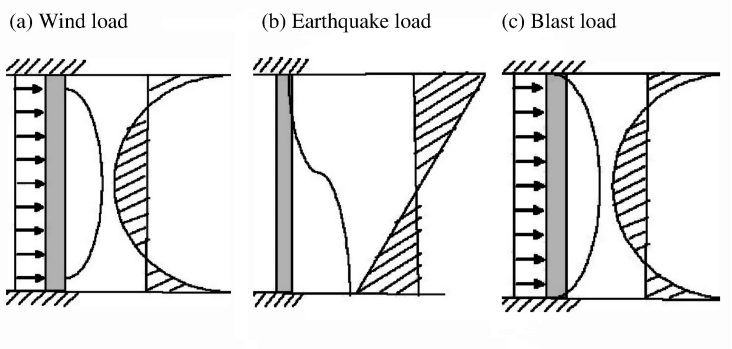

图 4 不同动载下桥墩的弯矩图[13]

Fig. 4 Diagram of pier bending moment under various dynamic loads[13]

1.1.4　不同截面形状桥墩受爆破坏

桥墩的主要截面形状为圆形和方形，文献[13]中开展了一系列圆形和方形桥墩在爆炸荷载下的抗冲击试验，并对损伤情况进行了对比分析。同时，别给出了圆墩和方墩在爆炸荷载作用下的等效静荷载的简化模式、动力响应和塑性铰分布情况，研究表明圆形桥墩抗爆性能较优。另外，M. Bruneau 等[22]开展了不同炸药当量下钢管混凝土柱式墩排架的比例模型试验，得到了左右排架桥墩应力应变和位移的分布情况。

1.2　桥面受爆结构的响应

1.2.1　桥面受爆的弹塑性分析

爆炸作用下混凝土结构的响应通常用弹性理论[23-24]，铁木辛柯梁理论[25-26]和等效单自由度理论(SDOF)[27-28]进行分析。窄桥在小当量爆炸时简单弹塑性分析可以借鉴 J. M. Bigs[29]梁的弹塑性分析模型，如图 5 所示。对一维弹性体 Bernoulli-Euler 简支梁桥的横向振动一般可采用模态叠加法[30-31]其简支梁的强迫振动微分方程可表示为：

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4}+m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}+c\frac{\partial y}{\partial t}=F(x,t) \tag{1}$$

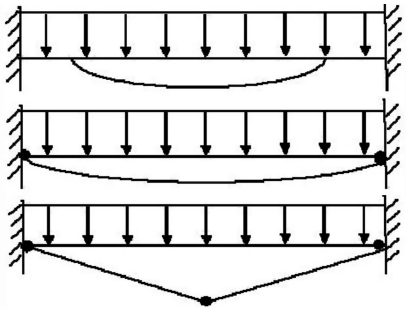

图 5　梁响应阶段[28]

Fig. 5　Beam response stage[28]

式中：$F(x,t)$为爆炸荷载，$y(x,t)$为爆炸荷载下桥梁的位移。两跨连续梁桥的受迫振动方程两跨连续梁动力学微分方程为：

$$\ddot{q}_n+2\xi\omega_n q_n(t)+\omega_n^2 q_n(t)=\frac{1}{M_n^2 ml}\sum_{i=1}^{N_n} f_i(t)\varphi_n(x_i) \tag{2}$$

式中：$M_n^2=\int\varphi_n^2(x)\mathrm{d}x$。对于小当量爆炸宽桥的动力分析，应该用板的弹塑性分析模型[32-34]；对于拱桥、悬索桥等不同的结构形式，可以分别建立爆炸荷载作用下结构动力学响应方程。学者对于桥面爆炸下桥梁的理论研究较少，大多采用了数值模拟的方法。J. Sonl 等[34]对钢箱桥面板在典型的汽车炸弹下的抵抗能力进行了有限元非线性分析。研究结果表明，高延性钢比高强度钢桥面板具有更好的抵抗爆炸荷载的能力。K. C. Edmond 等[35]和 H. Hao 等[36]用有限元软件 LS-DYNA 进行了悬索桥桥面等不同部位爆炸下桥梁的响应和加固情况。蒋志刚等[37]对大跨度缆索承重桥梁钢箱梁桥面板爆炸冲击响应数值模拟研究，运用 LS-DYNA 非线性有限元软件，研究了箱包炸弹和小轿车炸弹(TNT 当量 10～500 kg)桥面爆炸冲击作用下缆索承重桥梁钢箱梁正交异性桥面板的塑性变形、开裂与破口及耗能。模拟结果表明：随着装药量的增大，桥面板的损伤程度和范围越大。桥面板的变形过程可分为 3 个阶段：第 1 阶段，盖板板格变形阶段；第 2 阶段，桥面板塑性变形扩展阶段；第 3 阶段，弹性振动阶段，桥面板绕最大塑性变形位置波动，直至静止。定义使盖板刚刚产生裂纹的冲量荷载为临界荷载，当冲量荷载大于临界荷载时，桥面板将出现裂纹和花瓣型破口；破坏形式由局部塑性大变形、开裂发展为花瓣型破口。结果表明：桥面板的主要耗能机制为盖板和加劲肋的塑性变形耗能，占爆炸输入能量的 70%以上；加劲肋和横隔板对桥面板破口有约束作用，TNT 当量为 300～500 kg 时，纵桥向破口尺寸小于等于横隔板间距，并小于横桥向破口尺寸。

1.2.2　桥面受爆损伤分析

上述方法非常有效地预测了爆炸荷载下结构的动力响应，然而这些方法均未对局部破坏给出有效预测，也没有相应的破坏准则[38]。而公路砼梁桥破坏的主要模式为冲击波的冲量引起的局部破坏[39]：当结构具有较好的延性时，炸药当量较大，桥面板的破坏一般为弯曲破坏；当结构延性较差时，常发生冲切破坏。冲切破坏发生突然，属典型的脆性破坏，且冲切破坏造成冲切椎体外的板结构与支撑柱的脱离，结构抗力急剧下降，可能造成冲切椎体外的板结构发生严重的坍塌破坏。所以在进行桥面爆炸分析

的时候,不能忽略剪力的作用。桥梁在桥面爆炸荷载作用下破坏程度的演化过程可采用损伤力学的方法进行量化,F. R. Tuler 等[40]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"的层裂准则不同,其主要进步在于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,所以在工程上被普遍采用[41]。Tuler-Butcher 损伤累积准则的形式如下[42]:

$$\int_0^{t_c}\left[\frac{\sigma(t)}{\sigma_{th}}-1\right]^{\lambda}\mathrm{d}t=\Psi \tag{3}$$

式中:σ_{th}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 为拉应力作用下材料发生层裂所需要的时间,λ、Ψ 为材料参数。当 $\lambda=1$ 时,式(3)为冲量准则;当 $\lambda=2$ 时,式(3)为能量准则。Ψ 是一个具有时间量纲的物理量,可以由材料试验获得。Tuler-Butcher 损伤累积层裂准则定义的损伤 D:

$$D=\frac{1}{\Psi}\int_0^{t}\left[\frac{\sigma(t)}{\sigma_{th}}-1\right]^{\lambda}\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中:损伤因子 D 的取值范围为 0~1,利用 Tuler-Butcher 损伤累积准则可以对桥梁进行爆炸荷载作用下的损伤评估的理论依据。

学者们对桥面爆炸下的损伤进行了大量研究。伍建强[43]对大跨连续刚构桥抗导弹冲击能力分析及抢修技术初步研究。邓荣兵等[44]应用非线性动力有限元方法对爆炸冲击波作用下桥梁的损伤效应进行了三维数值模拟,得到了空中爆炸冲击波的传播规律曲线和峰值压力曲线,通过与实验公式对比,验证了爆炸荷载计算模型的有效性和计算结果的可靠性,并在此基础上研究了桥梁在爆炸载荷作用下的非线性动态响应。计算结果表明:爆炸冲击波对桥梁的损伤效应呈现局部破坏特征,桥梁迎爆面局部结构损伤较大且以破口形式存在。数值仿真结果为桥梁的抗爆承载计算和安全性评估提供了重要的参考依据。张开金[45]对爆炸荷载作用下混凝土桥梁的损伤特性进行了研究。通过改变荷载加载位置、加载大小、加载速率及混凝土强度等级,对结构的损伤效应及损伤因素加以分析,得出了各参数对结构损伤效应的影响程度及规律。朱劲松等[46]为了对人流、车流密集的城市市政桥梁进行合理的抗爆设计和爆炸风险评估,提出了爆炸荷载作用下城市桥梁动态响应与损伤过程分析的数值方法,其计算结果可作为抗爆设计和爆炸风险评估的依据。

1.2.3 桥面受爆引起的落梁

产生落梁的主要原因有[47]:(1)墩梁相对位移超过墩顶搭接长度;(2)相邻跨上部结构横向反向变位所致;(3)相邻上部结构间距过小,上部结构相互碰撞;(4)逐跨施工的连续上部结构在近墩处有一支承牛腿连接处,在爆炸作用下,连接破坏,导致梁体折断下落;(5)由于这种连续高架桥的结合部设在跨内弯矩较小处,结合部主要传递剪力,构造简单,但牛腿太短,支承面过窄,在强烈的爆炸荷载作用下,结合部容易损坏,使结构处于长悬臂状态,产生断裂而倒塌;(6)桥墩强度与变形能力不足,导致桥墩破坏;(7)相邻上部结构的支座纵向破坏,位移过大。为了防止地震荷载下的落梁,学者们在桥梁规范[5,48-50]中分别制定了相应最小搭接长度控制落梁,而我国规范中[51]规定了 6 度抗震区,简支梁梁端至墩、台帽或盖梁边缘应有最小搭接长度为:

$$a\geqslant 70+0.5L \tag{5}$$

式中:a 为最小搭接长度,cm;L 为梁的计算跨径,m,如图 6 所示。

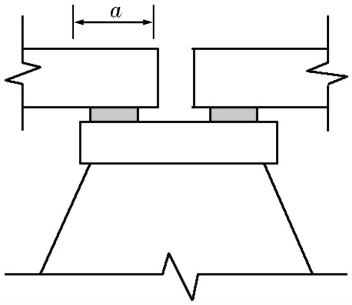

图 6 梁端至墩、台帽或盖梁边缘的最小距离

Fig. 6 Minimum distance from beam end to pier, cap and coping edges

学者们对于梁式桥的落梁进行了大量研究[5,47,52-55],但是引发落梁的荷载主要为地震荷载。而近几年的偶然性爆炸事件(如 2013 年 2 月 1 日我国义昌大桥坍塌事件等)表明,偶然性爆炸荷载即使荷载不大,但由于桥梁的结构型式和爆炸位置特殊,也会引起也会造成较大的破坏。例如简支梁桥对爆

炸荷载较为敏感，其敏感性体现在即使很小的爆炸荷载作用下，若爆炸位置特殊，也可能发生落梁甚至由于局部落梁造成大桥的多跨跨塌。

1.2.4 桥索和桥塔受爆结构的响应

对于悬索桥，桥索和桥塔是斜拉桥的主要组成部分，即使较小的偶然性爆炸发生在桥塔或者桥索附近，也会发生大于爆炸规模的破坏[56]。斜拉桥是将主梁用许多拉索直接拉在桥塔上的一种桥梁，是由承压的塔、受拉的索和承弯的梁体组合起来的一种结构体系，也可以看作是拉索代替支墩的多跨弹性支承连续梁。和梁桥不同，悬索桥在桥面爆炸下可能会由于爆炸荷载靠近桥索，桥索和桥塔在爆炸下断开，会引起桥梁的内力重分布，若破坏规模较大，将会引起桥梁的整体坍塌。K. N. Suthar[21] 用 SAP2000 软件研究了切萨皮克地区跨海悬索大桥在恒荷载，活荷载和爆炸荷载作用下的响应，分别考虑了 500 kgTNT 在甲板上 3 种不同工况。当达到承载力极限时，作者用非线性塑性铰开展了连续性倒塌分析。通过弯矩和构件的变形情况可以看出，虽然悬索桥在爆炸荷载下遭遇了严重的局部损伤，然而桥面爆炸荷载下并不太可能发生桥梁的整体坍塌。K. C. Edmond 等[35] 和 H. Hao 等[36] 用有限元软件 LS-DYNA 计算了桥面、桥墩、桥索和桥塔爆炸下的损伤情况，同时考虑了用 CFRP 进行加固，并对加固效果进行了分析。王赟等[57] 以润扬悬索桥为例，针对大跨度悬索桥可能遭受的爆炸冲击波威胁，研究了空中爆炸冲击波荷载作用下悬索桥的竖向弯曲振动。基于悬索桥挠度理论，采用模态叠加法得到了悬索桥空中爆炸冲击波作用下动挠度的解析解为：

$$\eta=\sum_{i=1}^{N}\eta_{zi}\varepsilon_i=\sum_{i=1}^{N}\eta_{zi}\frac{\bar{v}_i}{\omega_i}\sin(\omega_i t) \tag{6}$$

式中：η 为动挠度，$\eta_{zi}=\dfrac{\eta_i}{\sqrt{\bar{m}_i}}$，$\bar{m}_i=\int_0^l m\eta_i^2(x)\mathrm{d}x$，$\bar{v}_i=\int_0^l m\eta_{zi}^2 v_0\mathrm{d}x$，$v_0$ 为加劲梁初速度，η_{zi} 为振型函数，ε_i 为应变，m 为单位桥长质量。算例验证最大动挠度解析解与数值模拟结果吻合较好，误差小于 10%。

大跨度缆索承重桥梁遭受恐怖爆炸袭击的风险比一般桥梁大。蒋志刚等[58] 以润扬悬索桥（主跨 1 490 m）为例，针对大跨度悬索桥可能遭受的爆炸袭击，运用 ANSYS 软件进行二维简化建模研究了空中爆炸冲击波作用下悬索桥竖向弯曲响应。研究表明：悬索桥的竖弯响应过程可分为非稳态和稳态两阶段，所有构件的最大内力均发生在非稳态阶段。非稳态阶段相联构件间相互作用强烈，构件内力变化大。稳态阶段构件间的相互作用减弱，构件内力绕恒载值小幅波动。装药水平位置对加劲梁和吊杆最大内力影响显著，但对主索最大内力的影响不明显；加劲梁的最不利荷载位置在跨端，吊杆的最不利荷载位置在跨中。

1.2.5 桥梁的连续性倒塌

对于桥梁的连续性倒塌问题仅有少量研究，比较典型的主要是 U. Starossek[59-60] 以一个多跨预应力混凝土桥的连续性倒塌问题为例，对桥梁结构局部破坏引发的连续性倒塌问题进行了研究，给出了桥梁的连续性、冗余性和鲁棒性在分析过程中的重要性，给出了一种桥梁连续性倒塌的分析方法和设计建议，研究弥补了现有桥梁规范抗连续性倒塌的不足。成丕富[61] 对桥梁结构连续倒塌进行了研究。在综述建筑和桥梁抗连续倒塌的研究现状及相关规范的基础上，分析了桥梁连续倒塌的特性及现行桥梁设计方法的缺陷。提出桥梁的抗连续倒塌设计体系及针对不同桥型的抗连续倒塌设计方法。对于爆炸作用下桥梁的连续性倒塌问题未见报道。

2　桥梁爆炸安全评估

桥梁的安全评估主要包括承载能力评估、耐久性评估和适用性评估，其中承载力评估为安全评估的主要内容。爆炸作用下桥梁的承载能力评估主要指爆炸作用下桥梁结构各组成部分及整体结构在强度、刚度等方面是否满足现有荷载等级的要求，以及其能否适应爆炸荷载的进一步发展的要求。其评估结果主要与桥梁结构各组成部分或整体的极限强度、稳定性有关。评估的目的是要找出桥梁结构的实际安全状况，以避免桥梁在日常使用中发生灾难性的后果。安全评估的方法主要有专家经验评定法、荷

载试验法、基于设计规范的方法、基于结构可靠性理论的方法、层次分析法、基于结构可靠性理论的方法等。近年来,桥梁结构设计规范普遍依据结构可靠度理论对结构进行安全评估。结构失效可以用 2 类极限状态表示:承载能力极限状态和正常使用极限状态。具体实现方法有 2 种:其一是直接计算桥梁的可靠指标,与目标可靠指标进行对比;其二是应用基于可靠度的桥梁评估规范。对于重要、复杂桥梁可应用直接计算方法,其主要的工作包括失效模式、结构分析模型、荷载和抗力模型、目标可靠度的确定,以及可靠指标的计算和结构安全判别等。

学者们对于桥梁爆炸的安全评估开展了研究[14,62-63],A. Islam[14]用 AASHTO 指定的概率为基础的设计方法,评估了爆炸荷载作用下桥梁的安全,建模并记录了 AASHTO 梁、墩、柱等典型构件在爆炸荷载下的性能,对研究结果进行了分析,给出必要的保护措施和桥梁改造和设计指南。B. Michele[62]对桥梁在恐怖袭击下的易损性提出了一个合理的评估方法,该方法涉及的概率分析为一种理论分析方法,弥补了现有研究中的理论空缺。对于桥梁损伤程度的界定,可以分为单个构件的界定和整体结构的界定。对于桥梁单个构件损伤程度的具体界定,可以依据构件丧失承载力的简化理论判据评估,将构件的损伤程度依次划分为 3 个等级:轻度损伤、中度损伤和严重损伤。A. R. Al-Wazeer[63]对桥梁进行了风险评估,给出了基于风险的桥梁维护策略。对于桥梁的整体结构损伤程度的界定,K. N. Suthar[21]对爆炸高度为 6 英尺,炸药位置分别在中跨的跨中、边跨的跨中和中跨的末端上 3 种工况对桥梁在爆炸荷载作用下的受力情况进行了分析。根据计算结果,把结构破坏分为 3 个等级:瞬时破坏(immediate occupancy /IO)等级,该破坏为轻微破坏。此时结构为对车辆仍可以安全同行,桥梁是稳定的桥梁可以维修;生命安全(life safety /LS)等级。此时桥梁被严重破坏,然而桥梁没有倒塌。在桥梁开始继续通行前必须进行检测盒维修;倒塌防护等级(collapse prevention /CP),结构在倒塌的边缘。桥梁已经达到应力和变形极限,结构已大面积被破坏,维修已经不是一种经济型的选择了。此时需要桥梁的重建,此时结构处于不稳定的状态,生命将受到威胁。分析的过程中根据结构振动过程中塑性铰的发展程度判断桥梁的性能进行评估。

3 桥梁特殊爆炸问题

3.1 桥梁爆破拆除

随着城市建设的发展,需要拆除的桥梁项目也会越来越多。城市爆破技术的关键在于通过设计实现桥跨逐段连续倒塌落地,将塌落震动分时段和分散体积对地面形成冲击。于是,在设计时在药孔设计上采用多钻孔、少装药和延期起爆技术,使爆炸能量释放均衡、爆炸荷载均布,爆炸作用合理调配,减少一次齐爆的总药量。龙源等[64]采用控爆法成功拆除一座危桥,文章阐述了拱肋、桥面梁、桥墩、桥柱各部位爆破参数的选择,起爆网路形式和起爆延时的设计,以及爆破安全校核,可供类似工程参考。纪冲等[65]针对城市桥梁桥体冲击地面作用过程进行数值计算,描述了桥体冲击作用下在介质中产生的弹塑性应力波的传播衰减过程,进而分析了隧道结构在桥梁爆破拆除塌落冲击作用下动力响应。研究表明:桥体在塌落触地时对地面的冲击振动有可能对地铁隧道的稳定性构成危害。为切实保证爆破后地铁隧道的安全稳定性,采用在桥下方铺设钢板/橡胶轮胎复合式结构缓冲防护层的方式以达到防护减振的效果。杨国良等[66]利用有限元 ANSYS/LS-DYNA 对某公路桥梁的爆破拆除过程进行了数值模拟,准确的再现了该桥的爆破拆除过程,并对该桥的爆破失稳、倒塌机理进行了详尽分析。

3.2 近地下爆炸对桥梁的响应

随着地下空间地开发和利用,地下爆炸也会对附近地表结构造成一定影响,造成不同程度的破坏。赵曙光[67]针对连续梁桥、桁架桥和斜拉桥等 3 类不同桥型结构在遭受邻近地下隧道内爆炸作用下的动力响应进行了系统研究,对半无限地基土和埋置于其中的地铁隧道以及地面上不同的桥梁结构所组成的体系建立了适当的数值模型,并利用 LS-DYNA 有限元软件计算出了隧道内点源爆炸在其内壁产生的爆炸超压荷载,针对所建立的不同类型桥梁结构在临近地下隧道内突发爆炸时产生的弹塑性动力时程响应进行分析研究。通过变换爆炸荷载和结构的特征参数,得到不同参数对结构动力响应的影响。

4　存在的问题与建议

综上所述，对桥梁抗爆的安全评估研究开展时间较晚，研究多以试验和数值模拟为主，尚未建立合理的桥梁爆炸力学模型和有效的抗爆设计和加固方法。针对研究中的不足，提出以下建议：

(1)建立、健全安全等级分类。对所有桥梁进行抗爆设计是不经济的，所以应合理地对结构遭受爆炸概率进行统计，对爆炸荷载可能出现的规模进行分级，同时对建筑物按照用途、设计使用年限和重要性进行分类，根据分类提出相应的设计要求。

(2)不同类型桥梁体系建立不同的抗爆方案。桥梁结构的结构形式众多，不同类型结构体系在爆炸荷载的作用下的材料特性、结构局部破坏和整体失稳模式都不同，因此，需要分别考虑和制定不同的抗爆设计方法。

(3)合理的加固建议。桥梁的抗爆加固主要分为材料加固和结构加固。对于桥梁抗爆的结构加固方法还不成熟，较为常用的复合材料是纤维增强复合材料(FRP)，用复合材料对桥梁进行抗爆加固，可以提高结构局部和整体的抗爆性能。

(4)规范建议。爆炸荷载作用下结构的动力响应和破坏的计算方法在防护工程各类规范中已经有了系统的阐述，桥梁结构的相应计算和设计可参照防护工程规范开展研究工作。同时鉴于爆炸荷载和地震荷载有着一定的相似性，也可适当参照桥梁抗震的设计规范。

参考文献：

[1] 王利辉，杜修力，韩强，等. 桥梁抗震加固方法评述[J]. 工程抗震与加固改造，2009，31(6)：79-83.
Wang Lihui, Du Xiuli, Han Qiang, et al. Review on seismic retrofit methods of bridges[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009，31(6)：79-83.

[2] 孙建运，李国强. 建筑结构抗爆设计研究发展概述[J]. 四川建筑科学研究，2007，33(2)：4-10.
Sun Jianyun, Li Guoqiang. Summarization on the design of architecture and structure engineering to resist blast load[J]. Sichuan Building Science, 2007，33(2)：4-10.

[3] 张宇，李国强. 建筑结构抗爆设计标准现状[J]. 爆破，2014，31(2)：153-160.
Zhang yu, Li Guoqiang. Status of blast-resistant structure standards[J]. Blasting, 2014，31(2)：153-160.

[4] 王静好，王凤鸣，张青天，等. 悬索桥抗爆分析的展望[J]. 结构工程师，2014. 30(4)：204-209.
Wang Jingyu, Wang Fengming, Zhang Qingtian. Expectation of anti-explosion analysis of the suspension bridge [J]. Structural Engineers, 2014，30(4)：204-209.

[5] AASHTO LRFD Bridge design specification[S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation officials, 2005.

[6] Design manual for roads and bridges: Loads for highway bridges: BD 37/01[S]. BS: The Highways Agency, 2001.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ11-2011[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[8] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵地基与基础设计规范：JTG-D63-2007[S]. 北京：人民交通出版社，2007.

[9] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵施工技术规范：JTG-TF50-2011[S]. 北京：人民交通出版社，2011.

[10] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵抗震设计细则：JTGTB02-01-2008[S]. 北京：人民交通出版社，2008.

[11] 中华人民共和国交通部. 公路砖石及混凝土桥涵设计规范：JTJ022-8[S]. 北京：电子工业出版社，1985.

[12] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范：JTG D60-2004[S]. 北京：人民交通出版社，2004.

[13] Williamson E B. Blast-resistant highway bridges: Design and detailing guidelines[R]. National Cooperative Highway Research Program Report 645, 2010.

[14] Islam A. Performance of AASHTO girder bridges under blast loading[D]. USA: Florida State University, 2005.

[15] Rutner M, Astaneh-Asl A, Son J. Protection of bridge piers against blast[C]// Proceedings of the 6th Japanese-German Bridge Symposium, 2005.

[16] Agrawal A K. Blast Load Effects on Highway Bridges[R]. University Transportation Research Center, the City

College of New York, 2009.
[17] Winget D G, Marchand K A, Williamson E B. Analysis of blast loads on substructures[C]// Proceedings of Structures under Shock and Impact. Greece, 2004.
[18] Mander J B, Seismic design of bridge piers[D]. University of Canterbury, 1983.
[19] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete: ACI 318-05 and commentary[S]. Farmington Hills: MI 48331, 2005.
[20] Sezen H, Moehle J. Seismic tests of concrete columns with light reinforcement[C]// The 6th Japanese German Bridge Symposium, Germany, 2006.
[21] Suthar K N. The effect of dead load, live and blast loads on a suspension bridge[D]. Maryland: University of Maryland, 2007.
[22] Bruneau M, Fujikura S, Diego L G. Blast resistant bridge piers[J]. Structural Design, 2007(3):342-365.
[23] Symonds P S. Elastic, Finite deflection and strain rate effects in a mode approximation technique for plastic deformation of pulse-loaded structures[J]. Mechanical Engineering, 1980,22(4):189-197.
[24] Yankelevsky D Z. Elasto-plastic blast response of rectangular plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1985,3(2):107-109.
[25] Ross T J. Direct shear failure in reinforced concrete beams under impulsive loading[D]. California: Stanford University, 1983.
[26] Krauthammer T, Assadi L A, Shanaa H M. Analysis of impulsively loaded reinforced concrete structural elements[J]. Computer Structure, 1993,48(5):851-860.
[27] Low H Y, Hao H. Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading[J]. Engineering Structure, 2002, 24(2):189-198.
[28] Shope R L. Response of wide flange steel columns subjected to constant axial load and lateral blast load [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
[29] Bigs J M. Introduction to structure dynamics[M]. US: McGraw-Hill Incorporated, 1964.
[30] 倪振华. 振动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1994.
[31] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.
[32] 朱慈勉,张伟平. 结构力学[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
[33] 陈惠发. 弹性与塑性力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
[34] Sonl J, Astaneh-Asl A. Blast resistance of steel orthotropic bridge decks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012,17(4):589-598.
[35] Edmond K C, Tang, Hao H. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part Ⅰ: Model development and response calculations[J]. Engineering Structures, 2010,32(10):3180-3192.
[36] Hao H, Edmond K C, Tang. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part Ⅱ: Damage prediction and FRP strengthening[J]. Engineering Structures, 2010,32(10):3193-3205.
[37] 蒋志刚,白志海,严波,等. 钢箱梁桥面板爆炸冲击响应数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2012,31(5):134-154.
Jiang Zhigang, Bai Zhihai, Yan Bo, et al. Numerical simulation for response of a steel box girder deck to blast loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(5):134-154.
[38] Shi Y C, Hao H, Li Z X. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,35(11):121-127.
[39] 刘山洪,魏建东,钱永久. 桥梁结构爆炸分析特点综述[J]. 重庆交通学院学报,2005,24(3):16-19.
Liu Shanhong, Wei Jiandong, Qian Yongjiu. State of the art of research and analysis of structure and bridge under blast loads[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005,24(3):16-19.
[40] Tuler F R, Butcher B M. A criterion for the time dependence of dynamic fracture[J]. International Journal of Fracture, 1968,4(4):431-437.
[41] 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.
[42] 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]. 高压物理学报,2009,23(4):271-276.

Jiang Dong, Li Yongchi, Guo Yang. Modification of Tuler-Butcher model with damage influence[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(4):271-276.

[43] 伍建强. 大跨连续刚构桥抗导弹冲击能力分析及抢修技术初步研究[D]. 成都：西南交通大学，2006.

[44] 邓荣兵，金先龙，陈向东，等. 爆炸冲击波作用下桥梁损伤效应的数值仿真[J]. 上海交通大学学报，2008,42(11):1927-1930.
Deng Rongbing, Jin Xianlong, Chen Xiangdong, et al. Numerical simulation for the damage effect of bridge subjected to blast wave[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008,42(11):1927-1930.

[45] 张开金. 爆炸荷载作用下混凝土桥梁的损伤特性[D]. 西安：长安大学，2009.

[46] 朱劲松，邢扬. 爆炸荷载作用下城市桥梁动态响应及损伤过程分析[J]. 天津大学学报：自然科学版，2015,48(6):510-519.
Zhu Jinsong, Xing Yang. Dynamic response and damage process analysis of urban bridge subjected to blast load [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2015,48(6):510-519.

[47] 孔艺达. 梁式桥防落梁最小搭接长度初步研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2010.

[48] California Department of Transportation. Seismic design criteria[S]. Version 1.7, California,2013.

[49] California Department of Transportation. Seismic design references[S]. California, 1990.

[50] 日本道路协会. 道路桥示方书同解说[S]. V 耐震设计编，1996.
Japanese highway society. Bridge criteria[S]. Japanese highway society, 1996.

[51] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁抗震设计细则：JTGTB02-01-200[S]. 北京：人民交通出版社，2008.

[52] 朱文正. 公路桥梁减、抗震防落梁系统研究[D]. 西安：长安大学，2004.

[53] Saiidi M, Randall M, Maragakis E, et al. Seismic restrainers design methods for simply supported bridges[J]. Bridge Engineering, 2001,6(5):307-315.

[54] Trochalakis P, Eberhard M O, Stanton J F. Design of seismic restrainers for in-span hinges[J]. Journal of Structural Engineering, 1997,123(04):156-167.

[55] Yang Y S, Priestley M J N, Ricles J M. Longitudinal seismic response of bridge frames connected by restrainers [R]. Structural Systems Research Project Report, SS-RP-94/09. San Diego: University of California, 1994.

[56] Wang W, Liu R C, Wu B. Analysis of a bridge collapsed by an accidental blast loads[J]. Engineering Failure Analysis, 2014,36(1):353-361.

[57] 王赟，蒋志刚，严波. 爆炸冲击波荷载作用下悬索桥的竖弯振动[J]. 公路，2011,3(3):1-4.
Wang Yun, Jiang Zhigang, Yan bo. Vertical bending vibration of suspension bridge under air explosion loading [J]. Highway,2011,3(3):1-4.

[58] 蒋志刚，王赟，严波，等. 爆炸荷载作用下悬索桥竖弯响应的数值模拟[J]. 振动与冲击，2012,2(31):23-45.
Jiang Zhigang, Wang Yun, Yan Bo, et al. Numerical simulation for vertical bending response of a suspension bridge under air explosion loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,2(31):23-45.

[59] Starossek U. Progressive collapse study of a multi-span bridge[J]. Structural Engineering International, 1999,9 (2):121-125.

[60] Starossek U. Progressive collapse of bridges-aspects of analysis and design[C]// Proceedings of the International Symposium on Sea-Crossing Long-Span Bridges. Mokpo, Korea, 2006:15-17.

[61] 成丕富. 桥梁结构连续倒塌研究[D]. 长沙：中南大学，2012.

[62] Michelle B. Generalized assessment of bridge vulnerability to terrorist threats: a probabilistic structural analysis based approach[D]. Newark: University of Delaware, 2006.

[63] Al-Wazeer A R. Risk-based bridge maintenance strategies[D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 2007.

[64] 龙源，亓秀泉，徐全军，等. 控制爆破在江都大桥拆除中的应用[J]. 工程爆破，2007,4(13):66-68.
Long Yuan, Qi Xiuquan, Xu Quanjun, et al. Application of controlled blasting in demolishing Jiang-Du bridge[J]. Engineering Blasting, 2007,4(13):66-68.

[65] 纪冲，龙源，金广谦，等. 隧道结构在桥梁爆破拆除塌落冲击作用下动力响应的数值模拟分析[C]// 中国爆破新技术Ⅲ，2012:43-51.

[66] 杨国梁,杨军,育尤军.桥梁爆破拆除的有限元法模拟研究[C]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集.井岗山,2007:365-370.

[67] 赵曙光.桥梁结构遭受地下隧道内爆炸冲击作用下的动力响应研究[D].天津:天津大学,2009.

Research advances of safety assessment of bridges under blast load

Zhang Yu [1,2,3], Li Guoqiang[2], Chen Kepeng[4], Chen Airong[2]

(1. *Department of Building Engineering, Logistics University of PAPF, Tianjin* 300162, *China*;
2. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*;
3. *State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *Shaanxi*, *China*;
4. *The Architectural Design & Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou* 310000, *Zhejiang*, *China*)

Abstract: With the potential increase of terrorist attacks and blasting accidents, bridge safety has become a major public concern and greater attention is paid to the safety assessment of bridges under blast load. In this paper, the most recent research of bridges under blast load is systematically analyzed. Firstly, the simplified theories and dynamic response of pier, deck, cable and tower under blast load are sequentially analyzed and it has been demonstrated that the continuity, redundancy and robustness affect the progressive collapse of a bridge. Based on the review of the latest study on the progressive collapse of architecture and bridges and, in view of the relevant standards, the features of bridges' progressive collapse and shortages in the design methods are analyzed. Secondly, the recent study on bridge safety assessment, including load capacity evaluation, endurance evaluation and adaptability evaluation, is reviewed. Thirdly, a study of two specific blast problems of bridges, which are blasting demolition and dynamic response and damage of the bridge under near surface blast, is presented. Finally, suggestions are put forward aiming at rectifying the shortage in the recent bridge safety research

Key words: mechanics of explosion; safety assessment; structural reinforcement; dynamic response; blast load; bridge structure

(责任编辑 王易难)