

桥梁结构抗爆研究现状与展望*

胡志坚, 刘辉

武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063

摘要: 针对桥梁的抗爆能力和安全性问题, 文章从桥梁抗爆动力响应、爆炸荷载压力场分布、桥梁结构受爆炸倒塌破坏等方面对相关研究进行了梳理; 并对荷载场、预应力砼结构动力响应研究、剩余承载力评估、实桥爆炸试验、桥梁结构爆炸防护等研究领域进行了展望, 为进一步开展桥梁抗爆研究提供借鉴, 同时也为桥梁抗爆防护设计及炸后桥梁状况评估提供理论参考。

关键词: 桥梁抗爆; 动力响应; 压力场; 破坏模式

中图分类号: U447 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)05-0013-10

State of the-art of anti-blast study for bridge structures

HU Zhijian, LIU Hui

School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: In view of the anti-explosion ability and safety of bridges, this paper reviews the relevant researches from the aspects of the anti-explosion dynamic response of bridges, the distribution of explosion load and pressure field, and the collapse damage of bridge structures by explosion. The research fields such as load field, dynamic response study of prestressed concrete structure, residual bearing capacity evaluation, explosion test of real bridge and explosion protection of bridge structure are prospected, which can provide reference for further research on anti-explosion of bridge, as well as theoretical reference for design of anti-explosion protection of bridge and condition evaluation of bridge after explosion.

Key words: anti-blast for bridges; dynamic response; the pressure field; failure modes

偶发爆炸事故、恐袭或战争所造成的桥梁爆炸损毁事件正日益增多, 桥梁结构抗爆安全性也越来越受到社会关注。桥梁作为公共交通设施具有开放性的特点, 车载爆炸物可靠近或直接接触桥梁构件, 爆炸物发生爆炸时, 桥梁结构构件通常直接承受近场爆炸荷载冲击作用。如何在显著增

加经济成本的前提下提升桥梁结构的抗爆能力已逐步成为国内外学者密切关注的科学问题之一^[1-5]。但现有的桥梁结构抗爆研究尚处于探索阶段, 往往借鉴建筑工程结构抗爆研究成果, 大多是针对个例桥梁建立全桥数值模型进行分析, 未充分体现桥梁结构类型及其开放性等特点和桥梁结

* 收稿日期: 2020-11-10 录用日期: 2020-11-25 网络首发日期: 2021-07-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806000); 江西省“5511”重点研发计划(20165ABC28001); 江西省交通科技项目(2021Z0001)

作者简介: 胡志坚(1974年生), 男; 研究方向: 桥梁设计理论与安全技术; E-mail: hzj@whut.edu.cn

通信作者: 刘辉(1984年生), 男; 研究方向: 桥梁结构分析与抗爆设计; E-mail: 280571400@qq.com

胡志坚, 男, 教授, 博士生导师。现任中国公路学会交通院校工作委员会副秘书长、中国土木工程学会桥梁与结构工程分会理事。获江西省科技进步奖等省部级科技进步奖7项, 出版“十一五”国家重点图书等著作3部, 主持教育部中央高校自主创新基金重大基础研究培育项目、国家重点研发计划等重大课题多项。

构受爆损伤破坏机理等, 存在桥梁结构动力响应机理不明、爆炸荷载作用规律不清晰、结构受爆后剩余承载力评估方法不明等不足, 所获取的研究成果也缺少试验或实桥数据验证的问题。且, 爆炸荷载作用下的破坏机理、动力响应等关键问题还有待深入。

本文从荷载压力场分布、桥梁抗爆动力响应、桥梁结构受爆炸荷载作用时的倒塌破坏等方面进行总结, 并对荷载场、预应力砼结构动力响应研究、剩余承载力评估、实桥爆炸试验、桥梁结构爆炸防护等领域进行了展望, 以期为未来开展桥梁抗爆研究提供借鉴。

1 荷载压力场

根据爆炸物与构件是否接触, 爆炸可为非接触爆炸 (近场爆炸、远场爆炸) 和接触爆炸。近场爆炸时, 爆炸冲击波尚未完全扩散就直接作用在结构或构件上, 呈现局部性损伤破坏特征; 远场爆炸时, 爆炸荷载在结构不同位置处近似呈均匀分布^[4-5]。基于爆炸作用对桥梁结构产生的影响和桥梁结构开放性特点, 目前主要针对近场爆炸和接触爆炸进行研究。

1.1 近场爆炸

1.1.1 桥面爆炸 爆心位于桥梁结构上方, 属于自由空气场中的近场爆炸, 分析时可以考虑桥面板的整体受力。娄凡^[6]对预应力砼连续T梁进行了野外爆炸实验, 获取了超压时程曲线和桥面超压分布等数据, 所获得的桥面超压峰值分布图如图1所示。图1中, 沿桥梁纵、横向的爆炸超压均呈非线性分布, 爆心正下方位置的超压峰值最大, 并迅速向四周衰减变化; 若保持其比例距离不变而增加炸药当量值, 则超压峰值在爆心正下方处不发生变化, 但超压值在其它桥面位置都显著增大; 若爆心高度不变, 则随着比例距离减小, 爆炸荷载超压呈急剧上升。

实际中, 桥面爆炸多由车载炸药爆炸或易燃易爆危化品等引发。胡志坚等^[4]采用数值模拟和实桥反演分析相结合方法, 对混凝土梁桥桥面爆炸的压力场分布规律进行研究。结果表明: 车载爆炸物爆炸时车辆车厢底盘钢板对爆炸冲击波发散产生很明显的阻挡作用, 从而使主梁可能出现弯曲破坏、弯剪破坏、剪切破坏等几种特征破坏区域, 如图2所示。

1.1.2 桥下爆炸 胡志坚等^[4]研究了桥下爆炸时

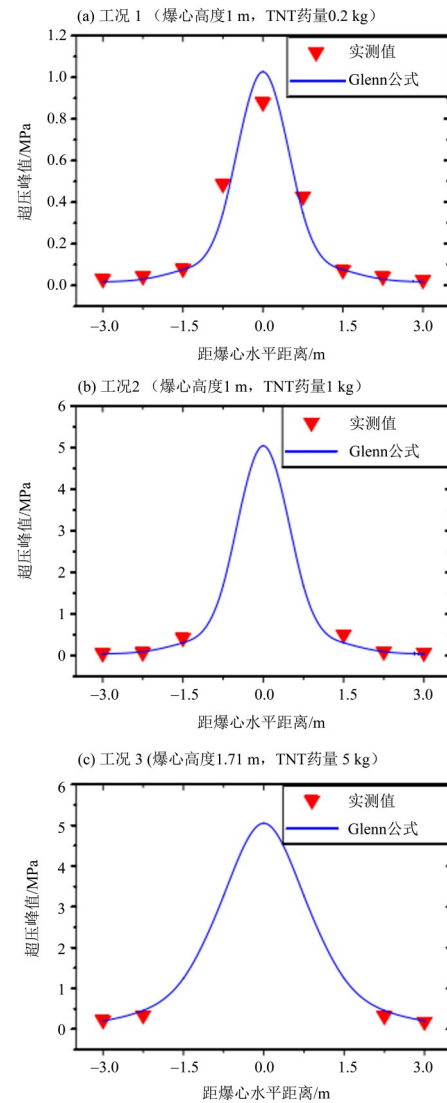


图1 桥面超压峰值分布图^[6]

Fig. 1 Peak overpressure distribution above deck^[6]

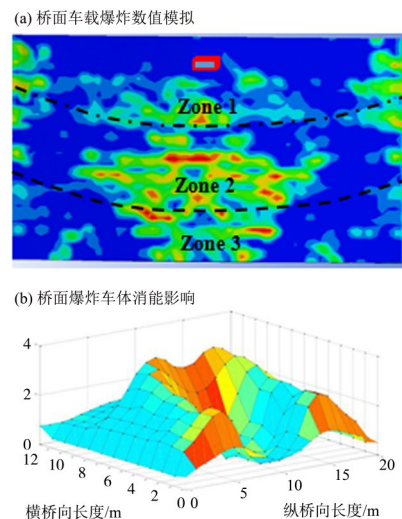


图2 桥面车载爆炸数值模拟研究^[4]

Fig. 2 Numerical simulation of vehicular explosion above bridge deck^[4]

混凝土梁桥的梁肋和腹板间的压力场分布, 见图3。对于T梁和小箱梁桥面结构, 桥下爆炸时爆炸冲击波在梁肋和腹板间会形成多次反射作用, 具有较明显的密闭空间约束效应, 并且距离翼板部位越近, 爆炸冲击波的封闭约束效应越显著。

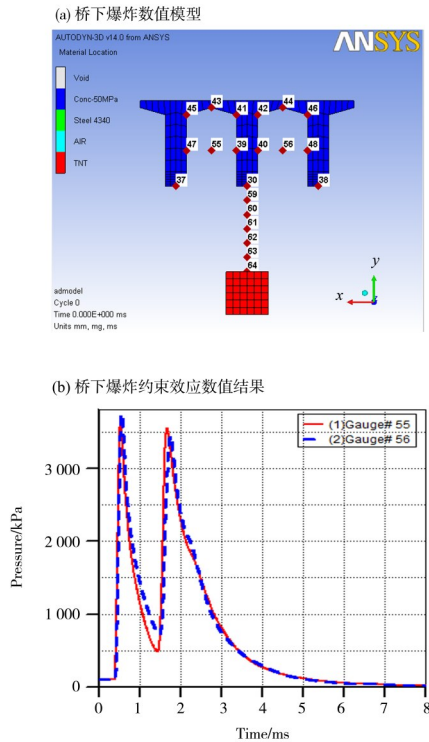


图3 桥下爆炸数值模拟研究^[4]
Fig. 3 Numerical simulation of under-deck explosion^[4]

院素静^[7]进行了预应力砼连续T梁桥缩尺模型的桥下爆炸现场试验。研究表明: 桥下爆炸自由场超压、柱身反射超压、T梁梁底反射超压等均呈现多峰值分布特征, 地面成坑会使超压峰值出现明显下降以及波前到达时间滞后。冲击波沿桥墩墩柱产生绕射, 实测正压沿柱高的分布呈现出柱中最短、柱底次之、柱顶最长的规律。

1.1.3 箱梁内爆炸 姚术健等^[8]针对汽车炸弹爆炸冲击作用下的空间桁架体系钢箱梁, 开展了局部破坏效应研究。研究表明: 爆炸当量和爆心位置对结构主要受力体系破坏模式具有重要影响, 随着爆炸当量增加, 钢箱梁的破坏参数增大, 钢箱梁加劲肋对垂直方向的破口开裂发挥约束作用, 爆心位置对横梁和立柱等重要受力构件损毁程度的影响较大。因此, 通过增强桥面板、加劲肋、横梁等主要构件间连接, 设置防爆层、合理布置加劲肋以及加强横梁、立柱等受力构件能提高结构的抗爆能力。

余学林^[9]分析了某飞燕式拱桥边跨主梁砼箱梁在爆炸作用下的局部响应, 如图4所示。研究发现桥面爆炸时爆炸源附近的钢筋砼箱梁顶板出现了较小的局部破坏; 箱梁内部爆炸时, 因爆炸冲击波不断反射叠加影响, 箱梁顶板、底板和腹板等局部构件均出现较大破坏, 其破坏程度远大于箱梁外部爆炸。

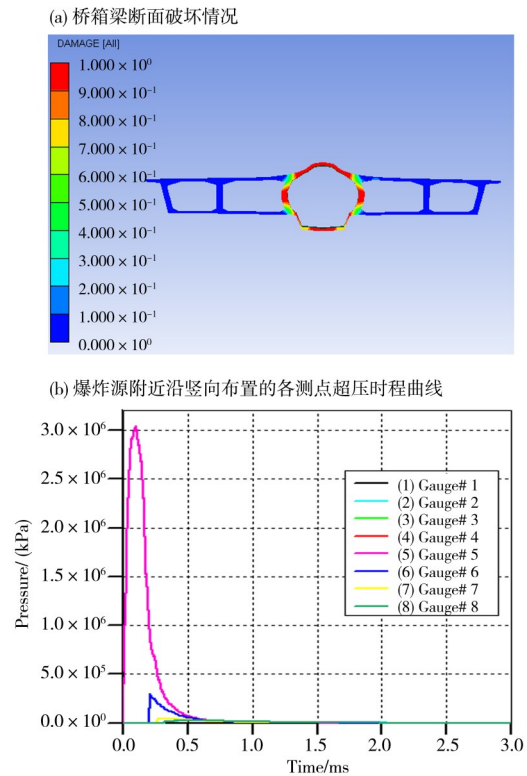


图4 箱梁内部爆炸作用下的效应研究^[9]
Fig. 4 Reponse of box girder under inner blast^[9]

1.2 接触爆炸

宗周红等^[10]开展了接触爆炸荷载作用下RC桥墩的抗爆性能研究试验。发现: 在炸药接触位置的RC桥墩墩柱极易产生较严重的局部损伤破坏, 呈冲切破坏模式; 柱身产生较多横向贯穿裂缝, 说明墩柱的整体动力响应不能忽略。Yuan等^[11]对接触爆炸荷载作用下的RC桥梁墩柱(圆形和方形截面)进行了数值计算, 并开展了缩尺模型爆炸试验研究。试验表明: 爆心高度附近的桥墩墩柱迎爆面及侧面混凝土表面均出现一定程度的损伤破坏, 背爆面混凝土表面基本完好无损; 方形截面墩柱较圆形截面墩柱受爆破坏更严重。

2 桥梁抗爆动力响应

2.1 桥梁结构整体抗爆研究现状

胡志坚等^[4]研究了实桥爆炸对桥梁结构的损

伤破坏情况, 探讨研究了混凝土梁桥在爆炸荷载作用下的破坏机制; Wang等^[12]根据炸药当量工程等效开展了炸后义昌大桥的数值模拟, 分析了结构的抗爆能力与破坏原因; Hu等^[13]结合实桥桥面爆炸分析提出了有效爆炸区的概念。

王向阳等^[14]采用数值模拟方法对混凝土连续梁桥在爆炸冲击作用下的破坏机理进行了研究。结果表明: 桥面上方爆炸时, 在装药量和比例距离不变的情况下, 炸药布设在中跨跨中位置时, 桥梁结构受爆后损伤破坏程度最严重。爆心位置在箱梁内部时, 在装药量相同情况下, 箱梁内爆炸对梁桥造成的破坏最为严重, 爆心附近的箱梁构件被

完全击穿破坏, 并形成巨大空洞。

李扬^[15]分析了某斜拉桥在爆点位置不同时主塔、斜拉索以及主梁的动力响应。结果表明: 在桥面车载爆炸时, 桥梁破坏模式表现为爆点附近的构件局部破坏形态, 其余区域构件尚处于弹性阶段, 结构未出现整体性倒塌; 结构振动主要由冲击波作用方向的第一阶振型主导控制; 索塔在爆炸冲击作用下动力响应表现为向爆点方向纵向飘移, 索塔的纵飘程度与爆点位置密切相关, 且爆点位于主跨跨中时较边跨跨中爆炸时纵飘更大; 相对其他斜拉索, 近索塔和爆点附近的斜拉索受爆后更容易失效, 如图5所示。

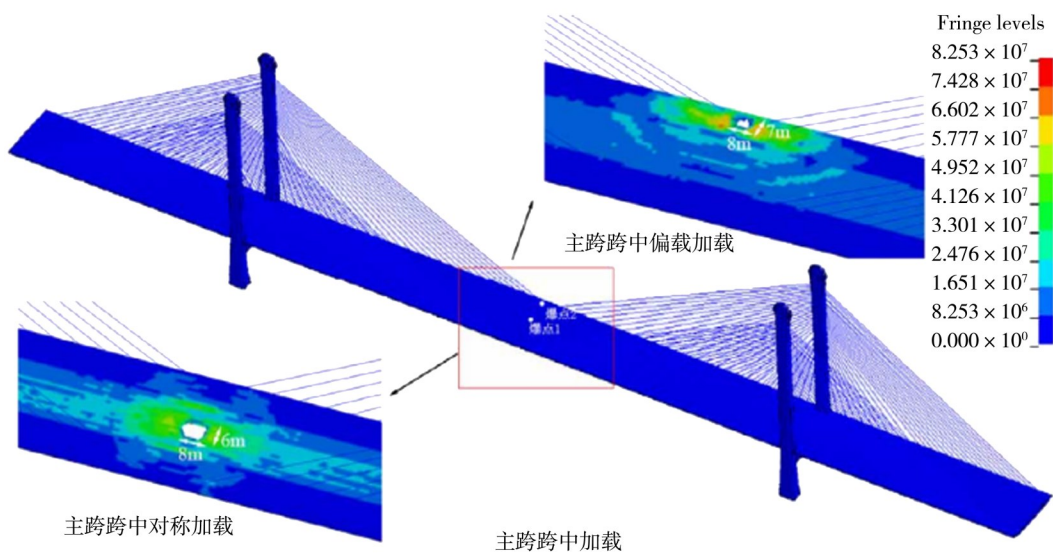


图5 斜拉桥主跨跨中爆炸应力云图^[15]

Fig. 5 Stress contour of cable-stayed bridge under mid-span blast^[15]

2.2 桥梁结构受桥面爆炸时的动力响应

2.2.1 梁式结构抗爆研究

梁式结构是现代桥梁中广泛采用的上部结构形式, 主要包括钢筋混凝土梁、预应力混凝土梁和钢箱梁等形式。

(1) 普通钢筋砼主梁。钢筋砼主梁在我国中小跨径桥梁中广泛使用。张媛媛^[16]和焦延平^[17]等采用ANSYS数值模拟分析了钢筋砼梁爆炸荷载作用下的动力响应; 刘超^[18]对爆炸荷载作用下不同配筋率(配箍率)、比例距离、防护构件及不同截面类型等情况下钢筋砼梁抗爆性能及破坏模式进行研究。结果表明: 当装药量或爆心距离不变时, 随着比例距离越小, 梁体破坏损伤程度越严重。同时, 减小主梁配筋率, 其破坏模式由弯曲破坏向弯剪破坏转变。而比例距离较小时, 通过增大主梁配箍率能显著提高梁体的抗爆性能。

李猛深等^[19]利用模爆器开展了RC简支试验

梁的爆炸荷载试验, 研究了RC简支梁的变形破坏特征, 并提出了RC简支梁的分离式有限元模型; 利用LS-DYNA分析了实验过程以及误差产生的原因, 得到了爆炸冲击作用下RC简支梁的损伤机理和破坏特征。此外, Foglar等^[20]开展了HPFRC和UHPFRC桥面的抗爆性能试验。

(2) 预应力砼主梁。陈力、方秦^[21]和李莹等^[22]给出了爆炸荷载作用下体外预应力梁体的动抗力分析方法; Shiravand^[23]基于数值模拟开展了后张预应力混凝土T构梁体的抗爆研究, 给出了结构的破坏过程, 但未深入研究预应力效应的变化规律。

胡志坚等^[24]开展了不同炸药条件、不同爆心位置 and 不同预应力度条件下的预应力砼梁体结构的抗爆研究, 如图6所示。研究表明: 炸药当量不同, 梁体的破坏模式也随之发生改变: 小当量炸药

爆炸时梁体构件受力模式为受弯,逐步增大炸药当量值,迎爆面梁体混凝土发生压溃破坏,并使混凝土剥离面积和破坏深度逐步增大,梁体最终由塑性破坏转为脆性断裂;中等炸药当量条件下,在梁上方发生爆炸时,按抗弯承载能力要求设置的预应力钢束能适度增强梁体抗爆能力;当梁下爆炸时,梁体抗爆能力因预应力效应的不利叠加而显著降低;炸药当量相同情况下,沿主梁纵向不同爆心位置,跨中爆炸时梁体受力最为不利;爆点位于支座处梁体上方时,主梁动力响应和损伤程度较小;炸药当量相同情况下,改变爆心相对梁体竖向位置将引起梁体破坏模式的变化。

基于缩尺模型爆炸试验,姜凡^[6]研究了桥上爆炸冲击作用下预应力砼连续T梁的破坏模式、动力响应及相关影响因素。研究表明:跨中桥面上方发生爆炸时,T梁桥面的破坏形态属局部冲切破坏,桥面板出现破碎开洞,顶底、腹板、T梁底混凝土崩落,且距离爆心位置较近的T梁损伤较严重;墩顶处(支点)桥面上方发生爆炸时,在类似小型客车满载爆炸物的爆炸当量作用下,T梁桥桥面未出现严重毁伤。

(3) 钢箱梁。基于多物质流固耦合理论,胡志坚等^[25]研究了爆炸冲击作用下钢箱梁的动力响应及损伤破坏模式,分析了TNT当量、钢板板厚、加劲肋布置形式等因素对钢箱梁抗爆性能的影响。研究发现:爆炸荷载作用下,钢箱梁构件破坏形态主要有破裂开口和塑性变形;钢箱梁顶板被爆炸冲击波破坏后,箱内加劲肋对冲击波传播产生较明显的阻挡效应;同时冲击波在翼板处狭小的空间内发生了明显封闭效应。综合考虑桥面铺装、箱梁抗爆性能和经济性等因素,推荐最优的顶板板厚为20 mm;若将加劲肋和顶板视为一个熔断体系,充分利用加劲肋和顶板间刚度差异,可将梁体破损范围限定在两加劲肋之间的区域。

蒋志刚等^[26]对钢箱梁在汽车炸弹桥面爆炸冲击波作用下的局部损伤破坏模式进行研究。研究表明:钢箱梁受爆后呈两种局部破坏模式。第一、桥面板和箱梁底板均破口,底板发生局部塑性大变形,而桥面板出现破口;第二、隔板的主要破坏模式为弯曲塑性大变形和破口两种。随着爆炸当量的增加,破坏参数呈非线性增加;冲击波对底板、隔板的冲击作用相对较小,顶板破片的冲击作用使隔板和底板产生局部塑性大变形和破口。

2.2.2 缆索桥梁 缆索承重桥梁跨径大,为跨越

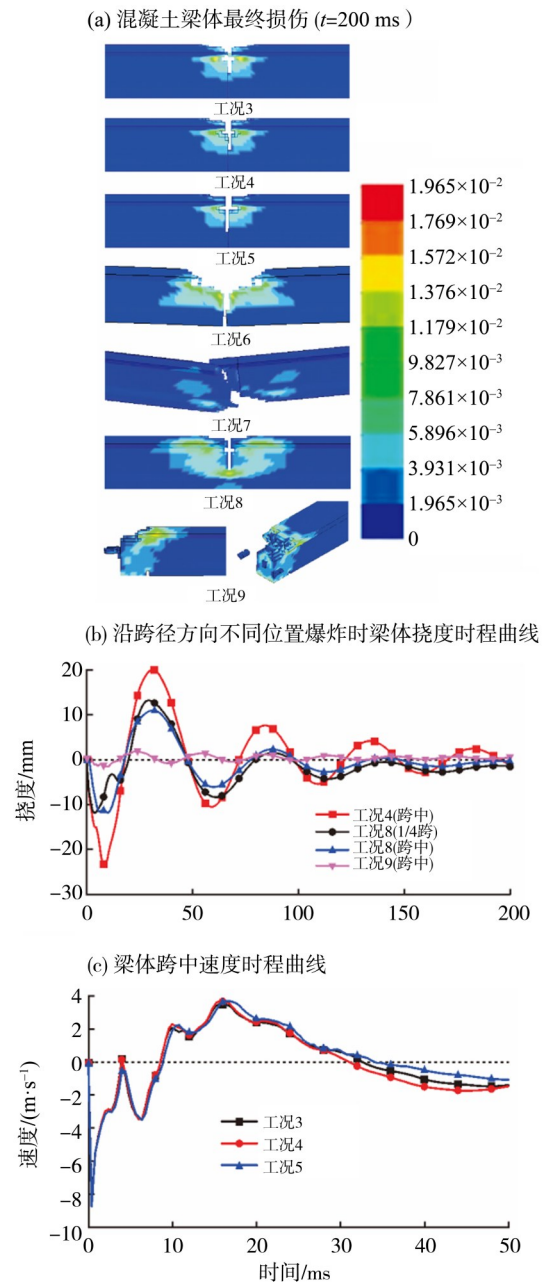


图6 爆炸荷载作用下预应力混凝土梁体抗爆分析^[24]

Fig. 6 Anti-blast analysis of prestressed concrete girder under blast loads^[24]

江河、峡谷等障碍而设置,是各地重要交通通道上的控制性结构物,其安全性尤为重要。

王赞等^[27]和蒋志刚等^[28]考虑可能遭受的导弹爆炸威胁,以大跨悬索桥-润扬大桥为研究对象,研究了大跨度锚式悬索桥的竖向弯曲振动响应。研究表明:悬索桥的竖向弯曲振动响应过程可划分为两阶段:稳态和非稳态,各构件的最大内力值均出现在非稳态阶段;悬索桥变形由局部逐步发展到整体;不同的爆心水平位置,对吊杆和

加劲梁最大内力产生很大影响,但对主索最大内力的影响较小;爆心位于跨端上空时,为加劲梁的最不利荷载位置,而吊杆的最不利荷载作用位置为跨中上空。

邓荣兵等^[29]对爆炸冲击作用下某斜拉桥的动力响应进行数值模拟分析研究,分析了桥墩、塔柱、加劲梁等主要构件的局部破坏模式。张涛等^[30]对某斜拉桥建立了全桥单主梁分析模型、混凝土箱梁和钢箱梁局部分析模型,对不同爆炸当量的爆炸冲击波对主梁的损伤进行分析,并对斜拉索动力响应进行分析。胡志坚等^[31]研究了爆炸冲击作用下大跨度双主梁混凝土斜拉桥的损伤模式和动力响应。结果表明:在爆炸荷载作用下拉索直接发生破坏的风险较小,仅在偏载作用时靠近爆点的拉索存在断索风险;混凝土主梁的局部破坏模式取决于爆炸当量和爆心位置;爆心位置不变时,随着逐步增大炸药当量,其破坏模式由弯曲破坏转变为直剪破坏;箱梁薄顶板被击穿破坏后,箱室内能量耗散较困难,爆炸冲击波在箱室内传播存在约束效应而产生更严重破坏。

2.3 桥墩在桥下爆炸时的动力响应

Fujikura 等^[2]研究了缩尺比例为 1/4 的多柱式钢管砼圆柱排架墩的抗爆性能。同时,按照现行标准、规范设计开展了多柱式排架墩的抗爆性能实验,包括外加钢板的无延性 RC 墩柱和有延性的 RC 墩柱 2 种类型。研究表明:在爆炸荷载作用下,两种 RC 墩柱均未表现出延性,同时基底均出现剪切破坏现象。孙珊珊等^[32]将实验和多物质耦合理论相结合,开展了钢管混凝土墩柱的破坏形态与动力响应研究。Kyei 等^[33]研究了爆炸作用下横向钢筋间距对桥梁墩柱的抗爆性能影响。

Williams 等^[34]开展了 RC 桥墩缩尺模型的抗爆试验研究,并采用数值方法进一步研究了试验中出现的墩柱侧面砼保护层剥落现象,再现试验中观察到的构件行为,揭示了细长 RC 柱受爆后砼保护层剥落的损伤机理。

Echevarria 等^[35]对 FRP 约束混凝土桥墩和普通钢筋混凝土桥墩进行了爆炸试验研究,以及受损墩柱的剩余承载力测试分析。研究表明:损伤后的 CFST 墩柱较普通钢筋砼墩柱强度更高、延性更好。

Liu 等^[36]利用简化的爆炸荷载加载方法开展多柱式排架墩的模拟分析研究。研究表明:通过简化爆炸荷载作用可以重现典型桥梁的损伤破坏机理,但此方法可能低估了爆炸荷载的作用效应;同

时加强墩柱箍筋配筋可提高桥梁结构的抗爆能力。

吴亮^[37]等以独柱式桥墩为研究对象,对近场爆炸下墩柱横截面形式(圆柱墩和方形墩)、配筋方式、爆心高度等相关参数对抗爆性能的影响及混凝土桥墩的破坏模式进行研究。结果表明:各相同条件下,圆柱墩的抗爆能力较方形墩更优;通过增设墩柱纵向主筋能改变墩柱受爆后的破坏模式,纵向主筋为墩柱底部提供抗剪能力,而墩柱箍筋提供的抗爆能力有限;地基对墩柱底发挥明显约束作用,墩柱混凝土剥落面积随爆心位置提高而逐步扩大。

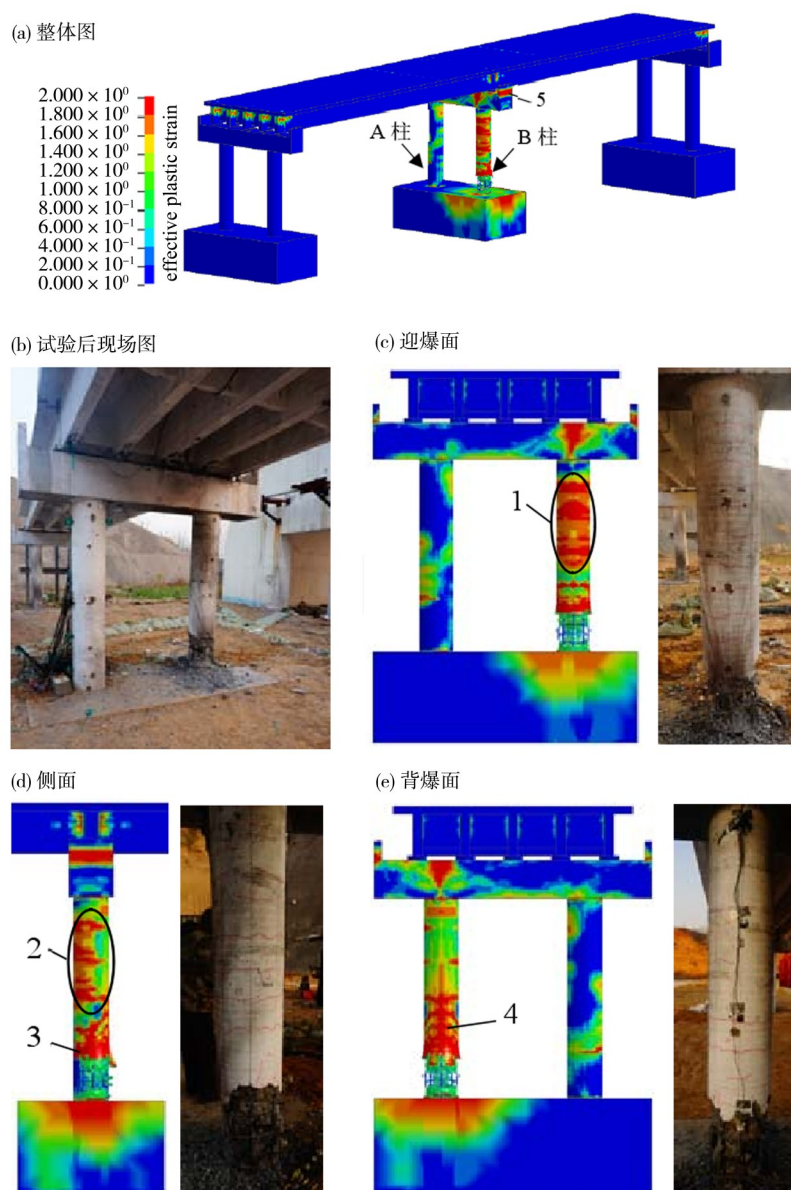
考虑初始预应力水平、节段长细比及桥墩体系等因素,杨旭等^[38]开展了爆炸冲击作用下预制节段拼装桥墩的动态响应与损伤研究。研究表明:随着墩身节段长细比的减小,节段拼装墩身由剪切破坏形态转变为节段间发生相对位移,并使得墩柱的整体侧向位移减小;而增加墩身初始预应力水平能有效提高其抗爆能力。

3 桥梁结构受爆时的倒塌破坏

亓兴军和刘青^[3]利用数值计算方法对爆炸冲击作用下弯桥桥墩受爆后的倒塌破坏模式进行研究。结果表明:弯桥会出现桥墩破坏、支座位置梁底破坏、梁体下挠、主梁梁端坠梁、主梁悬臂根部折断破坏等破坏模式;随着弯桥中间单柱墩被起爆破坏,桥梁因自重作用出现倒塌;支座破坏可能会使主梁发生落梁。

院素静^[7]采用理论分析和试验相结合的方法,研究了预应力混凝土连续梁桥的破坏模式和整体倒塌机理,如图 7 所示。研究表明:在接触爆炸下桥墩底部主要呈现局部冲剪破坏模式,墩柱的毁伤程度与轴力大小有关;而在接触爆炸下双柱墩墩底因被炸穿而失去大部分承载能力后,即使没有外力作用,试验桥也会因自重作用发生破坏倒塌。模型桥分阶段的破坏倒塌重现试验中,中墩墩顶处现浇段两侧的主梁混凝土产生拉裂现象。针对负弯矩钢束,中墩墩顶位置钢束拉力呈明显减小趋势,其它位置钢束拉力未出现明显变化;而正弯矩预应力钢束,近跨中位置钢束拉力呈增大趋势,近锚固端的钢束拉力呈下降趋势。

夏晓光等^[39]采用数值模拟方法对爆炸冲击作用下高架桥的动力响应以及倒塌过程进行研究。研究表明:当小型(车载爆炸物 TNT 当量 227 kg)及中型(车载爆炸物 TNT 当量 454 kg)轿车行驶在桥墩处发生爆炸,桥墩仅发生轻微损伤破坏,桥梁整

图7 墩柱破坏现象数值模拟与试验结果^[7]Fig. 7 Simulation analysis and test results of pier damage^[7]

体处于稳定状态; 当面包车(车载爆炸物 TNT 当量 1 814 kg)行驶在桥墩处发生爆炸, 桥墩发生严重损毁并丧失承载力, 引起桥梁结构倒塌破坏; 当小型及中型轿车在桥面上发生爆炸时, 爆炸冲击作用下主梁出现局部损伤破坏; 当面包车在桥面发生爆炸时, 主梁会由局部破坏而形成整跨断裂破坏, 但桥梁未出现倒塌现象。

陈华燕等^[40]对连续刚构桥结构在爆炸荷载下的动态响应以及损毁过程进行数值分析, 并对桥梁结构受爆后的整体坍塌过程进行模拟。研究表明: 连续刚构桥在爆炸荷载下呈局部破坏形态, 桥梁关键构件出现局部破坏后, 桥梁结构因自重作用而发生整体坍塌破坏。

4 展望

由于爆炸事件的突发性和爆炸荷载的不确定性, 仍然有许多问题有待进一步研究。未来, 有关桥梁抗爆的研究方向为:

1) 荷载压力场研究。当前桥梁结构抗爆研究常以特定桥梁为背景, 对桥梁结构特性与超压分布分析还很不够。特别是汽车装载物所引起的近场爆炸, 数值模拟很少考虑车体钢板对冲击波超压峰值的消峰与延时作用, 与实测结果存在明显差异^[13], 研究结果推广性不强。因此, 还需开展近场爆炸时桥梁的非线性动力仿真, 研究爆炸荷载在桥梁域内的传播规律。根据不同爆心位置、

不同药量(炸药当量及比例距离)等条件研究近场爆炸冲击波压力场、以及车体钢板对超压的消峰与反射作用,确定近场爆炸时桥梁域内车载爆炸荷载的超压及冲量分布。

2) 预应力作用效应研究。现有桥梁抗爆研究成果主要针对 RC 构件,对预应力混凝土桥梁受近场爆炸作用的动力响应研究还明显不够。现有预应力筋的布置主要考虑承受桥梁竖向恒载、活载效应,未考虑桥下爆炸时的反向荷载作用。未来应通过爆炸荷载模拟,开展预应力筋的应力增量规律和局部粘结失效规律研究,明确预应力效应在不同爆心位置、不同炸药当量等条件下的变化规律,以及局部惯性效应对结构预应力效应的影响。

3) 建立近场爆炸时结构损伤与梁体抗力之间的内在联系。瞬态高载作用下材料的应变率效应和结构塑性铰的移行特点等决定了近场爆炸时梁

体的抗力机理与静载条件下明显不同。结合材料应变率本构模型和移行铰理论,开展梁体动力响应机理与抗力研究;建立桥梁的动抗力模型,揭示截面损失率和局部粘结失效等关键损伤参数与梁体剩余承载力之间的内在联系;从预应力效应、破损程度(截面损失率)、挠度等角度研究桥下爆炸时梁体的动力失效模式与剩余承载力,也是未来的方向之一。

4) 现有桥梁抗爆研究试验局限于缩尺模型试验,还需依托既有桥梁改建工程、开展实桥爆炸试验。同时,采用数值反演、模型试验、参数化分析相结合的方法对不同桥型结构的抗爆能力及其防护设计进行研究。最后,结合实桥爆炸试验研究成果,提出桥梁抗爆设计方案、应急抢修方案等,以期对不同桥型的抗爆设计指南或规范的编制提供指导。特别是,研究制定应对恐怖袭击、交通运输意外爆炸事故的应急预案。

参考文献:

- [1] WILLIAMSON E B, BAYRAK O, DAVIS C, et al. Performance of bridge columns subjected to blast loads: experimental program [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(6): 693-702.
- [2] FUJIKURA S, BRUNEAU M, DIEGO L. Experimental investigation of multi-hazard resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(6): 586-594.
- [3] 亓兴军,刘青. 爆炸作用下曲线梁桥的倒塌模式[J]. *爆破*, 2015, 32(4): 110-117.
QI X J, LIU Q. Collapse pattern of curved girder bridge under blast action [J]. *Blasting*, 2015, 32(4): 110-117.
- [4] 胡志坚,唐杏红,方建桥. 近场爆炸时混凝土桥梁压力场与响应分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(5): 141-147.
HU Z J, TANG X H, FANG J Q. Analysis of pressure field and response for concrete bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(5): 141-147.
- [5] WINGET D G, WILLIAMSON E B M K A. Analysis and design of critical bridges subject to blast loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1243-1255.
- [6] 娄凡. 预应力混凝土连续 T 梁的抗爆性能试验研究 [D]. 南京:东南大学,2018.
LOU F. Experimental study on blast resistance of prestressed concrete continuous T beam [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [7] 院素静. 爆炸荷载作用下混凝土梁桥倒塌破坏机理研究 [D]. 南京:东南大学,2019.
YUAN S J. Study on collapse failure mechanism of concrete girder bridge under explosion load [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [8] 姚术健,蒋志刚,卢芳云,等. 汽车炸弹钢箱梁内部爆炸局部破坏效应分析[J]. *振动与冲击*, 2015(7): 222-227.
YAO S J, JIANG Z G, LU F Y, et al. Analysis on local damage of steel box girder under internal blast loading of vehicle bomb [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015(7): 222-227.
- [9] 余学林. 爆炸荷载作用下飞燕式拱桥动力响应与敏感性分析 [D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
YU X L. Study on dynamic response and sensitivity of flying swallow type arch bridge under blast loading [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [10] 宗周红,唐彪,高超,等. 钢筋混凝土墩柱抗爆性能试验[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(9): 51-60.
ZONG Z H, TANG B, GAO C, et al. Experiment on blast-resistance performance of reinforced concrete piers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(9): 51-60.
- [11] YUAN S J, HAO H, ZONG Z H, et al. A study of RC bridge columns under contact explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 378-390.

- [12] WANG W, LIU R C, WU B. Analysis of a bridge collapsed by an accidental blast loads [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 36: 353-361.
- [13] HU Z J, FANG Q J, SUN L Z. Blast effect zones and damage mechanisms of concrete bridges under above-deck car-bomb attacks [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2018, 27(8): 1156-1172.
- [14] 王向阳,冯英骥. 爆炸冲击作用下连续梁桥动力响应和影响因素[J]. *爆破*, 2017, 34(3): 104-113.
WANG X Y, FENG Y J. Study of dynamic response and influence factors of continuous girder bridge under blast loading [J]. *Blasting*, 2017, 34(3): 104-113.
- [15] 李杨. 爆炸荷载作用下斜拉桥动力响应分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2019.
LI Y. Dynamic response of cable-stayed bridge under blast load [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [16] 张媛媛,郭东,令狐可,等. 动载作用下钢筋混凝土梁非线性有限元分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2003, 29(4): 19-20.
ZHANG Y Y, GUO D, LING H K, et al. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams under dynamic loading [J]. *Sichuan Building Science*, 2003, 29(4): 19-20.
- [17] 焦延平,郭东,张虹,等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁非线性有限元分析[J]. *振动与冲击*, 2003, 22(3): 65-67.
JIAO Y P, GUO D, ZHANG H, et al. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams under explosion loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2003, 22(3): 65-67.
- [18] 刘超. 预应力混凝土桥梁爆炸荷载作用效应研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
LIU C. Study of blast loads action effect for prestressed concrete bridges [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [19] 李猛深,李杰,李宏,等. 爆炸荷载下钢筋混凝土梁的变形和破坏[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 177-183.
LI M S, LI J, LI H, et al. Deformation and failure of reinforced concrete beams under blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 177-183.
- [20] FOGLAR M, HAJEK R, FLADR J, et al. Full-scale experimental testing of the blast resistance of HPRC and UHPRC bridge decks [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 145: 588-601.
- [21] FAN Y, CHEN L, FANG Q, et al. Blast resistance of externally prestressed RC beam: A theoretical approach [J]. *Engineering Structures*, 2019, 179: 211-224.
- [22] 李莹,李晓彬,吴卫国,等. 应力波效应对爆炸作用下RC桥损伤特性的影响[J]. *爆破*, 2013, 30(3): 15-19.
LI Y, LI X B, WU W G, et al. Damage characteristics of stress wave effect on RC bridge under blast loading. [J]. *Blasting*, 2013, 30(3): 15-19.
- [23] SHIRAVAND M R, PARVANEHRO P. Numerical study on damage mechanism of post-tensioned concrete box bridges under close-in deck explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 81: 103-116.
- [24] 胡志坚,张一峰,俞文生,等. 近场爆炸时预应力混凝土梁体抗爆分析[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(3): 71-80.
HU Z J, ZHANG Y F, YU W S, et al. Anti-blast resistance analysis of prestressed concrete bridges under close-by blast [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(3): 71-80.
- [25] 胡志坚,李杨,俞文生. 近场爆炸作用下钢箱梁抗爆性能研究[J]. *爆破*, 2019, 36(1): 117-125.
HU Z J, LI Y, YU W S. Anti-blast resistance analysis of steel box girder under close-by blast [J]. *Blasting*, 2019, 36(1): 117-125.
- [26] 蒋志刚,朱新明,严波,等. 钢箱梁爆炸冲击局部破坏的数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2013, 13: 159-164.
JIANG Z G, ZHU X M, YAN B, et al. Numerical simulation for local failure of a steel box girder under blast loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 13: 159-164.
- [27] 王赞,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 Y, JIANG Z G, YAN B. Vertical bending vibration of suspension bridge under air explosion loading [J]. *Highway*, 2011, 3(3): 1-4.
- [28] 蒋志刚,王赞,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 Z G, WANG Y, YAN B, 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.
- [29] 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): 1927-1934.
DENG R B, JIN X L, CHEN X D, et al. Numerical simulation for the damage effect of bridge subjected to blast wave [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(11): 1927-1934.
- [30] 张涛,马如进,陈艾荣. 爆炸荷载作用下斜拉桥的结

- 构特性[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(增刊1): 784-787.
- ZHANG T, MA R J, CHEN A R. Structural characteristics of cable-stayed bridge under blast loads [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(S1): 784-787.
- [31] 胡志坚, 张一峰, 刘芳. 大跨度混凝土斜拉桥抗爆分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(23): 209-215.
- HU Z J, ZHANG Y F, LIU F. Blast-resistance analysis for long span concrete cable-stayed bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(23): 209-215.
- [32] 孙珊珊, 赵均海, 贺拴海, 等. 爆炸荷载下钢管混凝土墩柱的动力响应研究[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 27-36.
- SUN S S, ZHAO J H, HE S H, et al. Dynamic response of concrete-filled steel tube piers under blast loadings [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 27-36.
- [33] CONRAD K, ABASS B. Effects of transverse reinforcement spacing on the response of reinforced concrete columns subjected to blast loading [J]. Engineering Structures, 2017, 142: 148-164.
- [34] WILLIAMS G D, WINGET E B. Response of reinforced concrete bridge columns subjected to blast loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(9): 903-913.
- [35] ECHEVARRIA A, ZAGHI A E, CHIARITO V, et al. Experimental comparison of the performance and residual capacity of CFFT and RC bridge columns subjected to blasts [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 21(1): 04015026.
- [36] LIU H, TORRES D M, AGRAWAL A K, et al. Simplified blast-load effects on the column and bent beam of highway bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(10): 06015001.
- [37] 吴亮, 胡志坚, 孙立志, 等. 近场爆炸时混凝土桥墩的动力响应分析[J]. 爆破, 2015, 32(3): 105-113.
- WU L, HU Z J, SUN L Z, et al. Study of concrete piers dynamic response under close blast loading [J]. Blasting, 2015, 32(3): 105-113.
- [38] 杨旭, 张于晔, 张宁. 爆炸冲击作用下预制节段拼装桥墩的动态响应与损伤分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(3): 144-151.
- YANG X, ZHANG Y Y, ZHANG L. Dynamic response and damage analysis of precast segmental piers under blast impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(3): 144-151.
- [39] 夏晓光, 朱劲松. 爆炸荷载作用下城市高架桥动态响应及其倒塌过程分析方法[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(5): 84-88.
- XIA X G, ZHU J S. An analysis method of dynamic response and collapse process for urban elevated bridges subjected to blast loads [J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(5): 84-88.
- [40] 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(工程科学版), 2011, 43(6): 15-19.
- CHEN H Y, ZENG X G, ZHU W J, et al. Numerical simulation of dynamic response and damage process for bridge under blast loading [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(6): 15-19.

(责任编辑 王海蓉)