

◇ “毁伤机理与效能评估”专题

【编者按】随着多种高新技术的发展及其在武器装备中的应用，新型武器装备及新的毁伤机理不断涌现，并应用于近年来的几场局部战争中，且取得了理想的打击效果。针对各类新兴高价值目标，毁伤机理与毁伤评估同步得到发展，其中涉及诸多关键科学技术问题，呈现典型的多学科交叉融合特色，贯穿武器设计、研制、试验与作战运用全过程。此次设置的“毁伤机理与效能评估”专题聚焦武器毁伤机理与效能评估领域的前沿热点，围绕弹-目作用机理、毁伤机制与毁伤判据、毁伤效应测试、效能评估及目标易损性、毁伤评估软件设计开发等核心问题开展研究，为进一步提升武器毁伤效能提供参考。

爆炸冲击作用下不同材料箱型梁桥损伤分析

崔雨晨，易华辉，黄金香，杨 琨，赵 鹏

(西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710000)

摘 要: 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 采用三阶段耦合方法模拟了爆炸作用下某实际钢筋混凝土小箱梁桥局部毁伤与整体毁伤过程, 得到了在 35 kg 当量炸药下箱型梁桥关键构件的破坏模式与损伤机理, 研究了爆炸作用下不同目标材料对箱型梁桥的损伤影响。基于靶板最大位移公式, 得到了爆炸冲击作用下不同箱型梁桥材料强度与损伤 Y 向位移比值之间的联系。结果显示: 当炸药当量为 35 kg 时, 箱形梁桥整体未出现倒塌, 顶板毁伤最为严重, 出现贯穿损伤, 混凝土剥落严重, 出现椭圆形炸坑; 腹板与顶板交界处出现裂缝, 模拟过程印证了冲击波爆炸时先在表面形成环状向外扩散, 随后水平扩散至翼缘板边缘再开始向下蔓延的理论; 随着材料强度不断提高, 箱型梁桥损伤面积不断减小, 箱梁稳定性也逐渐提高。

关键词: 爆炸力学; 冲击波超压; 箱型梁桥; 损伤机理; 材料强度; 数值模拟

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)01-024-10

Damage Analysis of Box Girder Bridge with Different Materials under Explosion Impact

CUI Yuchen, YI Huahui, HUANG Jinxiang,
YANG Kun, ZHAO Peng

(Architecture Engineering College, Xi'an Technological University, Xi'an 710000, Shaanxi)

ABSTRACT: With ANSYS/LS-DYNA finite element software, the local damage and overall damage process of an actual reinforced concrete small box girder under explosion was simulated by the three-stage coupling method. Thereby, the failure mode and damage mechanism of the key components of the box girder bridge under 35 kg equivalent explosive were obtained. Then,

收稿日期: 2023-11-11

第一作者: 崔雨晨 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事毁伤评估研究。E-mail: 731218791@qq.com

通信作者: 易华辉 (1977—), 男, 教授, 主要从事毁伤评估研究。E-mail: yihuahui1977@126.com

引用格式: 崔雨晨, 易华辉, 黄金香, 等. 爆炸冲击作用下不同材料箱型梁桥损伤分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (1): 24-33.

the influence of the material of the box girder bridge on the explosion damage effects was studied. Results showed that when the explosive equivalent is 35 kg, the box girder bridge does not collapse as a whole, but the roof is extremely damaged with penetration damage, severe concrete spalling oval crater. Simultaneously, cracks appear at the junction of the web and the roof. The simulation process verified that the explosion shock is firstly formed on the surface and diffuses outward in ring-shape, and then horizontally diffuses to the edge of the flange plate and begins to spread downward. With the increase of the material strength, the damage area of the box girder bridge decreases, and the stability of the box girder gradually increases.

KEYWORDS: explosion mechanics; shock wave overpressure; box girder bridge; damage mechanism; material strength; numerical simulation

在现代战争中, 桥梁作为补给线的重要节点, 是敌对双方打击的重点。随着精确制导武器的发展, 可以对桥梁、隧道等重要交通设施实行精准打击来阻断交通联络。如在科索沃战争中, 北约一开始就针对桥梁进行重点攻击, 共有 66 座桥梁被炸毁, 使南联盟的交通运输受到严重影响^[1]。箱型梁桥结构整体性强且工程中应用广泛, 遭遇武器炸药打击和意外爆炸荷载的风险较大, 属于典型桥梁目标。因此, 开展爆炸荷载下箱型梁桥的损伤分析、建立箱型梁桥爆炸损伤分析理论、分析其损伤机理及规律, 不仅可为后续箱型梁桥的等效靶设计提供数据支撑, 对于应对战时精准打击、恐怖袭击以及意外爆炸等也具有重要意义。

近年来, 国内外学者针对桥梁爆炸损伤开展了广泛研究。娄凡^[2]、院素静^[3]等开展了爆炸荷载作用下两跨预应力钢筋混凝土 T 形连续梁桥的 1/5 缩尺试验, 获得了预应力钢筋混凝土 T 形连续梁桥的动力响应与破坏模式, 试验结果具有较好的参考及应用价值。Al-Smadi^[4]研究了近场爆炸荷载作用下钢筋混凝土桥跨结构的动态响应, 采用试验设计法对模型进行了校准与修正, 并对各影响因素进行了分析。王静好等^[5]考虑地震、爆炸联合作用的方法, 建立了简支梁桥在地震、爆炸联合作用下的有限元模型, 分析了不同桥梁结构构件的损伤和动力响应, 总结了地震、爆炸联合作用下结构的损伤和失效类型。刘路等^[6]基于 TNT 当量和爆心距离研究了节段预制拼装普通钢筋混凝土 (Reinforced Concrete, RC) 桥梁桥墩的爆炸损伤程度以及损伤系数的概率分布, 并对桥墩进行了易损性评估。这些研究主要以桥梁的动力响应为研究主体, 对桥梁目标抗爆具有重要参考意义。但现有的桥梁爆炸损伤研究很少对桥梁的损伤机理进行研究, 且尚未形成不同目标材

料对桥梁损伤规律的量化公式。

综上, 目前, 对爆炸荷载作用下桥梁结构的动力响应和损伤破坏研究成果较多, 但对于桥梁结构的爆炸损伤规律及损伤机理方面研究较少。因此, 本研究将箱型梁桥作为研究对象, 结合搭载试验对箱型梁桥损伤机理进行分析, 根据在爆炸冲击波作用下目标中心最大位移的估算公式, 得到目标材料屈服强度与毁伤效应参数之间的联系, 可为后续预测桥梁毁伤程度及等效靶设计研究提供参考。

1 数值分析模型

1.1 模型介绍

研究对象为小箱型梁桥。在搭载试验中, 箱梁均使用简支约束, 箱梁结构由顶板、腹板、翼缘板、底板构成。其中, 跨径为 20 m, 横向宽为 8 m, 高为 7.1 m。箱梁混凝土等级采用 C50, 箍筋配筋率为 1.20%。下部结构采用圆柱型桥墩, 混凝土等级采用 C30, 箍筋配筋率为 1.50%。试验炸药采用 35 kg 乳化硝胺炸药, 位于桥面正中心位置, 采用立方体装药方式, 起爆点为立方体中心位置。为了简化叙述, C50 混凝土、C30 混凝土分别使用简称 C50、C30 代替, 以此类推。该桥梁结构如图 1 所示。

由于箱型梁桥结构体量较大, 配筋比较规整, 因此, 本文建模采用整体式建模。数值模拟仿真采用全尺寸模型, 结合桥梁目标模型的构造特性, 设置 2 个桥墩底面为固定约束, 空气采用无边界约束条件。钢筋、混凝土、空气、炸药均采用 Solid164 实体单元。采用流固耦合方法, 可以防止由于网格过度变形而导致计算结果不太可靠的缺陷。同时, 在有限元模型中, 任意拉格朗日-欧拉

(ALE) 和 Lagrange 网格的任意相交有利于模型的前处理。炸药起爆点设置为炸药中心, 为 (0.2175, 1.265, -3.325) m, 设定 0 时刻起爆, 计算终止时间为 7 ms。该桥梁的 Solidworks 实体模型如图 2 所示。

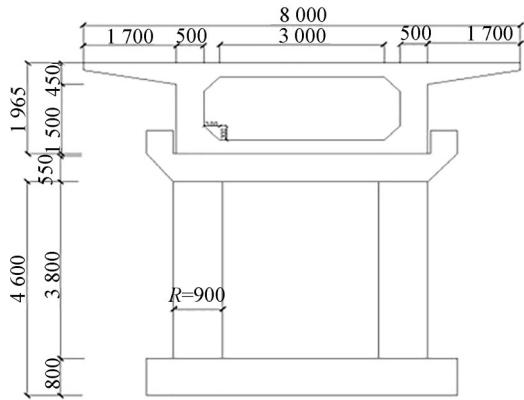


图 1 桥梁侧视图 (单位: mm)
Fig. 1 Bridge side view (unit: mm)

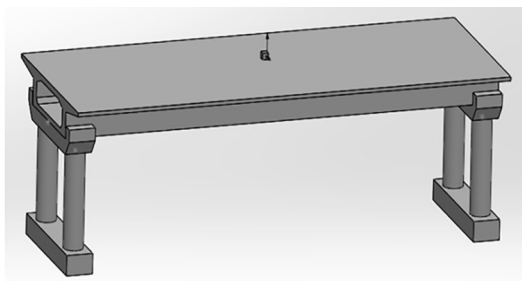


图 2 桥梁 Solidworks 实体模型
Fig. 2 Bridge Solidworks solid model

1.2 材料参数

本文模拟分析中涉及了炸药、空气、钢筋混凝土 3 类材料。

1) 混凝土本构模型

钢筋混凝土材料采用 *MAT_BRITTLE_DAMAGE (编号为 96) 脆性破坏材料^[7]。

2) 空气本构模型及状态方程

空气采用 *MAT_NULL 材料模型, 采用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 定义其状态方程^[7], 计算公式为

$$P_0 = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + C_4 E_0 + C_5 u E_0 + C_6 u^2 E_0$$

$$u = \frac{1}{v} - 1$$

式中: C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为状态方程参数; P_0 为压力; u 为体积应变; v 为相对体积; E_0 为材料内能。

对于空气, $C_0 = -1 \times 10^{-6}$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$, 密度取 1.293 kg/m^3 , $E_0 = 0.25 \text{ MPa}$ ^[7]。

3) 炸药本构模型及状态方程

采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 定义炸药材料模型。用 JW (John W. Lee) 方程作为炸药的状态方程^[8], 其状态方程表示为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 v) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \cdot \exp(-R_2 v) + \frac{\omega E}{V}$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数; P 为爆轰压力; v 为相对体积; E 为炸药单位体积内能。

对于 TNT 炸药, 密度取 $1.63 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 初始爆轰速度为 6.93 km/s , 爆压为 27 GPa , $A = 371 \text{ GPa}$, $B = 7.43 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, $\omega = 0.3$, $E = 7 \text{ GJ/m}^3$, $v = 1$ ^[8]。

1.3 数值仿真可靠性验证

炸药当量为 35 kg 时, 该试验损伤结果如图 3 所示。对比试验结果与数值模拟结果可以得出: 箱型梁桥未出现整体性垮塌; 顶板均出现较明显炸坑, 炸坑形状近似呈圆形; 距离炸药最近的腹板外部出现了较少的横向、纵向裂缝; 底板有大量混凝土碎屑, 是顶板贯穿后飞溅在底板面上产生的。数值模拟结果与实验结果较为吻合。

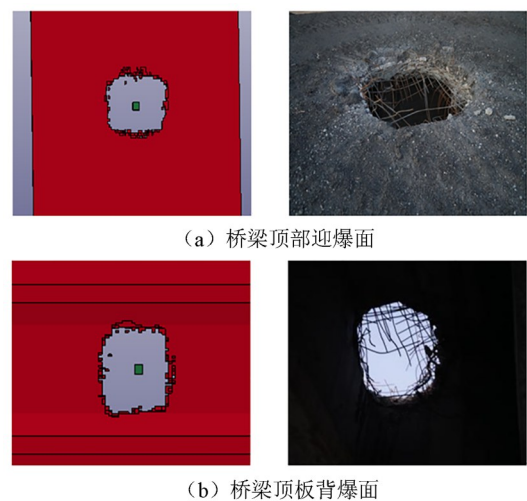


图 3 炸药当量为 35 kg 时桥梁毁伤模拟与试验结果对比
Fig. 3 Comparison of bridge damage simulation diagram and test diagram with 35 kg equivalent explosive

图 3 中, 爆心位于跨中上方, 在箱型梁桥的桥面板上产生明显破坏, 桥面板产生一个爆坑, 爆坑竖向 1.31 m , 横向 1.09 m 。大面积混凝土桥面

发生坍塌。

使用 Matlab 图像识别技术处理仿真结果, 通过像素和模型尺寸转化关系, 得到了箱梁桥损伤坑洞的横纵向直径。将仿真结果数据与在爆炸作用下的毁伤形式试验进行比较。根据运行结果可知: 数值模拟的洞口有效毁伤竖向直径为 1.44 m, 试验测得的洞口有效毁伤直径为 1.33 m, 两者的误差为 8.2%; 数值模拟的洞口有效毁伤横向直径东西大小为 1.21 m, 试验测得的洞口有效毁伤直径为 1.12 m, 误差为 8.0%, 在工程允许误差范围内。由于数值模拟结果与试验结果较为一致, 表明本文中采用的本构模型是合理的, 可以通过数值模拟对近爆下箱型梁桥损伤机理进行研究。

2 损伤机理

损伤机理是指目标遭受物理毁伤时的响应和状态变化过程, 与目标固有的抗毁伤特性密切相关, 与目标易损性分析、毁伤判据的制定息息相关。由于该箱形梁桥规模较大且炸药当量选择较小, 从试验与模拟结果来看, 仅箱梁结构受到损伤较大, 桥墩结构损伤微小。故此节仅对箱梁结构各部分损伤机理进行分析。

2.1 顶板、翼缘板

2.1.1 损伤描述

爆炸荷载作用下, 该实验中的混凝土箱型梁桥未出现整体性垮塌, 依旧具有部分承载能力。箱型梁桥顶板出现贯穿损伤, 混凝土剥落严重, 出现较明显炸坑。顶板迎爆面的试验结果与数值模拟结果对比如图 4 所示。可以得出: 顶板迎爆面的中央位置, 也就是炸药放置区域混凝土脱落形状近似呈现圆形, 脱落面积较为一致; 翼缘板损伤较轻, 仅少量混凝土破片飞溅受损。总体来说, 箱型梁桥顶板的损伤明显严重。

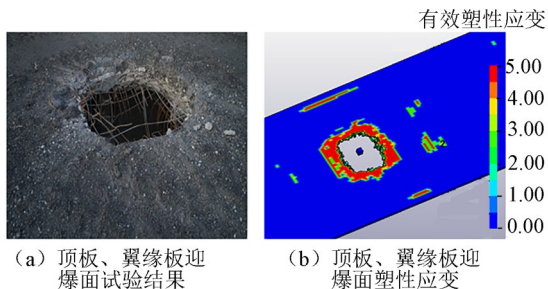


图 4 顶板毁伤模拟与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of roof damage simulation diagram and test diagram

2.1.2 损伤过程

取箱梁结构 1/2 进行分析, 图 5 为爆炸时刻箱梁结构的应力云图。其中, 压力为正的单元是爆炸后空气中激发的冲击波接触到的地方。

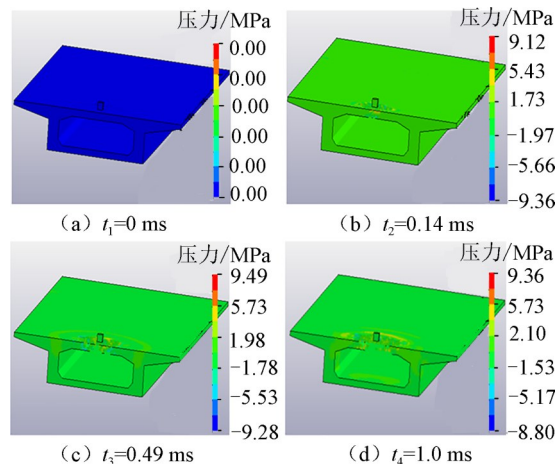


图 5 箱梁结构损伤过程应力云图

Fig. 5 Stress cloud diagram of box girder bridge damage process

可以看出: 当 $t=0$ ms 时, 压力为 0 MPa; 爆炸后 0.14 ms 时, 因为爆点位于箱梁跨中最大弯矩处, 所以, 空气中的爆炸冲击波率先接触顶板的中央位置。此时, 可以看出顶板处部分单元呈现橘色, 受到压力波的作用, 为受压状态。

由图 5 (c) 可以看出, 随着时间推移, 爆后 0.49 ms, 爆炸冲击波在顶板局部已经扩散, 且呈现环形应力云图, 扩散直径不断增大, 并有向腹板扩散的趋势。沿翼缘板方向的冲击波逐渐呈水平, 向箱梁结构边缘推进。同时, 顶板中央迎爆面位置混凝土单元的折算应力在冲击波压力作用下超过其动态压缩强度进入塑性变形阶段。当塑性变形达到单元失效判据时, 单元将彻底失效并从有限元模型中删除。随着压力波在顶部不断扩展深入, 更多单元失效并删除, 从而箱梁结构顶板迎爆面呈现贯穿效果, 形成炸坑。

由图 5 (d) 可以看出, 爆后 1.0 ms 时, 冲击波开始沿顶板腹板连接处向下蔓延, 这也印证了冲击波爆炸时先在表面形成环状向外扩散, 随后水平扩散至翼缘板边缘再开始向下蔓延的理论。

2.1.3 压力变化

由于翼缘板损伤微小, 此处不做呈现。仅选取箱型梁桥顶板上 2 个不同的关键点进行分析。其中: 点 O 位于发生爆炸后产生的坑道, 垂直于爆炸元下方, 顶板迎爆面处; 点 P 位于垂直于爆炸

元下方, 顶板背爆面处。关键点 O 、 P 在爆炸冲击波作用下的超压时程曲线如图 6 所示。

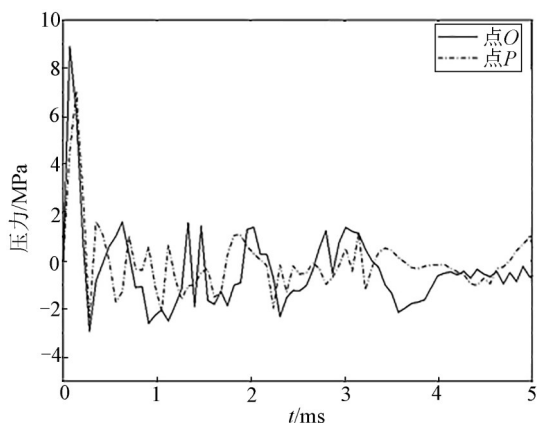


图 6 箱型梁桥顶板上关键点的超压时程曲线

Fig. 6 Overpressure time history curve of key points on the roof of box girder bridge

可以看出: 点 O 在爆炸冲击波作用下 0.069 ms 时达到超压峰值, 为 8.91 MPa; 在爆后 0.14 ms 时, 点 P 达到超压峰值, 为 7.3 MPa。由此可知, 由于顶板存在厚度, 冲击波到达的时间也会有所延迟, 并且冲击波压力会随着时间的增加, 此时顶板出现贯穿损伤。之后, 随着时间的增加, 冲击波继续扩散, 顶板的压力开始减小, 分别在 0.21 ms、0.25 ms 后, 点 O 、点 P 的超压恢复至大气压。随着时间继续推移, 空气中的压力变为负压, 在 0.28 ms、0.35 ms 时, 点 O 、 P 分别到达负压峰值, 为 -2.92 MPa、-2.3 MPa。随后在正负超压之间小范围内波动, 并逐渐接近于零。通过模拟结合试验结果可知, 冲击波超压是造成顶板破坏的主要因素。

2.2 腹板

2.2.1 损伤描述

箱型梁桥腹板的试验与模拟结果对比如图 7 所示。可以看出: 试验结果中, 腹板与顶部连接处的混凝土大量震裂, 腹板内部表面产生少量混凝土剥落现象, 外部产生几道横纵向裂缝; 由于外部未发生塑性形变, 模拟结果中未呈现出裂缝。数值模拟结果与试验结果较为吻合。

2.2.2 损伤过程

图 8 为爆炸时刻箱梁结构的应力云图, 取 1/2 箱梁截面研究箱梁腹板损伤破坏过程。其中: 压力为正的单元是爆炸后空气中激发的冲击波接触到的地方。

可以看出, 爆后 1.68 ms 时, 爆炸冲击波已经

传播至腹板位置。通过试验结果可以得出此时箱梁结构腹板上边缘与顶板连接处已出现损坏。由图 8 (a) 可知, 爆炸冲击波刚好到达腹板下边缘处, 应力传递沿着顶板水平方向向四周扩散, 传递到腹板的爆炸冲击波明显慢于沿顶板水平方向传递的冲击波。由图 8 (b) 可以看出, 爆炸后 2.37 ms 时, 箱梁腹板中红色范围扩大, 下部出现轻微损伤, 也就是压力波在腹板下部继续传播, 腹板下部受压也在持续扩大, 产生轻微压缩破坏。由图 8 (c) 可以看出, 爆炸后 2.73 ms 时, 腹板内部表面红色范围减弱, 多为橙色范围, 冲击波继续沿着腹板与底板连接处向下扩散, 并伴有向底板蔓延的趋势。由图 8 (d) 可以看出, 爆后 3.0 ms 时, 腹板下边缘压力颜色对比之前时刻越来越浅, 此时腹板内部冲击波已经逐渐消退, 并向底板蔓延。

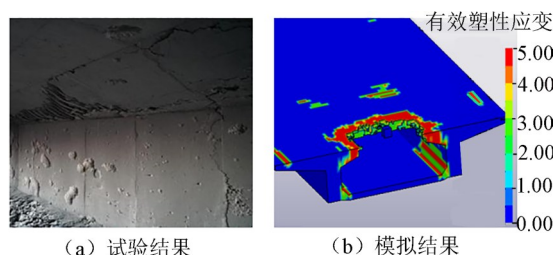


图 7 箱型梁桥腹板内部试验与模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of test and simulation results of inner of box girder bridge web

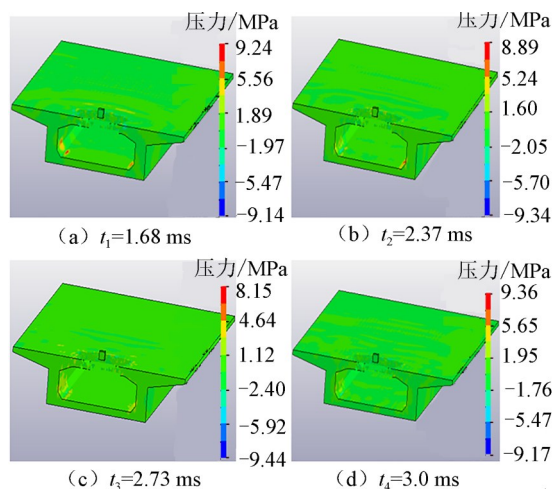


图 8 箱梁结构损伤过程应力云图

Fig. 8 Stress cloud diagram of box girder bridge damage process

在首轮爆炸冲击波作用下, 腹板未出现严重损伤, 腹板内部有明显塑性形变, 试验中表现为腹板上边缘与顶板连接处出现混凝土震裂, 露出

一些钢筋,腹板内部表面有少量混凝土剥落,其原因是由于顶板贯穿损伤、破片弹射以及冲击波共同作用形成。与顶板损伤相比,腹板损伤程度较轻,仅有少量混凝土剥落与震裂,并未形成严重破坏损伤。在箱梁横截面,腹板对箱室顶板与底板提供支撑,在腹板处形成负弯矩区,混凝土受拉,局部应力集中,腹板外部产生沿桥纵向的裂缝,但并未构成致命性损伤。

2.2.3 超压变化

选择腹板关键点进行超压时程曲线的提取,点 Q 位于发生爆炸后腹板内表面中心位置,点 U 位于发生爆炸后腹板外表面中心位置。关键点 Q 和 U 的超压时程曲线如图9所示。

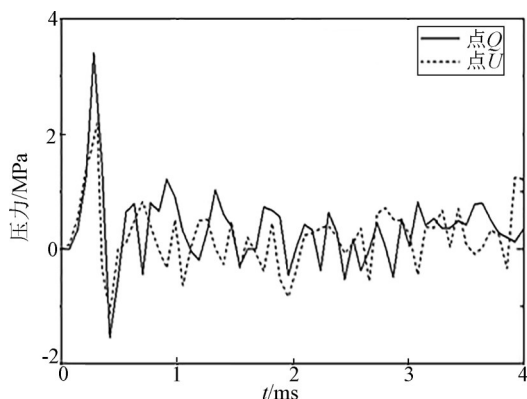


图9 箱型梁桥腹板上关键点的超压时程曲线

Fig. 9 Overpressure time history curve of key points on the web of box girder bridge

可以看出:在爆炸冲击波作用下0.276 ms时,点 Q 达到超压峰值,为3.4 MPa;在爆后0.308 ms时,点 U 达到超压峰值,为2.19 MPa。由此可知:冲击波率先到达腹板内表面,再随之扩散至外表面,此时内表面出现塑性损伤,外表面出现些许横向裂缝;之后,冲击波继续扩散,随着时间增加,腹板压力开始减小,在0.374 ms、0.39 ms后,点 Q 、点 U 的超压分别恢复至大气压;随着时间继续推移,空气中压力变为负压,在0.415 ms、0.423 ms时,点 Q 、 U 都到达了负压峰值,分别为-1.53 MPa、-1.12 MPa;随后,在正负超压之间小范围内波动,并逐渐接近于零。通过模拟结合试验结果可知,冲击波正压是造成腹板破坏的主要因素。

2.3 底板

2.3.1 损伤描述

箱型梁桥底板的试验与模拟结果对比如图10所示。

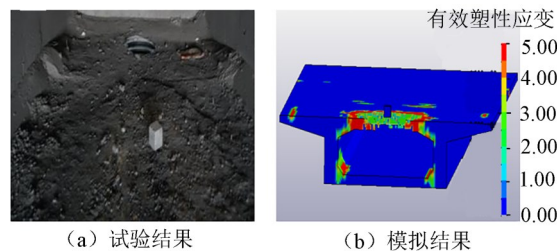


图10 箱型梁桥底板内部试验与模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of test and simulation results of inner of box girder bridge bottom plate

可以看出:由于炸药位置距离底板距离较远且炸药当量选取较小,冲击波到达底板时已经相对减小,并未对底板造成明显损伤;底板的损伤大部分是因为爆炸冲击波损伤顶板及腹板时造成混凝土破片飞溅到底板表面使其略微受损,但相比较而言,底板的损伤微乎其微。因此,关于此试验底板的机理仅通过超压时程曲线分析。

2.3.2 超压变化

选择底板关键点进行超压时程曲线的提取,点 T 位于发生爆炸后底板内表面中心位置,点 S 位于发生爆炸后底板外表面中心位置。关键点 T 和 S 在爆炸冲击波作用下的超压时程曲线如图11所示。

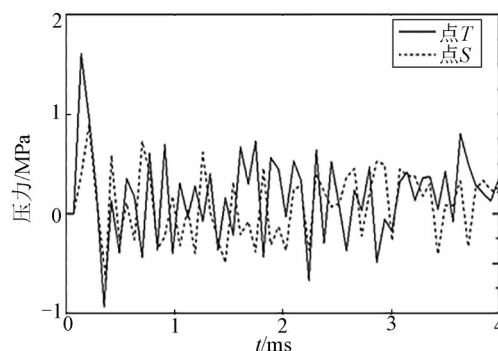


图11 箱型梁桥底上关键点的超压时程曲线

Fig. 11 Overpressure time history curve of key points on the bottom plate of box girder bridge

可以看出:在爆炸冲击波作用下0.136 ms时,点 T 达到超压峰值,为1.6 MPa;在爆后0.208 ms时,点 S 达到超压峰值,为0.896 MPa。可知,冲击波率先到达底板内表面,再随之扩散至外表面,此时内表面出现轻微损伤,外表面无明显损伤;之后,冲击波继续扩散,随着时间增加,底板的压力开始减小,0.286 ms、0.294 ms后,点 T 、点 S 超压分别恢复至大气压;随着时间继续推移,空气中的压力变为负压,分别在0.348 ms、0.362 ms时,点 T 、 S 都到达了负压峰值,为-0.93 MPa、

-0.66 MPa; 随后, 在正负超压之间小范围内波动, 并逐渐接近于零。通过模拟结合试验结果可知, 由于药量较小, 底板距离药量距离近, 底板损伤较小, 对比试验现场仅存在破片损伤, 未出现贯穿性塑性损伤。

3 箱型梁桥材料损伤规律研究

3.1 不同材料下的损伤效果

在其他参数(炸药当量、比例距离、炸点位置)都相同的前提下, 对爆炸荷载作用下梁桥材料强度变化对箱型梁桥损伤效应的影响开展数值仿真模拟。

采用 1.1 节的有限元模型, 炸药位于箱型梁桥顶板正中心位置, 接触爆炸, 炸药当量选择 35 kg, 选取 C25、C30、C35、C40、C50、C60 不同强度等级的混凝土箱型梁桥, 进行爆炸荷载作用下动力响应计算, 具体材料参数如表 1 所示。

表 1 混凝土材料参数

Tab. 1 Material parameters of concrete

混凝土材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压应力/ MPa	抗拉应力/ MPa
C60	2 550	36.0	0.20	60	2.85
C50	2 500	34.5	0.20	50	2.40
C40	2 440	32.5	0.20	40	2.39
C35	2 420	31.5	0.20	35	2.20
C30	2 410	30.0	0.30	30	2.01
C25	2 400	28.0	0.20	25	1.78

不同材料下梁桥面板的超压应力云图如图 12 所示。

由图 12 可知, 在爆炸冲击下, 箱梁桥顶板中心位置出现炸坑, 不同材料下炸坑形状较为一致, 均近似圆形, 炸坑直径随混凝土强度增加而减小, 桥梁整体均未发生垮塌现象。

3.2 不同材料下的损伤规律分析

提取顶板迎爆面处位于发生爆炸后产生的坑道内且垂直于爆炸元下方的关键点的超压时程曲线, 如图 13 所示。

在采用不同材料定义箱梁桥时, 模拟结果显示其超压峰值均较为相似。这是由于冲击波到达桥面这一过程和目标材料无关, 到达目标后产生的超压峰值约为 8.34~6.92 MPa。

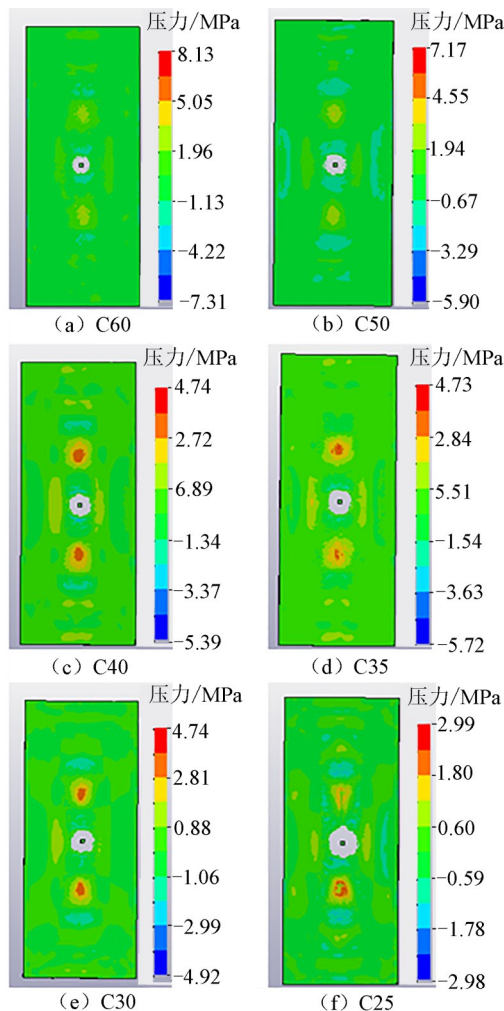


图 12 箱梁桥面板超压应力云图

Fig. 12 Overpressure stress cloud diagram of box girder bridge plate

另外可以观察到, 在冲击波达到超压峰值之后, 混凝土强度越大, 其超压时程曲线震荡越强烈, 反之则越平缓。这是由于目标材料强度越大, 其抵抗外界压力的能力就越强, 在材料内部产生的反射冲击波就越强烈。

通过 Matlab 图像识别技术处理仿真结果, 得到了不同材料下箱梁桥损伤炸坑的横纵向直径, 由此计算损伤面积, 结果如图 14 所示。

由图 14 可知, 毁伤炸坑面积随着混凝土强度增加而减小。尤其低强度混凝土更加明显, 对于高强度混凝土(C50、C60)而言, 炸坑的大小变化并不明显。

混凝土强度分别为 C25、C30、C35、C40、C50、C60 材料时, 提取桥面正中心位置的箱型梁桥在爆炸荷载冲击下的纵向位移时程曲线, 结果如图 15 所示。

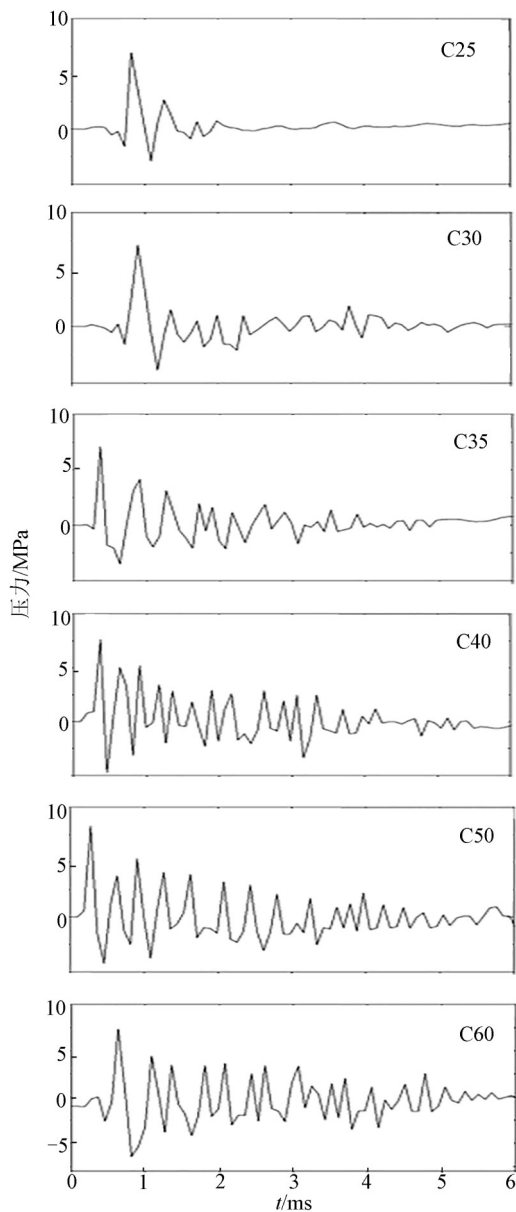


图 13 不同材料时的超压时程曲线

Fig. 13 Overpressure time history curves of different materials

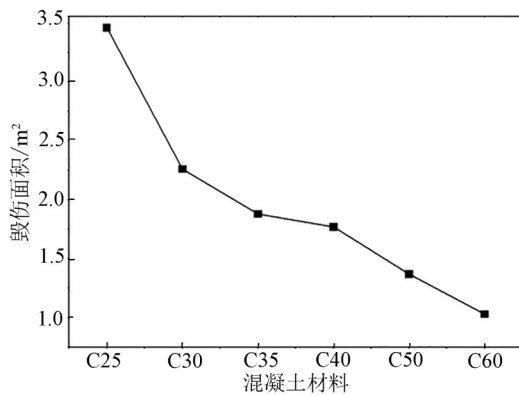


图 14 不同材料毁伤面积变化

Fig. 14 Damage area changes of different materials

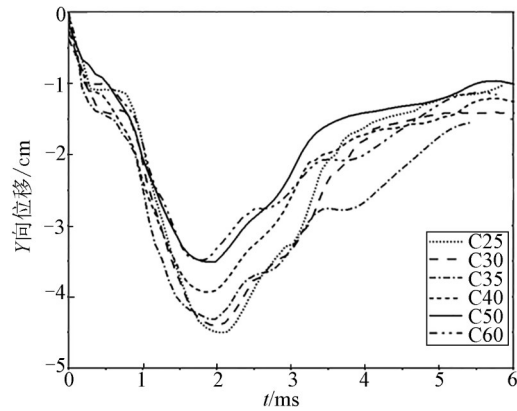


图 15 不同材料时桥面毁伤 Y 向位移曲线

Fig. 15 Y-direction displacement diagram of bridge surface damage with different materials

由图 15 可以看出, 位移时程曲线呈现“V”字型, 不同混凝土强度在相同冲击作用下的曲线趋势大致一致。随着混凝土强度等级的提升, 峰值位移逐渐减小, 尤其是低等级混凝土中效果明显, 对于高强度混凝土, 如 C50、C60 等级, 随着强度增加, 峰值位移变化效果不再明显。此外, 相对于高强度混凝土, 低强度混凝土到达位移峰值的时间相对较长。这可能是高等级混凝土强度较大, 弹性模量也较大, 其刚度大, 导致荷载在桥面传播速度较大, 所以, 位移时程存在时差。

在仅改变目标材料强度的条件下, 根据文献 [9] 得到了在爆炸冲击波作用下, 目标中心的最大位移估算公式为

$$y = 0.318I / (dL\sqrt{\rho\sigma})$$

式中: y 为毁伤挠度; I 为作用在靶标上的总冲量; d 为靶标的厚度; L 为目标边长; ρ 为材料密度; σ 为抗压强度。

在材料密度均相近的情况下, 由上式可以得到爆炸冲击波作用下目标中心的最大位移, 即 Y 向位移值与材料抗压强度之间的关系为

$$\frac{y_i}{y_{C60}} = \frac{\sqrt{\sigma_{C60}}}{\sqrt{\sigma_i}}, i = C25, C30, C35, C40, C50$$

将强度 C60 混凝土设为原始材料, 由上式可得出其余 5 种混凝土材料强度对应的位移值与混凝土强度 C60 所对应的位移值之间的倍数关系分别为 $\frac{y_{C50}}{y_{C60}} = 1.063$, $\frac{y_{C40}}{y_{C60}} = 1.145$, $\frac{y_{C35}}{y_{C60}} = 1.199$, $\frac{y_{C30}}{y_{C60}} = 1.260$, $\frac{y_{C25}}{y_{C60}} = 1.339$ 。

根据 Y 向位移计算结果可以得出其数值模拟

结果的具体数值,与理论值进行对比可验证公式是否可用于桥梁目标,结果如表 2 所示。

表 2 不同材料时毁伤的 Y 向位移值对比

Tab. 2 Comparison of Y-direction displacement values of different materials damage

混凝土材料	理论值/cm	模拟值/cm	与 C60 的毁伤挠度比值	误差/%
C60	\	3.471	\	\
C50	3.679	3.507	1.010	4.98
C40	3.974	3.914	1.128	1.48
C35	4.162	4.315	1.243	-3.67
C30	4.373	4.406	1.269	-0.71
C25	4.648	4.507	1.298	3.06

通过表 2 可知:不同材料时 Y 向位移的最大误差值为 4.98%,最小误差为-0.71%,误差率在允许范围内;该预测靶标最大位移公式可用于桥梁目标。

4 结论

对爆炸冲击作用下不同材料箱型梁桥损伤进行了试验和有限元模拟研究,主要得到以下结论。

(1) 炸药在桥面中心爆炸时,冲击波呈圆形扩散,扩散至翼缘板边缘后竖直向下蔓延至底板;冲击波正压峰值及正压作用时间是造成结构破坏的主要因素。

(2) 混凝土材料强度越大,其抵抗外界压力的能力就越强,在材料内部产生的反射冲击波就越强烈,超压时程曲线呈现震荡越剧烈。

(3) 在相同工况下,以 C60 为原始材料,C60 与 C50、C40、C35、C30、C25 之间损伤 Y 向位移值的倍数分别为 1.063、1.145、1.199、1.260、1.339。Y 向位移的模拟结果与已有估算公式结果的误差最大为 4.98%,最小为-0.71%,均符合工程允许误差要求。

参考文献:

- [1] 闫秋实,李述涛,陈叶青,等.爆炸荷载作用下桥梁结构易损性分析研究现状与展望[J].防护工程,2022,44(4):71-78.
YAN Q S, LI S T, CHEN Y Q, et al. Analysis and research on structural vulnerability of bridge-

es under the effect of blast loads[J]. Protective Engineering,2022,44(4):71-78.

- [2] 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. Experiment on antiknock performance of prestressed concrete continous T girder bridges[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

- [3] 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,2019:70-75.

YUAN S J. Study on collapse failure mechanism of concrete girder bridge under explosion load [D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 70-75.

- [4] Al-SMADI Y M. Dynamic response of RC bridge span subjected to blast wave shock[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 44: 100-107.

- [5] 王静好,袁万城.地震爆炸联合作用下桥梁响应与损伤的数值模拟[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(5):643-649.

WANG J Y, YUAN W C. Numerical simulation of the response and damage of girder bridges subjected to the combined action of earthquake and blast[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(5): 643-649.

- [6] 刘路,宗周红,周海飞,等.近场爆炸作用下节段预制拼装 RC 桥墩的易损性评估[J/OL].中国公路学报:1-18(2023-11-29)[2023-12-22].<https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20231129.1810.002>.

LIU L, ZONG Z H, ZHOU H F, et al. Vulnerability assessment on precast segmental RC bridge pier under near-field explosion[J/OL]. China Journal of Highway and Transport: 1-18.(2013-11-29)[2023-10-12].<https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20231129.1810.002>.

- [7] 侯满义,范惠林.爆炸波对靶板冲击损伤的动力有限元模拟[J].弹箭与制导学报,2009,29(5):142-144.

HOU M Y, FAN H L. Dynamic finite-element simulation on panel impact damage subjected to blast[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(5): 142-144.

- [8] WANG G Y, CAO A S, WANG X Y, et al. Merical simulation of the dynamic responses and damage of underground cavern under multiple explosion sources [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 1-3.

- [9] 黄松.舰船易损性分析中船用钢的靶标研究[D].太原:中北大学,2019.

HUANG S. Research on equivalent target of marine steel in vulnerability analysis of warship[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.

通信作者及其研究团队介绍

易华辉, 男, 教授, 博士。现为中国兵工学会毁伤评估专业委员会委员和中国兵工学会弹药专业委员会委员。研究方向主要包括目标易损性评估、毁伤效应与毁伤效能模拟仿真与评估等。所在课题组结合军地多个单位, 以构建目标易损性为基础建立弹药战斗部威力及毁伤效能模型为着力点, 开发系列化的毁伤效能评估软件, 初步形成了靶场虚拟构建与实战化毁伤效能测试、分析、评估能力。

向审稿专家致谢

2023 年, 在各级领导的关心和各位审稿专家的帮助下, 本刊得以顺利出版发行。为此, 编辑部特向一年中为本刊审阅稿件的各位专家(以笔画为序)致以诚挚的谢意!

王 飞	王玉玲	王正元	王金涛	王夏复	王 涛	王焕春	宁 超	司小胜	过惠平
毕义明	毕 松	朱杰堂	刘小方	刘卫东	刘志国	刘志浩	孙振生	李邦杰	李向阳
李 剑	李勇翔	李艳玲	李晓军	李海龙	李 敏	李新其	杨正伟	杨 萍	余志勇
汪民乐	张全虎	张 鑫	周召发	周志杰	赵久奋	赵军阳	赵晓枫	赵 鹏	侯传勋
侯根良	俞坤东	姚青旭	姚俊萍	秦伟伟	秦忠宝	秦 晋	贾 瑛	徐东辉	高成强
崔智高	康兴无	景慧丽	赖 杰	蔡 伟	蔡幸福	蔡艳平	管文良	廖守亿	黎素芬
霍勇刚									

特别感谢李敏教授对“模式识别军事应用专题”的帮助, 王涛教授对“毁伤机理与效能评估专题”、霍勇刚与蔡幸福副教授对“辐射防护专题”的支持。诚挚欢迎各位专家学者为期刊专题做进一步指导, 对期刊创新发展提出宝贵的意见建议。

《火箭军工程大学学报》编辑部

二〇二四年一月