

DOI: 10.11883/bzycj-2026-0056

典型爆炸作用下预应力 T 型梁桥的极限承载力*

田钦伍, 翟红波, 徐其鹏, 范瑞军, 陈 曦

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为明确典型爆炸作用下预应力 T 型梁桥的极限承载力, 解决爆炸后桥梁承载力评估难题, 采用“爆炸损伤-静力加载”两步法, 以 1:1 全尺寸预应力 T 型梁桥为靶标, 开展了大当量爆炸试验和爆炸损伤后多级静力加载试验; 根据试验结构破坏状态和挠度响应等数据, 构建并校验了预应力 T 型梁桥精细化数值仿真模型, 系统探究了桥面中心接触爆炸、桥面中心爆炸叠加梁间内爆、双侧梁间内爆 3 种典型爆炸工况下桥梁的极限承载力。结果表明: 接触爆炸桥梁主要发生桥面破孔及塑性变形; 梁间内爆除桥面发生层裂破碎外, T 梁腹板及横隔梁发生侧凸、混凝土崩塌破坏; 3 种典型爆炸破坏状态中, 桥面中心爆炸后叠加梁间内爆, 极限承载力衰减最严重; 合理选择荷载位置可有效规避爆炸损伤的不利影响, 大幅提升桥梁的极限承载能力。

关键词: 爆炸作用; 预应力 T 型梁桥; 极限承载力; 混凝土层裂; 结构破坏

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Ultimate load-bearing capacity of prestressed T-girder bridges under typical explosion loads

TIAN Qinwu, ZHAI Hongbo, XU Qipeng, FAN Ruijun, CHEN Xi

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: To clarify the ultimate load-bearing capacity characteristics of prestressed concrete T-girder bridges under typical blast loads and address the technical difficulties in the residual load-bearing capacity evaluation of blast-damaged bridge structures, a two-stage test method combining blast damage test and post-blast static loading test is adopted in this study. A full-scale (1:1) prestressed concrete T-girder bridge specimen consistent with practical engineering structural parameters is taken as the test object to carry out large-equivalent field blast tests. Multi-stage graded static loading tests are further implemented on the blast-damaged specimen to obtain structural damage evolution features and deflection response data under post-blast service conditions. Based on the measured damage morphologies, deformation data and mechanical response laws acquired from physical tests, a refined three-dimensional finite element (FE) numerical simulation model for prestressed concrete T-girder bridges is established. Key structural characteristics including concrete and reinforcement strain-rate effects, material nonlinearity, prestress loss and structural contact interaction are fully considered in model establishment. The accuracy and reliability of the numerical model are validated through comparative calibration with experimental results. The validated model is subsequently employed to quantitatively investigate the ultimate load-bearing performance of bridges under three typical blast working conditions, including deck central contact blast, combined blast of deck central explosion and inter-girder internal explosion, and bilateral inter-girder internal explosion. The research results demonstrate distinct structural damage and bearing degradation characteristics under different blast scenarios. Contact blast acting on the bridge deck mainly induces local slab perforation failure and concentrated plastic deformation of deck concrete. For internal explosion occurring between main girders, structural damage presents a more severe and extensive pattern. In addition to concrete spalling and fragmentation on

* 收稿日期: 2026-02-06; 修回日期: 2026-06-11

第一作者: 田钦伍(2002—), 男, 硕士研究生, 1643220070@qq.com

通信作者: 翟红波(1987—), 男, 博士, 研究员, zhaihongbo@qq.com

the bottom surface of the bridge deck, obvious outward bulging deformation, concrete crushing and local collapse failure occur on the webs and transverse diaphragms of T-girders. Among the three typical blast damage states, the combined blast condition with deck central explosion followed by secondary inter-girder explosion causes the most significant degradation of structural ultimate load-bearing capacity due to the superimposed synergistic damage effect. Reasonable optimization of live load layout effectively avoids severe damage areas of blast-affected bridges, eliminates the adverse influence of blast-induced structural defects, and achieves a remarkable improvement in the ultimate load-bearing capacity of damaged bridges. An integrated evaluation system covering the whole process from blast damage characterization to ultimate load-bearing capacity quantification is established in this research. The proposed evaluation method provides a systematic theoretical basis and feasible technical support for residual load-bearing capacity assessment, damage prediction and blast-resistant reinforcement design of prestressed concrete T-girder bridges suffering blast loads.

Keywords: explosion load; prestressed T-girder bridge; ultimate load-bearing capacity; concrete spalling; structural damage

预应力 T 型梁桥作为目前桥梁的主要构成形式之一, 在交通系统中得到了广泛的应用^[1-2]。在战争中为了阻断敌方交通, 影响其后勤保障与兵力投放能力, 桥梁往往被作为优先打击目标^[3]。俄乌战争中, 安东诺夫大桥、克里米亚大桥等桥梁设施屡遭爆炸袭击, 导致结构损伤严重, 降低其承载能力, 对军事后勤补给能力、各兵种协同与战术部署形成重大影响。

桥梁在爆炸作用下的毁伤模式与极限承载力是当前研究的重点方向。不同爆炸工况下的预应力 T 型梁桥破坏模式具有显著区别, 研究人员通过试验与数值仿真结合的研究方法发现: 非接触爆炸作用下, 预应力 T 型桥梁的破坏模式为爆心下方局部破坏, 其中桥面板的破坏区域较小, 横隔板以及腹板的底部破坏范围较大, 整体破坏呈现为圆锥形的破坏区域^[4]; 接触爆炸作用下, 主要破坏模式为桥面破孔及塑性变形, 且破坏集中在爆心附近^[5-6]; 内部爆炸作用下, 桥梁除桥面发生层裂破碎外, T 梁腹板及横隔板也发生外凸变形、混凝土崩塌破坏^[7]。

在桥梁承载力评估领域, 现有研究多采用荷载试验与有限元分析相结合的技术路径, 评估桥梁状态并完成荷载试验设计与测点优化, 实现对现有桥梁的承载能力综合评估^[8]; 针对预应力混凝土桥梁的剩余承载力研究, 已形成基于冗余指标和残余漂移比的定量分析方法, 可有效考量应力长期损失、截面开裂等损失因素的影响^[9-10]; 同时, 三维精细化有限元模型也被广泛的应用于不同有效预应力水平下, 对预应力混凝土连续刚构桥的极限承载力进行了空间分析计算和讨论^[11]; 破坏性试验则通过分级加载方案, 系统采集应力、挠度、裂缝发展等关键数据, 明确结构从弹性、弹塑性到塑性阶段的转化过程及破坏形态^[12]。结构协同受力性能对极限承载力有显著影响, 先简支后连续 T 梁桥的预制主梁与湿接缝混凝土受力不同步, 降低了整体的极限承载力^[13-14]。极限承载力评估方法正朝着便捷化、无损化发展, 通过建立振动频率与抗弯承载性能的关联模型, 可实现对 RC 空心板的无损评估^[15]。

众多学者开展了对桥梁破坏模式及剩余承载力的研究, 用不同研究方法揭示了不同爆炸工况下桥梁的破坏模式和剩余承载力。但是针对典型爆炸破坏状态下, 预应力 T 型梁桥的极限承载力研究较少。本文以典型预应力 T 型梁桥为研究对象, 基于 LS-DYNA 建立 1:1 预应力 T 型梁桥三维数值模型, 通过结构毁伤试验和多级静力加载试验验证数值模型的准确性, 并开展不同爆炸作用下的预应力 T 型梁桥的极限承载力数值仿真研究, 得到爆炸后预应力 T 型梁桥的极限承载力。

1 有限元仿真方法

1.1 工程概况

以典型预应力 T 型梁桥为研究对象, 选取其中一跨。该跨长度为 30 m, 宽度为 10.5 m, 桥高度为 2 m, 单跨桥由 5 片 T 型预制梁组成, 各片 T 梁间采用现浇接缝。预应力 T 型梁桥基本结构如图 1 所示, 图中 L 为?。根据相关标准与规范^[16-17], 桥梁极限承载力是指桥梁结构在规定的材料性能、几何参数和计算模式下, 承受作用效应的最大能力, 即结构达到承载能力极限状态时所能承受的最大荷载。对于钢

钢筋混凝土 T 型梁桥, 其极限承载力通常对应于受拉钢筋屈服、受压区混凝土压碎或结构发生失稳破坏的临界状态。为准确评估预应力 T 型梁桥在爆炸作用下的极限承载力, 采用“爆炸毁伤-静力加载”两步法进行有限元仿真。第 1 步是建立爆炸毁伤模型, 获取典型爆炸作用下预应力 T 型梁桥的毁伤模式与破坏状态; 第 2 步是对爆炸作用后的损伤预应力 T 型梁桥进行静力加载数值模拟, 得到 T 梁桥的极限承载力。

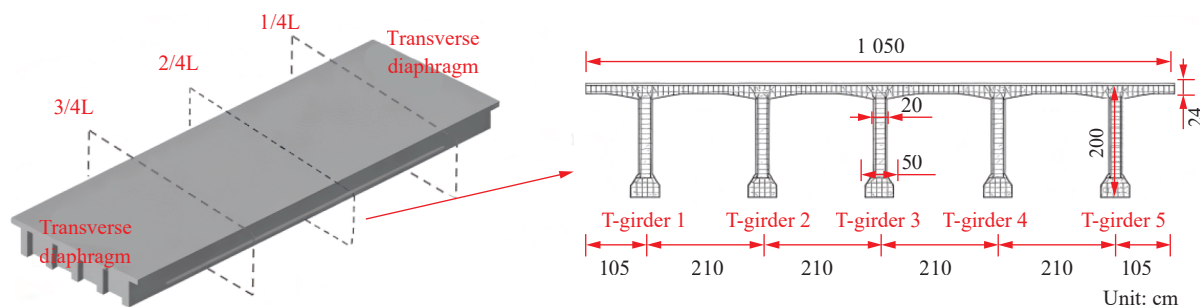


图 1 预应力 T 形梁桥结构

Fig. 1 Structure of prestressed T-beam bridge

1.2 爆炸毁伤有限元仿真方法

采用 HyperMesh 软件建立有限元模型如图 2 所示, 每梁中布置 3 根预应力钢筋, 每根预应力钢筋由 10 根公称直径为 15.2 mm 的预应力钢绞线组成。采用显式动力分析软件 LS-DYNA 进行预应力混凝土 T 梁桥的爆炸损伤分析。基于分离式建模的方法分别建立混凝土和预应力筋(钢筋)模型, 并通过关键字 *CONSTRAINED_LARANGE_IN_SOLID 进行约束耦合。这种建模方法在网格划分时可操作性更高, 且能考虑混凝土和钢筋的不同力学性能, 更真实地反映结构在爆炸工况下的动态响应过程。

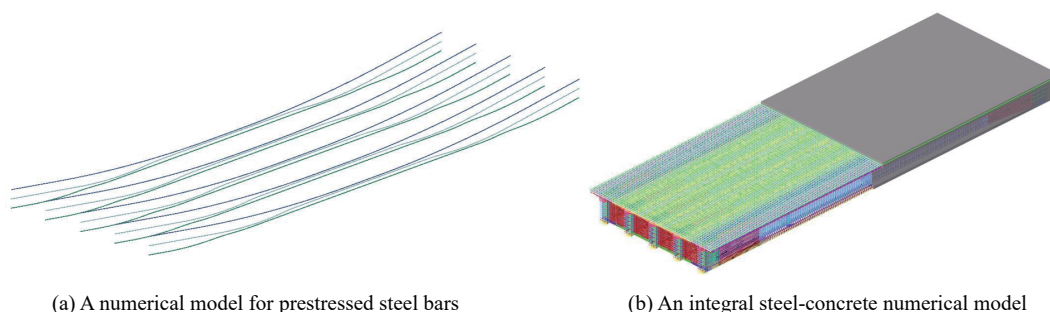


图 2 预应力 T 形梁桥有限元模型

Fig. 2 A finite element model for prestressed T-beam bridges

采用 LS-DYNA 软件材料库中的 Karagozian&Case 模型升级版 MAT_072R3, 关键字为 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3。该模型适用于爆炸工况下混凝土材料的动态响应研究, 在调用时仅需要研究者提供混凝土的弹性模量和无侧限抗压强度即可完成材料模型的定义, 由于混凝土材料的动态强度通常高于静态强度, 因此采用应变率曲线调节爆炸荷载下的混凝土的动态强度, 即横坐标上的有效应变率和纵坐标上的强度增强。混凝土材料的密度为 $2.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.3, 抗压强度为 50 MPa, 这些参数均参考文献 [7]。混凝土采用实体单元, 网格尺寸为 100 mm, 同时为避免计算过程中网格单元畸变, 采用 *MAT_ADD_EROSION 关键字定义单元失效准则, 通过 *LOAD_BODY_Z 对模型施加重力。

普通钢筋和预应力钢筋采用 beam 梁单元, 材料模型采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC。普通钢筋的密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 210 GPa, 切线模量为 2.1 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 400 MPa, 材料参数取值参考文献 [5]; 预应力钢筋的密度为 $8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 195 GPa, 切线模量为 1.95 GPa,

泊松比为 0.3, 屈服强度为 1 860 MPa, 温度线性膨胀系数为 $1.05 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 材料参数取值参考文献 [5]。预应力钢筋在仿真时需在初始阶段施加预应力荷载, 预应力的施加采用“降温法”, 通过关键字 *LOAD_THEKMA_LOAD_CURVE 来实现, 具体原理为:

$$\Delta T = \frac{\sigma}{\alpha E} \quad (1)$$

式中: ΔT 为对预应力钢筋降低的温度, σ 为施加的预应力, E 为预应力钢筋的弹性模量, α 为钢筋的温度线性膨胀系数。根据预应力桥梁设计标准, 确定预应力大小为 1 395 MPa, 计算出 ΔT 为 $-681.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

炸药材料模型选用 *MAT_HIGH_EXPLOSINE_BURN, 状态方程选用 *EOS_JWL。空气被假定为理想无黏性气体, 材料模型选用 *MAT_NULL, 状态方程选用 *EOS_LINEAR_POLYNOMAL, 基本参数^[18]如表 1 所示, 表中, C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和 C_6 为空气常数, e_{0a} 为空气初始体积内能, ρ_{0a} 为空气的初始密度。通过 *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 和 *INITIAL_DETONATION 对炸药的形状、尺寸、爆炸位置、爆炸时间进行定义, 此外, 还需通过 *SET_SEGMENT 和 *BOUNDARY_NON_REFLECTING 定义空气模型的无反射边界。炸药的基本参数^[18]如表 2 所示, 表中, A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为表征炸药材料特性的常数, e_{0e} 为炸药的初始体积内能, D 为爆速, ρ_{0e} 为炸药的初始密度, p_{CJ} 为炸药的 Chapman-Jouguet 压力。完整空气域和 T 梁桥模型见图 3。

表 1 空气材料基本参数^[18]

Table 1 Basic parameters of air material^[18]

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	e_{0a}/MPa	$\rho_{0a}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25	1.29

表 2 TNT 炸药材料基本参数^[18]

Table 2 Basic parameters of TNT explosive material^[18]

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	e_{0e}/GPa	$D/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho_{0e}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	p_{CJ}/GPa
373.8	3.747	4.15	0.9	0.35	6	6.93	1.63×10^3	21

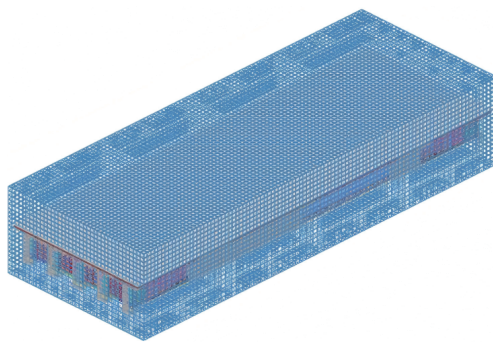


图 3 T 型梁桥空气及桥梁整体模型

Fig. 3 An overall model of air and bridge for T-beam bridge

1.3 爆后 T 型梁静力加载仿真方法

为实现爆炸作用后损伤预应力 T 型梁桥的极限承载力分析, 采用 LS-DYNA 显式-隐式完全重启动技术, 分 2 阶段分析: 第 1 阶段, 用 LS-PrePost 搭建结构模型, 编写 Base.k 文件, 设置显式求解及 *DATABASE_BINARY_D3DUMP 关键字, 提交爆炸瞬态计算, 得到 d3dump01 残余状态文件; 第 2 阶段, 复制 Base.k 生成 Restart.k, 添加 *STRESS_INITIALIZATION 映射 PART 继承残余状态, 切换至隐式静力求解, 删除爆炸载荷并施加静力荷载, 以 lsdyna i=Restart.k r=d3dump01 命令提交重启动计算^[19]。计算完成后, 通过后处理提取荷载-位移曲线, 判定结构极限状态。

加载垫块采用线弹性材料模型*`MAT_ELASTIC` 表征, 选用普通钢筋的材料参数: 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。该垫块不参与静力加载过程, 仅作为刚性传力介质。垫块厚度取 100 mm, 采用八节点六面体实体单元(`SOLID164`)进行网格划分。通过*`DEFINE_CURVE` 来定义时间-荷载曲线, 由于重启动分析中重力和预应力场已完成初始化, 需待结构在自重和预应力作用下达到整体稳定状态后再施加静力荷载。为模拟履带式装甲车辆荷载, 通过关键字*`LOAD_NODE_SET` 对 2 个 $0.5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的垫块施加力荷载, 将所要施加的总荷载平均到 4 m^2 垫块的加载点上, 如图 4(a) 所示; 垫块与 T 梁桥采用*`CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` 进行接触定义, 实现准静态加载, T 梁桥加载模型如图 4(b) 所示。

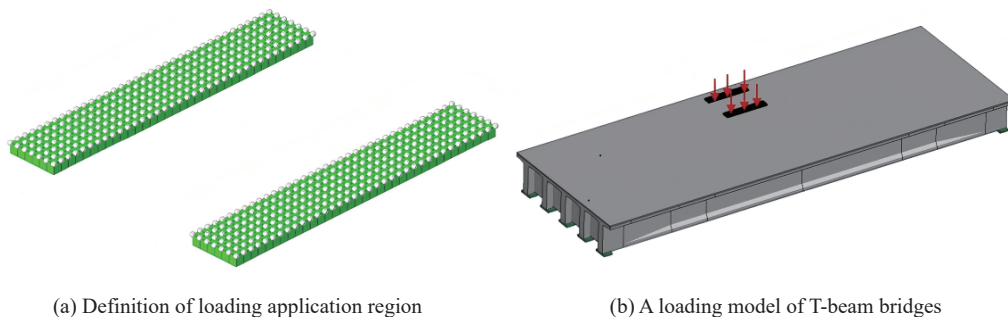


图 4 T 梁桥静力加载方法

Fig. 4 A static loading method of T-beam bridges

2 仿真模型准确性的验证

2.1 爆炸毁伤模型的验证

为探究桥梁在不同爆炸工况下的毁伤特性及数值仿真方法的有效性, 开展了 2 种典型爆炸工况的试验研究与数值模拟分析。2 次爆炸分别为桥面中心接触爆炸和 T 梁桥梁间内部二次爆炸, 其中桥面中心爆炸工况起爆点位于桥面中心, TNT 当量为 1000 kg; 梁间内部二次爆炸工况起爆点位于梁 4~5 间, 爆心距梁 4 的腹板和梁 5 的腹板均为 0.9 m, 中横隔板、 $L/4$ 横隔板的正中位置, 距两横隔板均 3.7 m, TNT 当量为 100 kg。通过对 2 种工况下桥梁毁伤形态、爆孔尺寸、冲击波压力时程等关键指标进行试验测试与仿真对比, 验证数值仿真模型的可靠性, 2 次爆炸工况示意图如图 5 所示。

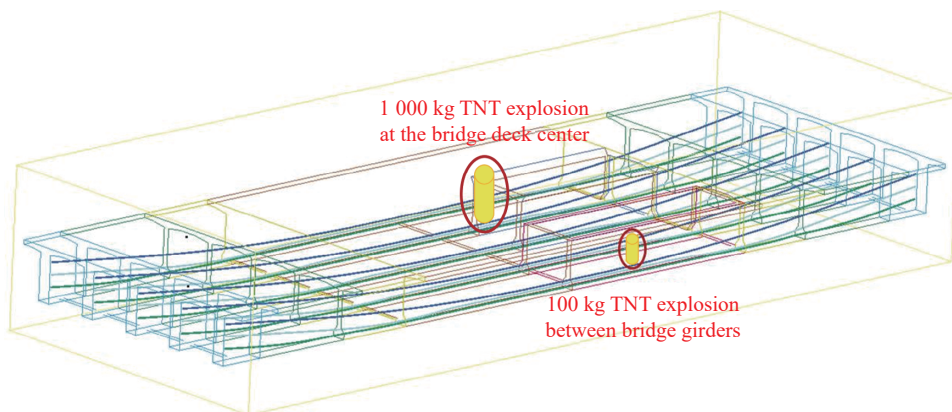


图 5 2 次爆炸工况示意图

Fig. 5 Schematic of two explosion conditions

桥面中心接触爆炸的工况下, 桥梁毁伤特性试验与仿真破坏结果对比如图 6(a) 所示, 在爆炸冲击波作用下桥面中心破孔, 破孔周围翼缘板背部、T 梁腹板和横隔板混凝土崩落、多根钢筋裸露, 数值仿

真得到的损伤形态和程度与试验符合良好。桥面爆孔误差分析如图 6(b) 所示, 数值仿真得到的爆孔尺寸在桥梁长度方向上与试验结果的相比误差约为 5.8% $((1.98-1.87)/1.87=5.8\%<10\%)$, 宽度方向上的相对误差约为 2.5% $((1.94-1.89)/1.94=2.5\%<10\%)$, 数值仿真得到的爆孔尺寸与试验符合良好。开展冲击波超压测试, 测点距爆心沿桥长方向 10.9 m, 沿桥宽方向 2.1 m, 试验冲击波压力测试采用 PCB 113B21 型压电式压力传感器, 量程为 0~1.38 MPa, 搭配美国 GENESIS GEN7tA 高性能数据采集仪完成信号采集与记录, 试验测得的原始超压数据在采集后经过了数字滤波与后处理, 以消除现场环境噪声、电磁干扰及传感器固有高频响应带来的扰动。冲击波压力时程曲线如图 6(c) 所示, 仿真与试验结果吻合良好。

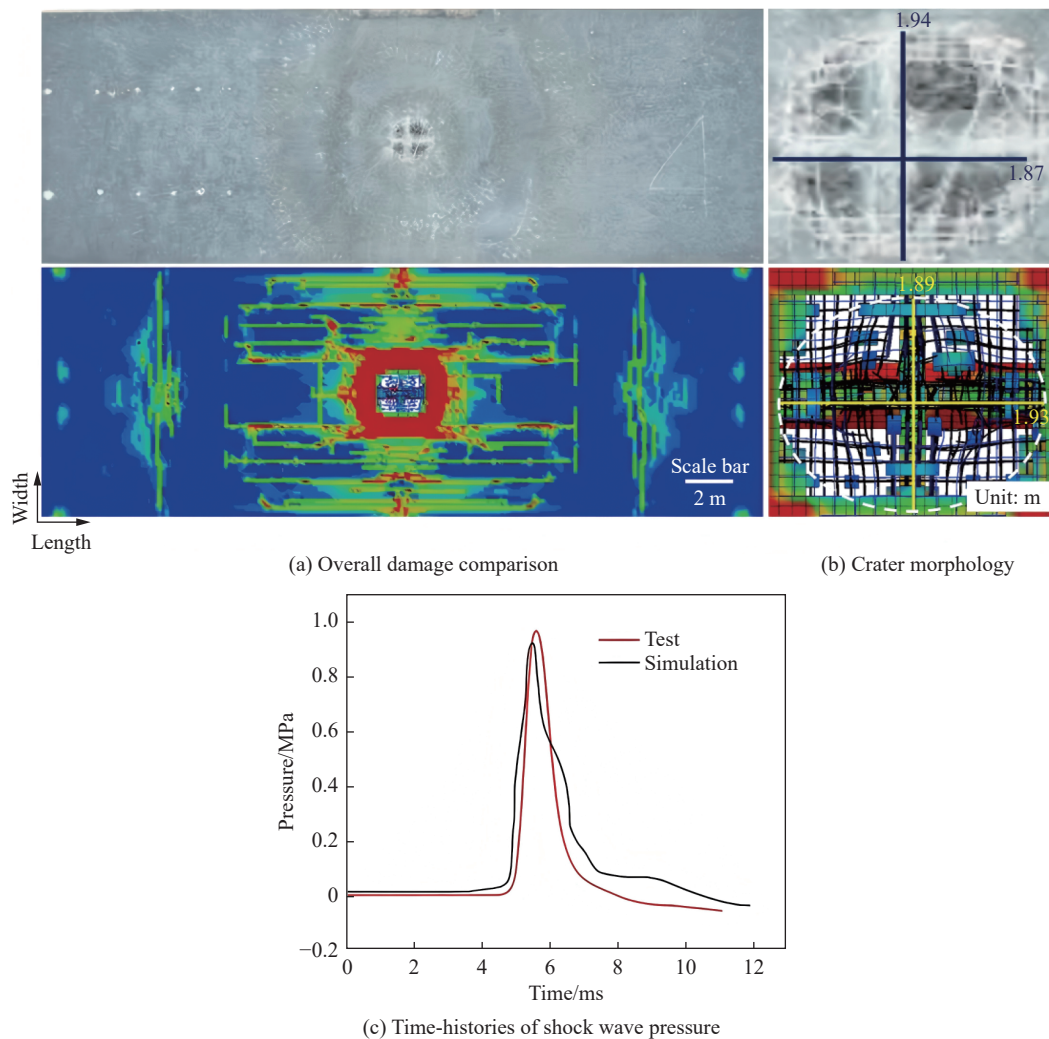
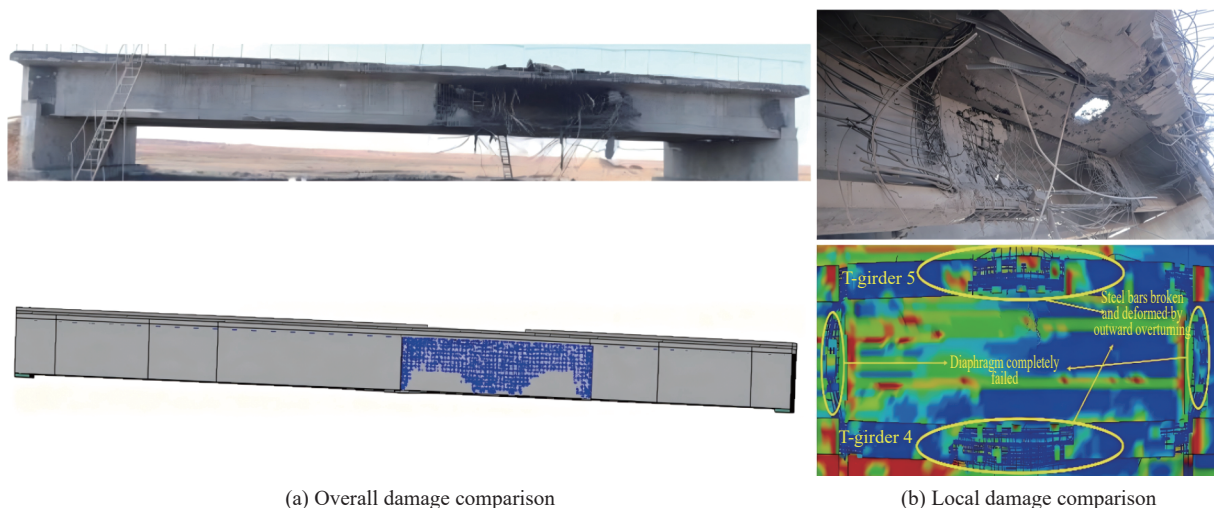


图 6 桥面中心爆炸试验与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of test and simulation results

二次爆炸工况在 T 梁桥面接触爆炸的基础上进行内部爆炸, 爆炸使得梁 4 和 5 产生严重的破坏, 梁 3 发生变形、层裂破坏, 爆心位置处的横隔梁完全破坏失效。爆炸冲击波作用下梁 4 和 5 的腹板发生严重破坏, 混凝土崩落, 钢筋从爆心截面失效折断, 向外翻转变形。梁 3 的迎爆侧腹板上部有一条明显的折弯变形痕迹线, 伴随混凝土崩落、钢筋裸露弯曲。远离爆心一侧的梁 1 和 2 无明显破坏。爆心两侧的中横隔板、 $L/4$ 横隔板完全破坏, 混凝土崩落, 钢筋折断向外侧翻; 其他 T 梁间横隔板无明显破坏, 毁伤模拟结果如图 7 所示。数值模拟得到的内部爆炸后的破坏分布和程度与试验符合良好。



(a) Overall damage comparison

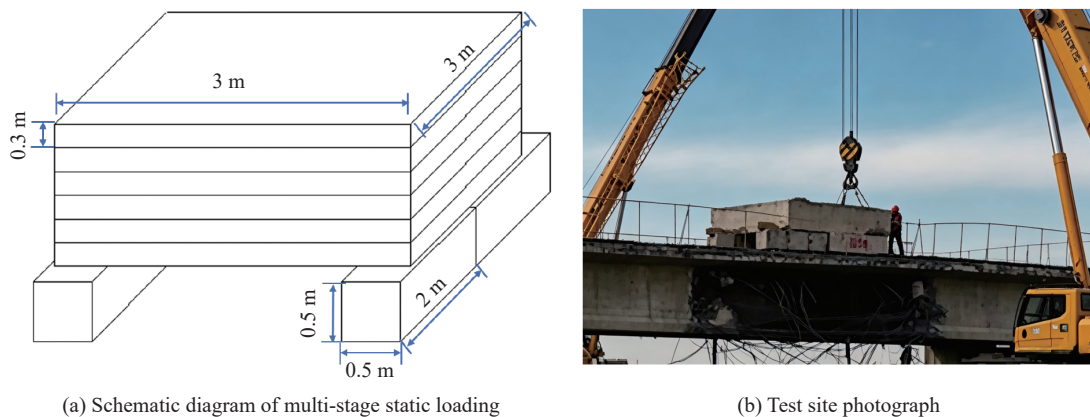
(b) Local damage comparison

图 7 梁间爆炸后试验与仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of experimental and simulation results

2.2 静力加载模型的验证

爆炸试验后,开展多级静力加载试验,模拟特种履带式车辆荷载。加载物选取混凝土配重块,加载前对每块配重块进行称重、标记,使用吊车吊装配重块至加载位置。配重块到位后等待 5 min,待结构完全稳定后测取试验数据。加载位置位于第 2 次爆炸点正上方,第 1 级配重块为 $2\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的立方体,左右两侧各 2 块横向相连,因此配重块与桥面的总接触面积为 4 m^2 。其余各级配重块均为 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 的立方体,配重块加载堆垛方式见图 8(a),多级加载试验现场见图 8(b)。



(a) Schematic diagram of multi-stage static loading

(b) Test site photograph

图 8 多级静力加载试验

Fig. 8 Multi-stage static loading test

各级配重块的质量见表 3。1 级配重为 4 块 $2\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的立方体配重块的质量之和,其余各级均为单块 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 的立方体配重块质量。

根据有限元理论,低量级荷载下结构可能处于接触界面闭合或材料微缺陷起裂的非线性阈值附近,此时荷载-位移关系强非线性、单元刚度矩阵对荷载增量敏感,表现为: (1) 接触非线性的迟滞效应导致模拟位移含“虚位移”(间隙压缩而非实质变形),且难通过低荷载步捕捉试验中界面接触的渐进性; (2) 弹塑性材料的线性本构模拟在低荷载下无法准确描述微观应力-应变非线性,致弹性阶段刚度偏大、位移偏小。基于以上原因排除低荷载下的误差影响得到的加载后的梁 1 的跨中挠度如图所示,结果显示,除 5 级、6 级加载的位移误差为 17.807% 和 12.768% 外,其他各级加载位移误差均未超过 6%,基本满足后

续仿真模拟研究精度。5 级、6 级加载的位移误差过大的原因可能是实际试验为分级逐级静力加载, 有限元仿真采用连续线性加载模式, 加载速率与应力累积节奏存在差异, 致使 5、6 级荷载段位移偏差明显。同时可能是仿真模型中钢筋屈服参数取值偏低, 荷载达 21~25 t 时, 混凝土提前开裂、钢筋过早进入塑性阶段, 导致结构刚度骤降、挠度激增。试验与仿真结果见表 4, 本文误差以试验实测值为基准参考值, 计算方式为 $(w_{\text{sim}} - w_{\text{exp}})/w_{\text{exp}} \times 100\%$, 仿真与试验挠度-荷载对比如图 9 所示, w_{exp} 为挠度试验值, w_{sim} 为挠度仿真值。

表 3 多级静载试验荷载

Table 3 Multistage static test loads

试验荷载分级	单级荷载/t	累计荷载/t
1	4.65	4.65
2	4.07	8.72
3	4.17	12.89
4	4.10	16.99
5	4.02	21.01
6	4.00	25.01
7	4.19	29.20
8	4.00	33.20
9	4.09	37.29
10	3.00	40.29
11	3.25	43.54

表 4 试验挠度与仿真挠度

Table 4 Test and simulation deflection data

累计荷载/t	w_{exp}/mm	w_{sim}/mm	相对误差/%
4.65	0.700	0.685	-2.143
8.72	1.300	1.376	5.846
12.89	1.950	1.890	-3.077
16.99	2.610	2.475	-5.172
21.01	3.250	3.829	17.815
25.01	3.890	4.387	12.776
29.20	4.610	4.610	0.001
33.20	5.240	5.122	-2.252
37.29	5.980	5.941	-0.652
40.29	6.540	6.682	2.171
43.54	7.080	7.126	0.649

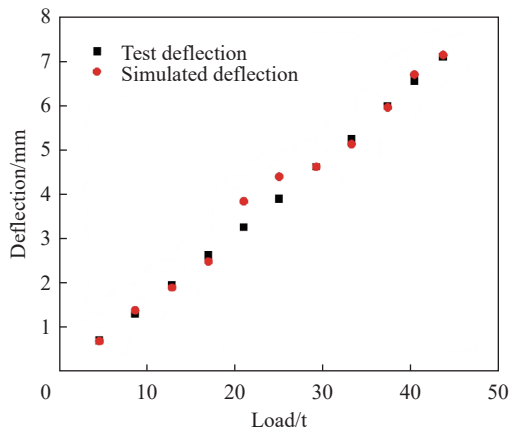


图 9 试验挠度与仿真挠度对比

Fig. 9 Comparison of test and simulation deflections

3 典型爆炸作用下极限承载力分析

3.1 爆炸工况及破坏状态

为明确典型爆炸破坏状态对预应力 T 型梁桥极限承载力的影响规律, 本研究一共设置了 3 个爆炸工况, 分别是桥面中心接触爆炸、在桥面中心爆炸的基础上在梁 4 和 5 间进行内爆和在梁 1、2 和梁 4、5 间进行内爆。不同爆炸工况下, 预应力 T 型梁桥的破坏模式见表 5。

表 5 不同爆炸工况下 T 梁桥的破坏模式

Table 5 Failure modes of t-beam bridge under different explosion conditions

序号	爆炸工况	TNT当量/kg	破坏模式
1	桥面中心接触爆炸	1000	在爆炸冲击波作用下桥面中心破孔, 破孔周围翼缘板背部、T梁腹板和横隔板混凝土崩落、多根钢筋裸露。穿孔长1.89 m, 宽1.98 m。
2	桥面中心爆炸后 梁4~5间内爆	1000(中心爆炸) 100(梁间内爆)	二次爆炸使得爆炸冲击波作用下梁4、5的腹板发生严重破坏, 混凝土崩落, 钢筋从爆心截面失效折断, 向外翻转变形。梁3迎爆侧腹板的混凝土崩落、钢筋裸露弯曲。爆心两侧的中横隔板、L/4横隔板完全破坏。
3	在梁1~2和 梁4~5间内爆	2次均为100	爆炸冲击波作用下梁1~2、4~5的腹板发生严重破坏, 混凝土破碎, 钢筋从爆心截面失效折断, 向外翻转变形。爆心处桥面向上隆起。梁3的腹板与顶板连接处出现开裂。爆心两侧中横隔板、L/4横隔板完全破坏。

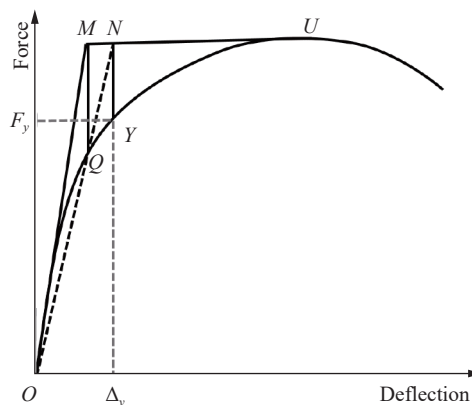
3.2 极限承载力确定方法

基于 LS-DYNA 的承载力计算充分考虑了预应力混凝土结构的弹塑性非线性行为, 包括了钢筋在屈服之后的强化和受压区混凝土进入极限状态后的硬化, 考虑了结构损伤分布的随机性和离散性影响。通过几何作图法确定结构极限承载力^[20], 钢筋混凝土结构到达极限承载力之后, 受压区混凝土被压碎, 受拉区混凝土开裂退出工作, 受拉钢筋屈服, 在这一过程中结构刚度显著下降, 并随时伴有突然破坏的可能, 不能满足正常通行需求, 因此将此状态作为结构承载能力极限状态。

图 10 为构件静力加载过程的荷载-位移($F-D$)

全过程曲线, 完整呈现了构件从弹性阶段、塑性屈服阶段到极限状态的力学响应特征: OQ 段为弹性阶段, 荷载与位移近似线性, 构件刚度稳定; QU 段为塑性发展阶段, 曲线斜率逐渐降低, 刚度持续退化; U 点为极限荷载点, 对应构件的峰值承载能力。

由于本试验曲线无明显屈服平台, 采用几何作图法确定屈服荷载与屈服位移。几何作图法基本步骤如下: 如图 10^[20] 所示, 过 O 点作 $F-D$ 曲线在 O 点的切线 OM , 与过 U 点的水平线 MU 相交于 M 点, 过 M 点作 F 轴平行线与曲线相交于 Q 点, 连接 OQ 并延伸与 MU 交于 N 点, 过 N 点作 F 轴平行线与曲线相交于点 Y , 则 Y 点即为屈服点。

图 10 初始屈服点的确定^[20]Fig. 10 Determination of the initial yield point^[20]

3.3 静力加载工况及极限承载力分析

对完整预应力 T 型梁桥进行静力加载仿真, 图 11(a)~(b) 为 T 梁桥极限状态前后的受力状态, 极限状态前受拉区裂缝即将出现, 到达极限状态之后 T 梁桥受拉区混凝土出现裂缝, 受拉钢筋屈服。如图 11(c) 所示, 随着继续加载, 结构跨中位移不断增大, 腹板及桥面裂缝不断扩大, 桥面继续向下塌陷, 无法继续承载。

对爆炸破坏后典型破坏状态下的预应力 T 型梁桥开展静力加载数值模拟, 一共进行了 6 种工况。荷载-位移曲线如图 12 所示, 静力加载工况和极限承载力衰减幅度计算结果如表 6 所示, 表中衰减幅度为(完整桥梁极限承载力—某工况桥梁极限承载力)/完整桥梁极限承载力 $\times 100\%$ 。

完整预应力 T 型梁桥极限承载力为 949.97 t; 桥面中心接触爆炸后, 极限承载力为 811.96 t, 衰减幅度 14.528%, 整体承载力保持较好; 在桥面中心接触爆炸基础上, 进行梁 4~5 间内爆后, 极限承载力为 215.93 t, 衰减幅度 77.270%; 在梁 1~2 和梁 4~5 间内爆后, 极限承载力为 363.80 t, 衰减幅度为 61.704%。3 种典型破坏状态中, 桥面中心爆炸后叠加梁 4~5 间内爆, 极限承载力衰减最严重。

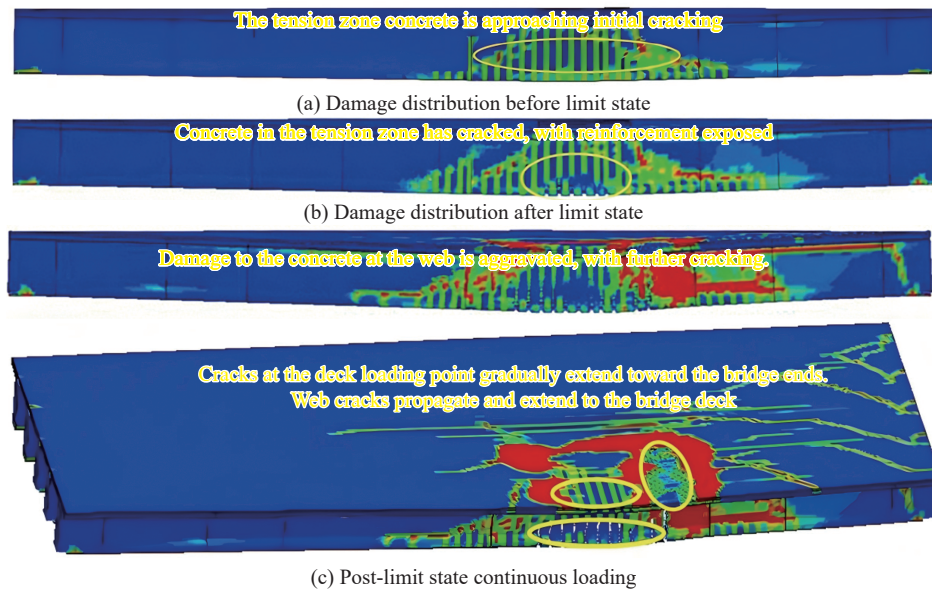
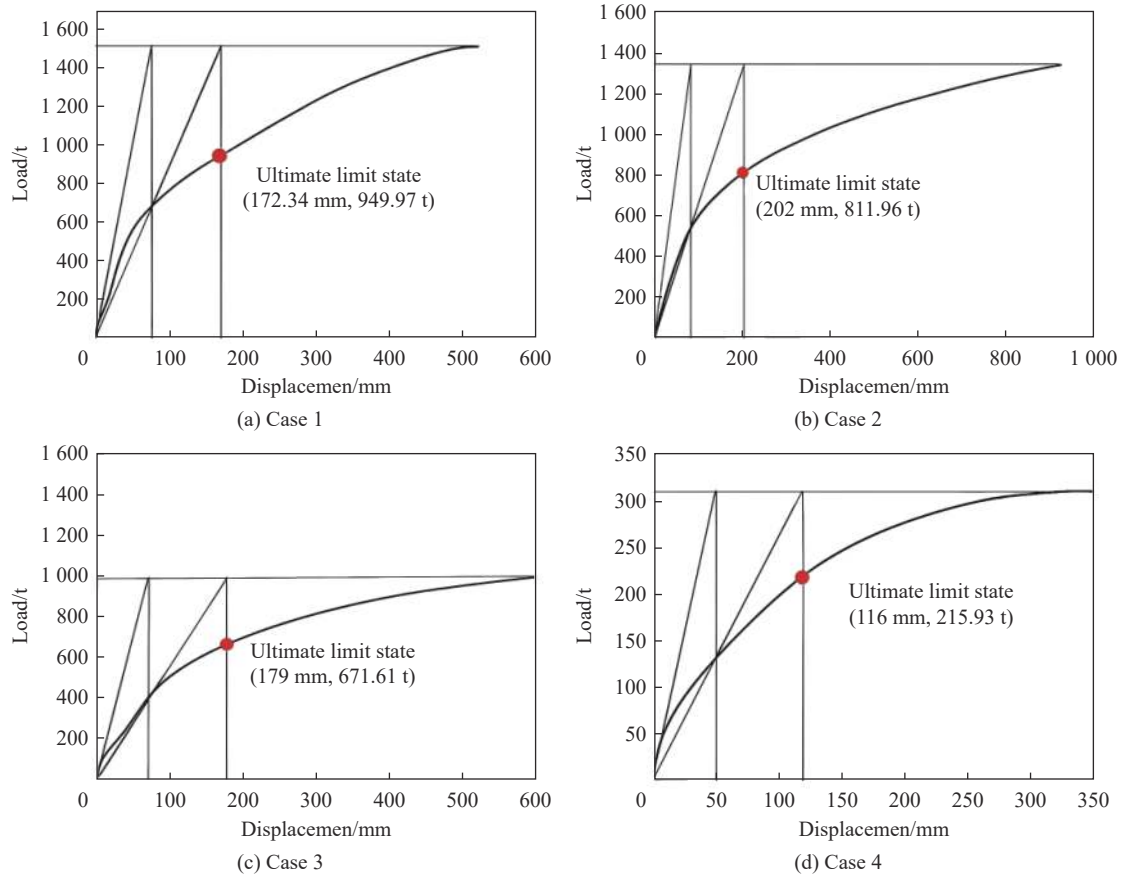


图 11 静力加载时 T 梁桥损伤分布情况

Fig. 11 Damage distribution in T-beam bridge under static loading

图 13 是以梁 4~5 上方、中横隔板与 $L/4$ 横隔板之间的桥面区域作为统一加载位置(对应工况 1、4~5), 对比分析不同爆炸损伤模式下结构的极限承载力及其衰减幅度: (1) 完整桥梁(无爆炸损伤)的极限承载力为 949.97 t, 作为基准值, 衰减幅度为 0, 代表桥梁无损伤状态下的最大承载能力; (2) 桥面中心爆炸后梁 4~5 间内爆(工况 4), 该加载位置处于爆炸损伤正上方, 极限承载力降至 215.93 t, 衰减幅度达



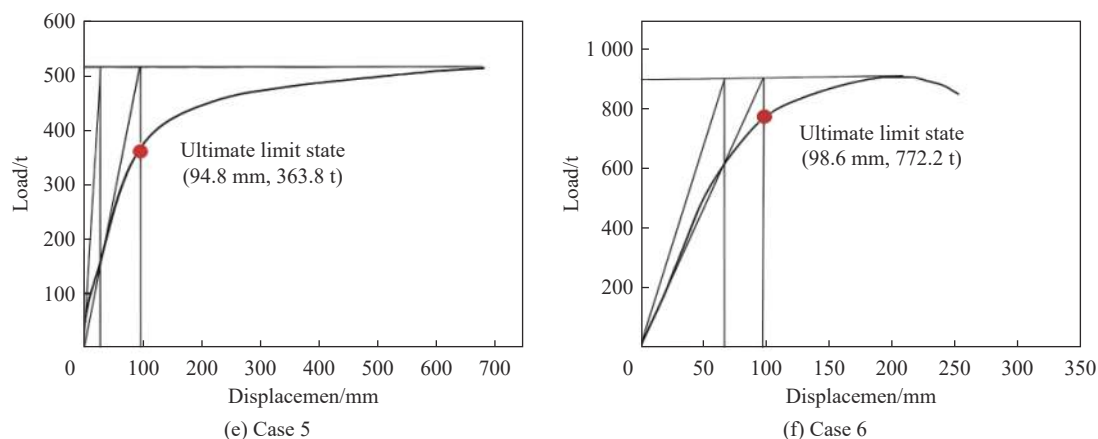


图 12 荷载-位移曲线图

Fig. 12 Load-displacement curves

77.270%, 是所有工况中衰减最显著的情况, 说明爆炸损伤集中区域承受荷载时, 桥梁剩余强度损失极大; (3) 梁 1~2 和梁 4~5 间内爆(工况 5), 加载位置同样处于爆炸损伤正上方, 极限承载力为 363.80 t, 衰减幅度 61.704%, 衰减程度低于工况 4, 表明多梁间内爆(梁 1~2 间和梁 4~5 间)的损伤分布相对分散, 对加载位置处剩余强度的影响弱于接触爆炸叠加相邻位置内爆。

表 6 静力加载数值模拟结果

Table 6 Numerical simulation results under static loading

工况编号	桥梁情况	加载位置	极限承载力/t 衰减幅度/%	
1	完整桥梁	位于梁4~5上方, 中横隔板和L/4横隔板之间的桥面	949.97	0
2	桥面中心接触爆炸	位于梁4~5上方, 桥梁跨中位置的桥面	811.96	14.528
3	桥面中心爆炸后, 梁4~5间内爆	在横向上与爆坑中心处于同一断面, 在纵向上位于梁1~2上方	671.61	29.302
4	桥面中心爆炸后, 梁4~5间内爆	位于梁4~5上方, 中横隔板和L/4横隔板之间的桥面, 处在爆炸损伤的正上方	215.93	77.270
5	在梁1~2和梁4~5间内爆	位于梁4~5上方, 中横隔板和L/4横隔板之间的桥面, 处在爆炸损伤的正上方	363.80	61.704
6	在梁1~2和梁4~5间内爆	位于梁3上方, 中横隔板和L/4横隔板之间的桥面	772.20	18.713

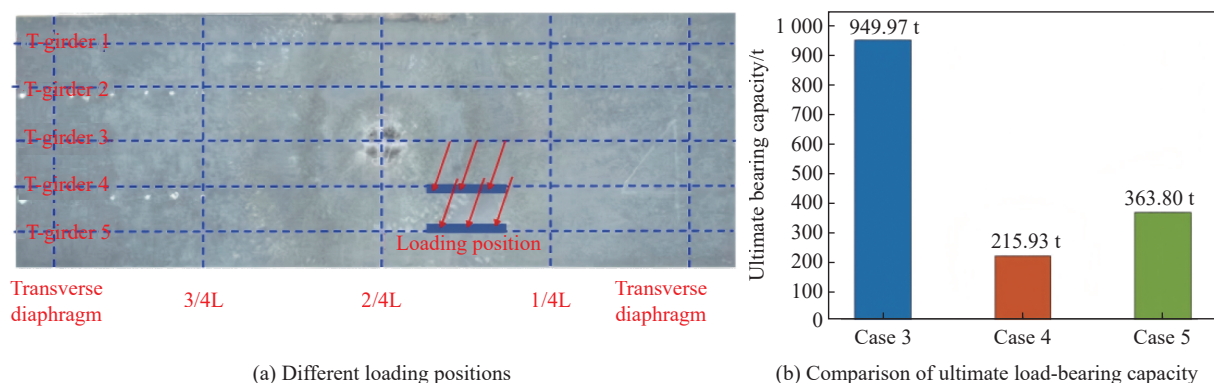


图 13 相同加载位置不同爆炸工况下极限承载力对比

Fig. 13 Comparison of ultimate load-bearing capacity under different explosion conditions at the same loading position

通过上述对比分析可知, 同一加载位置下, 爆炸损伤越集中、损伤程度越高, 桥梁极限承载力衰减越明显, 剩余强度越低。

分别选取 2 种相同爆炸损伤模式, 对比不同加载位置的极限承载力差异, 明确加载位置与损伤区域的相对位置对剩余强度的影响, 加载位置与承载力对比见图 14: (1) 桥面中心爆炸后梁 4~5 间内爆(工况 3~4): 工况 3 加载位置为“梁 1 和 2 的上方”, 远离梁 4 和 5 间的爆炸损伤区域, 极限承载力为 671.61 t, 衰减幅度为 29.302%; 工况 4 加载位置为“梁 4 和 5 的上方(爆炸损伤正上方)”, 极限承载力仅为 215.93 t, 衰减幅度为 77.270%。二者对比可见, 加载位置位于爆炸损伤正上方时, 极限承载力显著下降, 二者衰减幅度之比为 2.64, 说明损伤区域承受荷载时, 桥梁承载能力大幅弱化; (2) 梁 1~2 和梁 4~5 间内爆(工况 5~6): 工况 5 加载位置为“梁 4 和 5 的上方(爆炸损伤正上方)”, 极限承载力为 363.80 t, 衰减幅度为 61.704%; 工况 6 加载位置为“梁 3 的上方”, 远离两侧梁间的爆炸损伤区域, 极限承载力提升至 772.20 t, 衰减幅度降至 18.713%。二者对比表明, 加载位置远离爆炸损伤区域时, 桥梁可保留更高的剩余强度, 二者衰减幅度之比为 3.29。

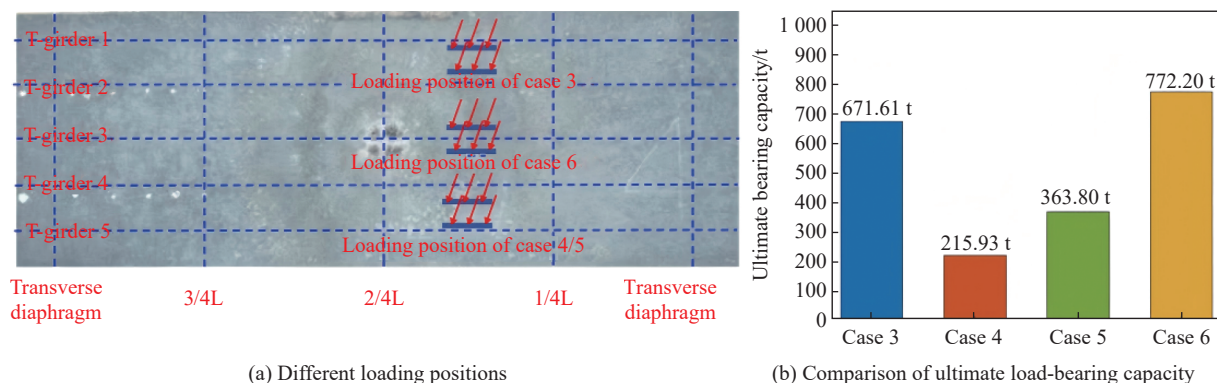


图 14 相同爆炸工况不同加载位置下极限承载力对比

Fig. 14 Comparison of ultimate load-bearing capacity with different loading positions under identical explosion condition

通过上述对比分析可知, 相同爆炸损伤模式下, 加载位置与爆炸损伤区域的相对位置直接影响极限承载力, 加载位置越靠近损伤区域, 极限承载力越低, 剩余强度损失越严重; 远离损伤区域时, 桥梁可充分发挥未损伤部位的承载作用, 剩余强度更高。

5 结 论

(1) 桥面中心接触爆炸的主要破坏模式是爆心附近桥面破孔, 内部爆炸的主要破坏模式是爆心附近主梁腹板产生严重的破坏, 腹板发生变形、层裂破坏, 横隔梁完全破坏失效; 多级静载试验挠度数据和静力加载仿真获取的挠度数据相对误差均在 20% 以内, 试验结果与仿真结果基本一致, 验证了预应力 T 型梁桥数值模型的准确性。

(2) 爆炸损伤会显著降低预应力 T 型梁桥的极限承载力, 单次桥面中心接触爆炸使极限承载力损失 14.528%, 叠加梁间内爆后承载力衰减幅度大幅提高, 最不利工况下损失比例达 77.270%, 也是 3 种典型破坏状态下, 极限承载力衰减最严重的。

(3) 合理选择荷载位置可有效规避爆炸损伤的不利影响, 大幅提升桥梁的极限承载能力。在爆炸工况 2 和爆炸工况 3 中, 加载位置在爆心上方的极限承载力衰减幅度分别是加载位置远离爆心的 2.64 倍和 3.29 倍。

参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁工程-上册 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2012: 118-122.
- FAN L C. Bridge engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2012: 118-122.

- [2] 张宇, 李国强, 陈可鹏, 等. 桥梁结构抗爆安全评估研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(1): 135–144. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0135-10.
ZHANG Y, LI G Q, CHEN K P, et al. Research advances of safety assessment of bridges under blast load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 135–144. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0135-10.
- [3] BOLOORANI A D, DARVISHI M, WENG Q H, et al. Post-war urban damage mapping using InSAR: the case of Mosul city in Iraq [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(3): 140. DOI: 10.3390/ijgi10030140.
- [4] 陈代果, 马宏昊, 沈兆武, 等. 非接触爆炸作用下预应力 T 型梁桥的动态响应研究 [J]. *工程爆破*, 2023, 29(3): 17–23, 54. DOI: 10.19931/j.EB.20220034.
CHEN D G, MA H H, SHEN Z W, et al. Study on dynamic response of prestressed T-beam bridge under non-contact explosion [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(3): 17–23, 54. DOI: 10.19931/j.EB.20220034.
- [5] 张见升, 景建斌, 孙浩, 等. 爆炸荷载下预应力 T 型梁损伤效应数值仿真分析 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(S2): 193–198. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0961.
ZHANG J S, JING J B, SUN H, et al. Numerical simulation and experimental study on damage effect of prestressed T-shaped beam under blast load [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(S2): 193–198. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0961.
- [6] 徐赵威, 汪维, 李奕硕, 等. 接触爆炸下聚脲/钢筋混凝土厚板复合结构的抗爆性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(3): 033104. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0083.
XU Z W, WANG W, LI Y S, et al. Blast resistance of polyurea/reinforced concrete thick slab composite structures under contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(3): 033104. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0083.
- [7] 徐其鹏, 唐泓, 翟红波. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土预应力 T 梁桥损伤模式研究 [J]. *包装工程*, 2024, 45(21): 253–259. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.034.
XU Q P, TANG H, ZHAI H B. Damage mode of reinforced concrete prestressed T-beam bridge under explosive load [J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(21): 253–259. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.034.
- [8] 宋洪雨, 苏春杰, 蔡保硕, 等. 混凝土桁架拱桥荷载试验与承载力评价 [J]. *特种结构*, 2024, 41(2): 51–57, 64. DOI: 10.19786/j.tzjg.2024.02.010.
SONG H Y, SU C J, CAI B S, et al. Load test and bearing capacity evaluation of truss arch bridges [J]. *Special Structures*, 2024, 41(2): 51–57, 64. DOI: 10.19786/j.tzjg.2024.02.010.
- [9] 姜天华, 王强, 杨壮, 等. 在役预应力混凝土桥梁损伤状态承载力评估 [J]. *铁道建筑*, 2016(8): 31–34. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2016.08.07.
JIANG T H, WANG Q, YANG Z, et al. Assessment of bearing capacity for damaged prestressed concrete bridge in service [J]. *Railway Engineering*, 2016(8): 31–34. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2016.08.07.
- [10] 马长龙. 震损 RC 桥墩剩余承载力及通行能力评估方法研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024: 35–48. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.001778.
MA C L. Research on the evaluation method of residual bearing capacity and traffic capacity of earthquake damaged RC pier [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024: 35–48. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.001778.
- [11] 吴光宇, 林伟, 汪劲丰, 等. 有效预应力对大跨 P. C. 桥梁极限承载力的影响研究 [J]. *计算力学学报*, 2013, 30(3): 362–369. DOI: 10.7511/jslx201303008.
WU G Y, LIN W, WANG J F, et al. Influence of effective prestress on ultimate bearing capacity for large-span prestressed concrete bridges [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(3): 362–369. DOI: 10.7511/jslx201303008.
- [12] 邓旭东, 宋泽冈, 李旺. 基于破坏性试验的预应力混凝土简支 T 梁极限承载力分析 [J]. *公路交通科技: 应用技术版*, 2018, 14(7): 259–262.
- [13] 陈泓宇, 李华伟. 钢筋混凝土墩柱侧向冲击损伤的评估方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2026, 46(4): 045102. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0441.
CHEN H Y, LI H W. Damage assessment method of RC piers under lateral impact loads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2026, 46(4): 045102. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0441.
- [14] 朱小青, 陈代海, 陈淮. 先简支后连续 T 梁桥全过程力学行为及极限承载力分析 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(1): 89–95. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2016.01.014.
ZHU X Q, CHEN D H, CHEN H. Study on full loading process performance of simply supported continuous T-beam bridge [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(1): 89–95. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2016.01.014.

- [15] 徐略勤, 李修君, 王佩, 等. RC 空心板抗弯承载性能与振动频率的关系 [J]. *振动、测试与诊断*, 2025, 45(2): 301–308. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2025.02.013.
XU L Q, LI X J, WANG P, et al. Research on the relationship between flexural bearing performance and vibration frequency of RC voided slabs [J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2025, 45(2): 301–308. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2025.02.013.
- [16] JTG/T J21-2011 公路桥梁承载能力检测评定规程 [S]. JTG/T J21-2011 Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges [S].
- [17] GB/T 50152-2012 混凝土结构试验方法标准 [S]. GB/T 50152-2012 Standard for test method of concrete structures [S].
- [18] 彭玉林, 吴昊, 方秦. 爆炸荷载在圆截面桥梁墩柱上的分布规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 122201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0317.
PENG Y L, WU H, FANG Q. Blast loading distributions on the circular sectional bridge columns [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 122201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0317.
- [19] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA® keyword user's manual volume I [EB/OL]. (2021-09-24)[2026-05-08]. https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_I_R13.pdf.
- [20] 王鹏. 高强钢筋高强混凝土预应力梁受力性能及延性试验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 55–56.
WANG P. Experimental study on performance under loads and ductility of prestressed high-strength concrete beams [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 55–56.

(责任编辑 张凌云)