

车辆偏心撞击下圆形桥墩的动力响应*

柳云挺^{1, 2}, 张杰^{1, 2}, 梁绍敏^{1, 2}, 闫涛¹, 王志勇^{1, 2}

(1. 太原理工大学航空航天学院, 山西 太原 030024)

(2. 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 针对桥墩在车辆碰撞作用下的整体动力响应, 已有研究多针对车辆的正面碰撞, 对车辆偏心碰撞条件下桥墩的响应分析有待进一步完善。为此, 针对车辆偏心撞击圆形桥墩问题, 开展了桥墩动力响应的数值分析。建立并验证了车辆-圆形桥墩碰撞有限元模型, 对比了不同偏心程度与正面碰撞下的失效模式、撞击力时程及关键位移响应, 进一步分析了车速和车辆质量对偏心撞击动态响应的影响规律。结果表明: 当偏心程度小于 60% 时, 迎撞区损伤及背侧弯曲裂缝整体弱于正面中心撞击; 当偏心增大至发动机不再直接参与接触后, 碰撞机理发生转变, 整体损伤水平反而高于正面中心撞击。车速对桥墩损伤的影响呈现非线性特征, 当速度增加到 120 km/h 时, 损伤程度明显加重, 并伴随结构峰值位移显著增大。质量参数呈阶段性主导特征: 发动机质量主要控制发动机接触阶段的弯剪响应, 而货物质量增大将显著放大货物阶段的冲击效应, 并推动柱体损伤由局部开裂向更大范围的弯曲破坏演化。

关键词: 车辆偏心撞击; 圆形桥墩; 动力响应; 损伤演化

中图分类号: U447; O347

文献标识码: A

近二十年来, 车辆撞击引发的桥梁安全事件呈上升趋势, 造成的经济损失与人员伤亡不容忽视。美国 1989—2000 年 503 座损坏桥梁的统计表明, 除洪水与冲刷外, 撞击是第二位主要失效原因^[1]。易仁岩^[2]对 2000—2014 年间中国 92 起桥梁倒塌事件的统计表明, 车辆撞击因素占比达到 16.3%。由于交通运行环境复杂, 车辆失控、偏离车道及超载等情况难以完全避免, 桥墩作为下部结构中最易遭受车辆直接冲击的构件, 其在车辆撞击作用下的动力响应、损伤演化与失效机理需深入研究。

国内外学者围绕车辆—桥墩碰撞问题已开展了试验与数值研究。王娟等^[3]通过模拟大型卡车撞击桥墩, 研究了撞击力作用位置与幅值变化规律。Do 等^[4,5]基于数值模拟对桥墩碰撞过程中的动态响应与失效类型进行了分类, 并进一步讨论了发动机质量对撞击力的影响。Chen 等^[6]开展了卡车撞击钢管混凝土护柱的试验研究, 试验车辆为净重 5170 kg 的东风 EQ140 卡车, 撞击速度为 43.2 km/h。随后, Chen 等^[7]还完成了车辆撞击 RC 柱的足尺碰撞试验, 采用净重 7.76 t 的中型卡车, 碰撞速度达到 81 km/h, 并设置偏心距离约 450 mm 的偏心撞击工况。Heng 等^[8]采用相同的简化车辆模型对双柱式钢筋混凝土桥墩 (RCBP) 开展缩尺水平撞击试验, 结果表明: 撞击力时程主要受撞击速度控制, 而车辆质量的重要性在碰撞后期更为突出; 构件损伤程度及桥墩最大侧向位移与撞击动能呈显著正相关。Zhao 等^[9]对 RCBP 在卡车撞击作用下的动力特性与损伤机理进行了研究, 指出不同车辆参数组合会导致桥墩动力响应与破坏模式存在明显差异, 并揭示初始撞击阶段混凝土吸能占主导, 而钢筋耗能更依赖于后续桥墩侧向变形过程。

在规范与工程应用方面, Buth 等^[10]开展了半挂车拖拉机撞击混凝土填充钢管 (CFST) 柱的正

*收稿日期: 2026-02-09; 修回日期: 2026-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (12472390)

作者简介: 柳云挺 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事混凝土桥墩抗撞性能研究. E-mail: liuyuntingtyut@163.com

通讯作者: 闫涛 (1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事结构抗冲击性能与防护研究. E-mail: yantao@tyut.edu.cn

面与偏心碰撞试验, 其中一辆卡车以 2670 kN 的力偏心撞击, 另一辆以 4000 kN 的力正面撞击, 并据此提出了桥梁碰撞避免设计建议。AASHTO-LRFD 指南^[11]随后参考相关试验成果, 对等效静力设计力的取值以及撞击方向与位置等进行了修订。然而, 现有关于车辆—桥墩碰撞的研究与工程评估中, 仍普遍以正面中心碰撞作为“最不利工况”的隐含假定。事故数据库分析表明, 实际车辆与桥墩碰撞更常表现为偏离中心的撞击特征, 而非理想化的正面碰撞^[12,13], 这意味着仅基于正面碰撞情景开展抗撞评估可能难以全面反映桥墩在实际交通风险下的受力与损伤特征。

针对偏心碰撞问题, 现有研究仍存在明显不足。一方面, 受试验成本高、操作复杂等因素制约, 偏心足尺碰撞试验数量极为有限, 例如 Chen 等^[14]的卡车碰撞测试仅实施了一次偏心碰撞工况。另一方面, 已有偏心碰撞数值研究多聚焦于撞击力特征, 较少系统讨论桥墩整体动力响应、结构损伤演化及失效机制^[15-17]。近年来, 相关研究开始由单纯碰撞响应分析进一步拓展至偏心撞击机理、易损性评估及不同撞击类型差异等方面。例如, Xue 等^[18,20]指出, 不同撞击类型会导致桥墩动力响应与损伤机制存在明显差异, 偏心车辆撞击下圆形桥墩的损伤程度在部分工况下可能高于正面撞击; Fu 等^[19]基于剩余承载力提出了车辆撞击桥墩的脆弱性评估框架, 并讨论了斜撞因素对易损性的影响。Liu 等^[21]研究了 UHPC 桥墩在重型车辆撞击下的动力性能, 系统分析了车辆重量、速度及桥墩参数对撞击响应和损伤等级的影响, 指出车辆重量和速度是影响峰值撞击力与损伤程度的关键因素。此外, Li 等^[22]通过大量数值模拟建立了双柱式 RC 桥墩在车辆撞击下的损伤指标与性能化设计流程, 进一步推动了桥墩抗撞研究向工程设计应用发展。总体来看, 现有研究虽然已揭示偏心撞击区别于正面撞击的若干响应特征, 并在损伤评估与工程应用方面取得一定进展, 但针对偏心碰撞条件下桥墩冲击响应、损伤演化与失效机制及其关键影响因素之间内在联系的认识仍不充分。因此, 有必要在偏心碰撞情景下, 对桥墩的冲击响应开展更为系统、全面的分析, 以支撑抗撞设计与加固决策。

基于上述研究背景, 本文面向桥梁圆形桥墩, 建立车辆—桥墩偏心碰撞的有限元数值模型, 系统分析不同偏心碰撞工况下桥墩的失效模式、撞击力时程特征以及位移响应规律; 在此基础上, 进一步研究偏心状态下撞击速度、车辆质量等关键参数对桥墩动力响应与损伤演化的影响机制, 相关结果可为偏中心车辆碰撞条件下桥墩抗撞设计与防护加固提供参考依据。

1 有限元模型与验证

本文基于 LS-DYNA 进行分析, 采用连续面盖帽材料模型 (MAT_CSCM) 模拟混凝土的非线性动力行为^[23, 24]。采用梁单元模拟钢筋, 使用 Cowper-Symonds 模型^[25]考虑应变率效应对动态强度的影响。混凝土和钢筋材料模型参数设置见表 1^[26]。混凝土采用 *MAT_CSCM_CONCRETE 模型。该模型的可靠性已被多项研究证实^[24,25,27,28]。本文中, 模型输入参数主要包括混凝土抗压强度、密度及最大骨料粒径, 其余参数采用模型默认的经验参数自动生成。

本文采用两跨简支桥梁作为研究对象, 其有限元模型与文献^[26]一致。桥梁和桥墩钢筋几何参数如图 1 所示, 箱梁长 20 m、宽 12.16 m、高 0.9 m。下部结构采用典型钢筋混凝土双柱式桥墩, 墩柱直径 1.0 m、墩高 5.0 m。墩柱纵向配置 26 根直径 28 mm 的 HRB400 级钢筋, 纵筋配筋率为 2%。箍筋直径为 16 mm, 在靠近基础与盖梁的各 2 m 范围内箍筋间距取 100 mm, 中间区段间距取 200 mm。盖梁截面尺寸为 1.4 m×1.4 m, 主筋直径 32 mm, 箍筋直径 16 mm, 箍筋间距均为 100 mm, 纵筋直径 20 mm、间距 120 mm。

在桥梁模型中, 对桥梁的上部下部结构进行简化, 对于下部结构, 本文未进一步考虑桩土相互作用, 直接对基础底部节点施加固定约束^[27-29]。本文研究的主题对象是桥墩, 桥梁上部结构在车辆撞击桥墩底部过程中通常不会产生明显损伤, 研究中常采用刚体材料模拟。通过调整箱梁材料密度^[30], 控制墩底轴力为桥墩承载力的 10%。盖梁采用刚体材料模型 (*MAT_RIGID) 进行模拟, 其密度取 4408 kg/m³, 杨氏模量取 34500 MPa, 泊松比取 0.3。支座采用线弹性材料模型 (*MAT_ELASTIC) 进行模拟, 其密度取 1150 kg/m³, 杨氏模量取 293 MPa, 泊松比取 0.49。

混凝土与钢筋单元尺寸为 50 mm, 二者通过 *LAGRANGE_IN_SOLID 实现耦合, 并忽略钢筋与混凝土之间的相对滑移; 采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 接触算法模

拟车辆与桥墩的碰撞接触，同时动、静摩擦系数取 0.3。使用

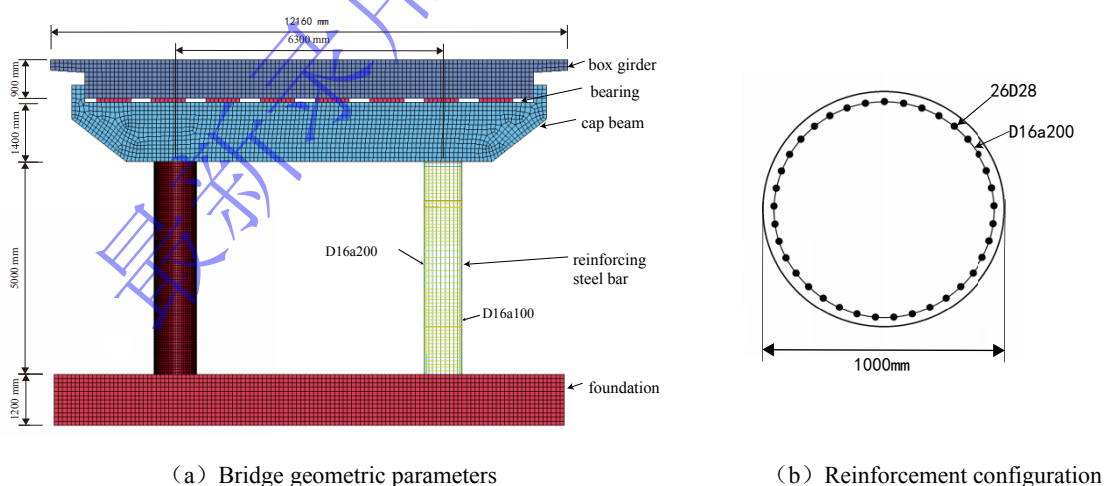
*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 自接触算法模拟桥梁结构内部构件间的相互作用，动、静摩擦系数取 0.1。

表 1 混凝土与钢筋材料参数^[26]

Table 1 Material parameters of concrete and reinforcing steel^[26]

Structural material	Material model	Parameter	Value
Concrete/Foundation	*MAT_CSCM_CONCRETE	Density	2500 kg/m ³
		Compressive strength	35 MPa
		Maximum aggregate size	19 mm
		Density	7850 kg/m ³
		Poisson's ratio	0.3
		Young's modulus	200 GPa
		Yield strength (Stirrups)	200 MPa
Reinforcement / Stirrups	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC	Yield strength (Longitudinal reinforcement)	400MPa
		Failure strain	0.15
		Tangent modulus	1500 MPa
		Strain-rate parameter C	40.4
		Strain-rate parameter p	5

车辆原型来自 NCAC 官网发布的精细化有限元车辆模型库，本文选取福特 F800 卡车作为碰撞对象^[33]，如图 2。该车型模型已被多项研究采用并验证其可靠性^[32,34]。整车几何参数为车长 8.58 m、车宽 2.44 m、车高 3.32 m，轴距 5.29 m。模型规模约为 3.5 万个单元，其中货箱由厚度 1.7 mm 的钢板组成。



(a) Bridge geometric parameters

(b) Reinforcement configuration

图 1 桥梁/桥墩钢筋几何参数

Fig. 1 Bridge and rebar geometric parameters

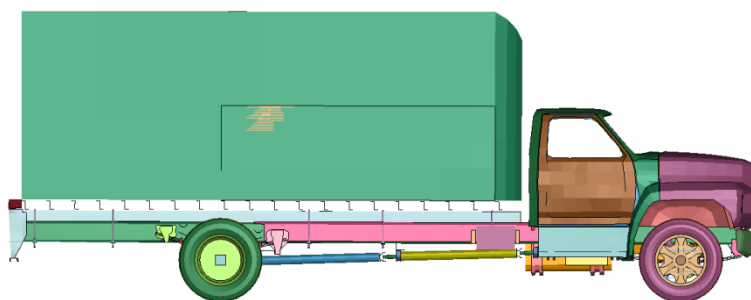
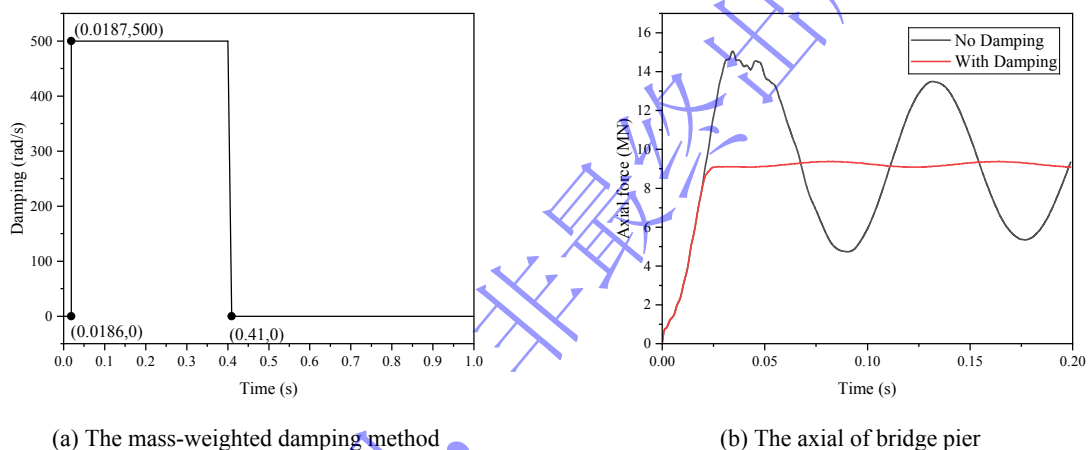


图 2 车辆模型

Fig. 2 Vehicle model

盖梁、桥墩及车辆均施加重力场，首先进行重力初始化以建立桥梁恒载作用下的初始应力状态，待结构达到静力平衡后再施加车辆初速度开展车桥撞击分析。重力初始化采用 Fan 等^[31]提出了一种基于质量加权阻尼的初始化方案，以加速重力平衡过程，调整阻尼加载时间以及阻尼值后的阻尼加载曲线与轴力时程图如图 3 所示。



(a) The mass-weighted damping method

(b) The axial of bridge pier

图 3 重力初始化过程

Fig. 3 Gravity initialization process

钢筋混凝土结构在冲击作用下的损伤模拟难度较大，本文首先选择文献[35]落锤冲击试验对模型中混凝土与钢筋材料的本构参数及接触算法进行验证。文献试验装置如图 4 所示。在该试验中，一个质量为 400 kg 的落锤从 0.3 m 高度自由下落并撞击试验梁，落锤的撞击头有一个半径为 90 毫米的半球形尖端。如图 5 所示，试验梁全长 1700 mm，净跨 1400 mm，截面为 150 mm×250 mm 的矩形截面，混凝土抗压强度为 42 MPa。箍筋直径 10 mm，间距为 75 mm，纵钢筋直径 16 mm。试件混凝土和钢筋均采用与上述桥墩模型相同的单元及材料模型建立。

图 6 给出了有限元模拟损伤云图与试验部件的裂缝分布图对比，混凝土损伤区域与裂缝分布特征基本一致。图 7(a)、(b)分别对比了跨中挠度时程曲线与撞击力时程曲线，撞击力时程整体吻合良好，有限元与试验峰值分别为 124.66 kN 与 122.87 kN，相对误差为 1.46%，跨中挠度对比结果表明，有限元峰值为 5.73 mm、试验峰值为 6.09 mm，相对误差为 5.85%，两者在上升段与衰减段的演化规律一致。说明所采用的材料本构与接触设置能够合理表征混凝土梁冲击响应，从而为车-桥碰撞模型的可靠性提供支撑。

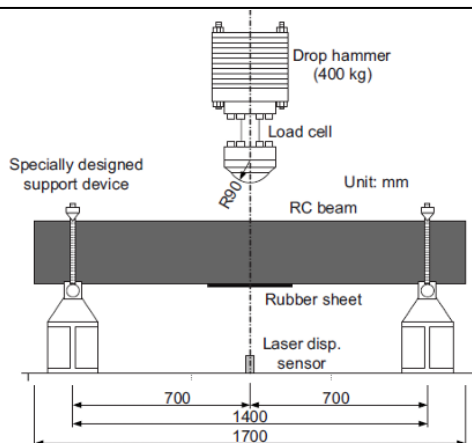


图 4 落锤冲击试验装置示意图[35]

Fig. 4 Schematic diagram of the drop-weight impact test apparatus [35]

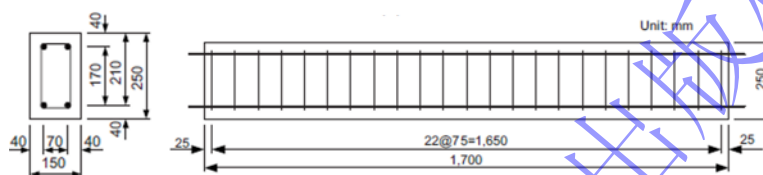


图 5 落锤冲击试验装置钢筋示意图[35]

Fig. 5 Schematic of the specimen reinforcement for the drop-weight impact test [35]

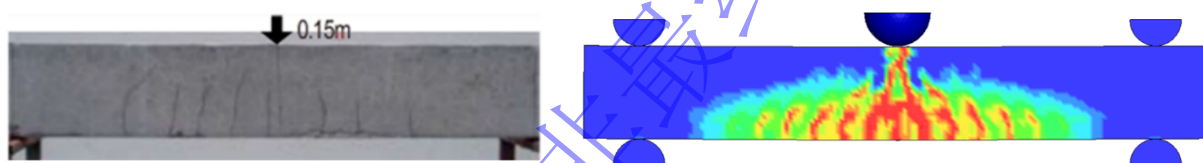
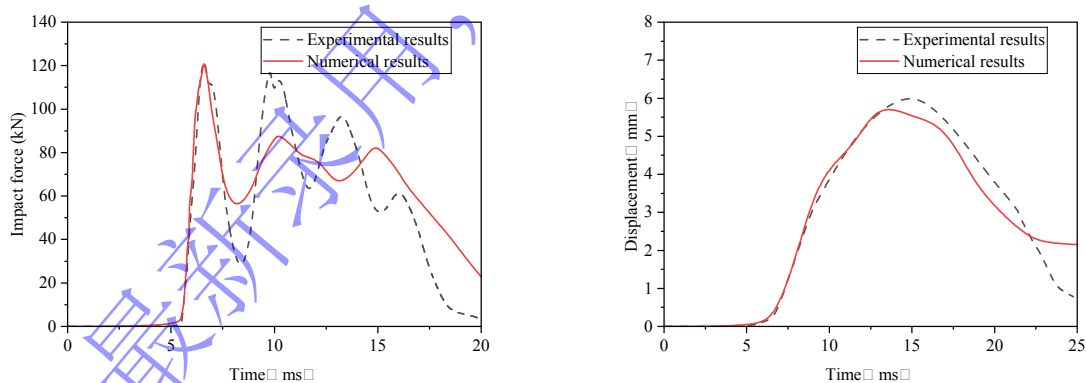


图 6 试验与仿真的梁体损伤形态对比

Fig. 6 Comparative analysis of beam damage modes in experiments and simulations



(a) Impact force–time history curve

(b) Midspan deflection time history

图 7 仿真数值验证

Fig. 7 Numerical validation of the simulation

通过对文献[26]中研究的事故进行数值模拟，进一步对车辆撞击桥墩的过程进行有效性验证。事故中车辆本体未与桥墩发生直接撞击，桥墩损伤主要源于货箱内三卷钢卷，因此本模拟中仅考虑钢卷。每卷钢卷长 1500 mm、外径 1200 mm、内径 335 mm、质量 11.75 t，速度从右往左分别为 80 km/h、60 km/h 和 40 km/h，材料采用**MAT_PLASTIC_KINEMATIC* 模拟。桥墩模型与 1.1 中描述桥墩模型相同的单元及材料参数。钢卷—桥墩接触采用**CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE* (动/静摩擦系数 0.3)，钢卷—钢卷接触采用

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE (动/静摩擦系数 0.1)。如图 8 所示, 本文仿真结果中桥墩关键部位损伤模态与事故现场基本一致, 桥墩下部出现弯剪破坏、混凝土出现剥落且钢筋外露, 整体模型可合理模拟该事故的碰撞过程及桥梁整体响应。

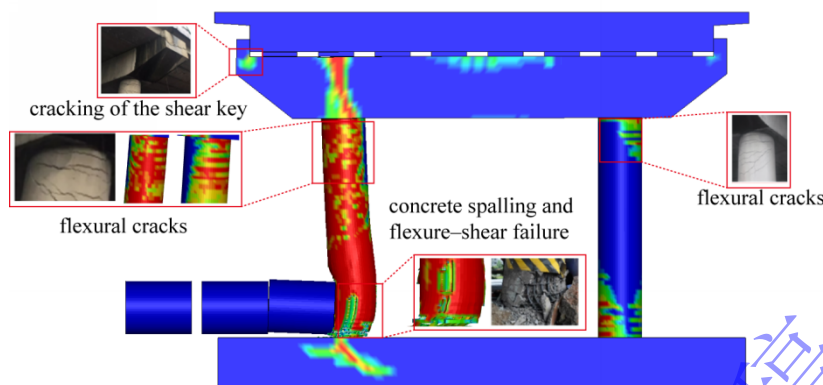


图 8 碰撞事故验证

Fig. 8 Accident-based validation

2 桥墩在车辆偏心撞击下的响应特性

2.1 正/偏心撞击过程

碰撞过程通常可划分为第一阶段（保险杠接触）、第二阶段（发动机接触）与第三阶段（货物接触）三个阶段^[5, 8]。为阐释撞击力时程特征, 现先对上述三阶段的碰撞过程进行说明。偏心撞击机理以及方向设置如图 9 所示, 偏心方向为 y 轴负方向; 偏心程度 $e=A/L \times 100\%$, 其中 A 为偏心距离, L 为半车宽。图 10 展示了车辆以 100 km/h 撞击时, 在三个阶段内与桥墩的相互作用形态。为便于对比, 选取 $e=0\%$ (正面中心撞击) 及 $e=30\%$ 、 60% (偏心撞击) 三种工况, 对车辆—桥墩在三阶段内的相互作用进行展示。由于桥墩整体刚度显著高于车辆驾驶室, 碰撞后驾驶室发生明显压溃变形 (见图 10 (a))。偏心 30% 撞击时 (见图 10 (b)), 圆墩曲面几何使车辆前部接触过程中产生明显横向偏转, 车辆运动轨迹呈沿墩身绕行趋势。随着偏心程度增加, 这种趋势更加明显。同时, 随着偏心程度的增加, $e=30\%$ 时, 发动机与桥墩接触面积减小 (见图 10 (b)), 60% 偏心时, 发动机不再直接撞击桥墩, 而是以擦碰的形式损伤桥墩 (见图 10 (c))。

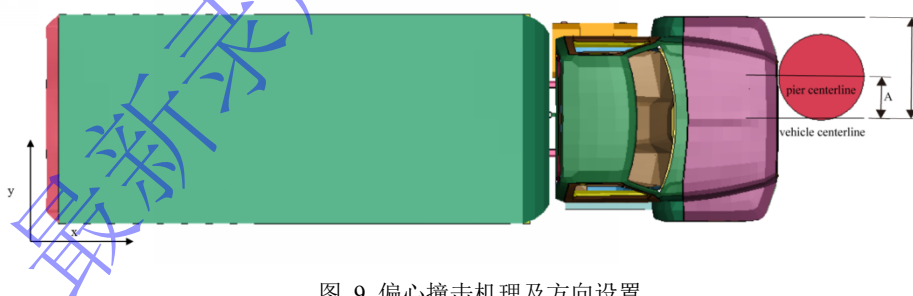
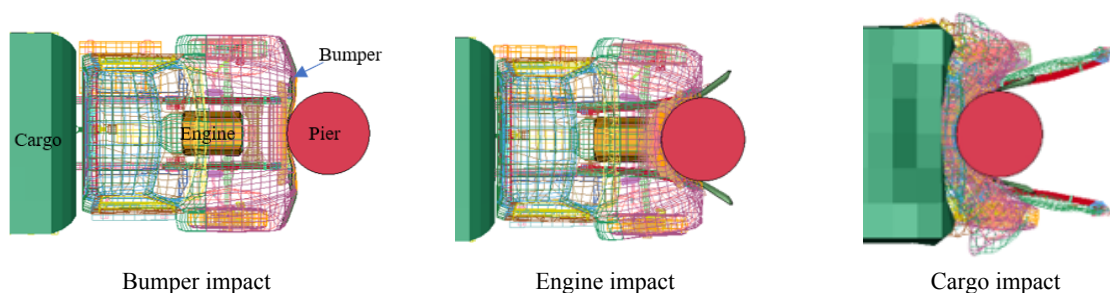


图 9 偏心撞击机理及方向设置

Fig. 9 Mechanism of eccentric impact and definition of impact directions



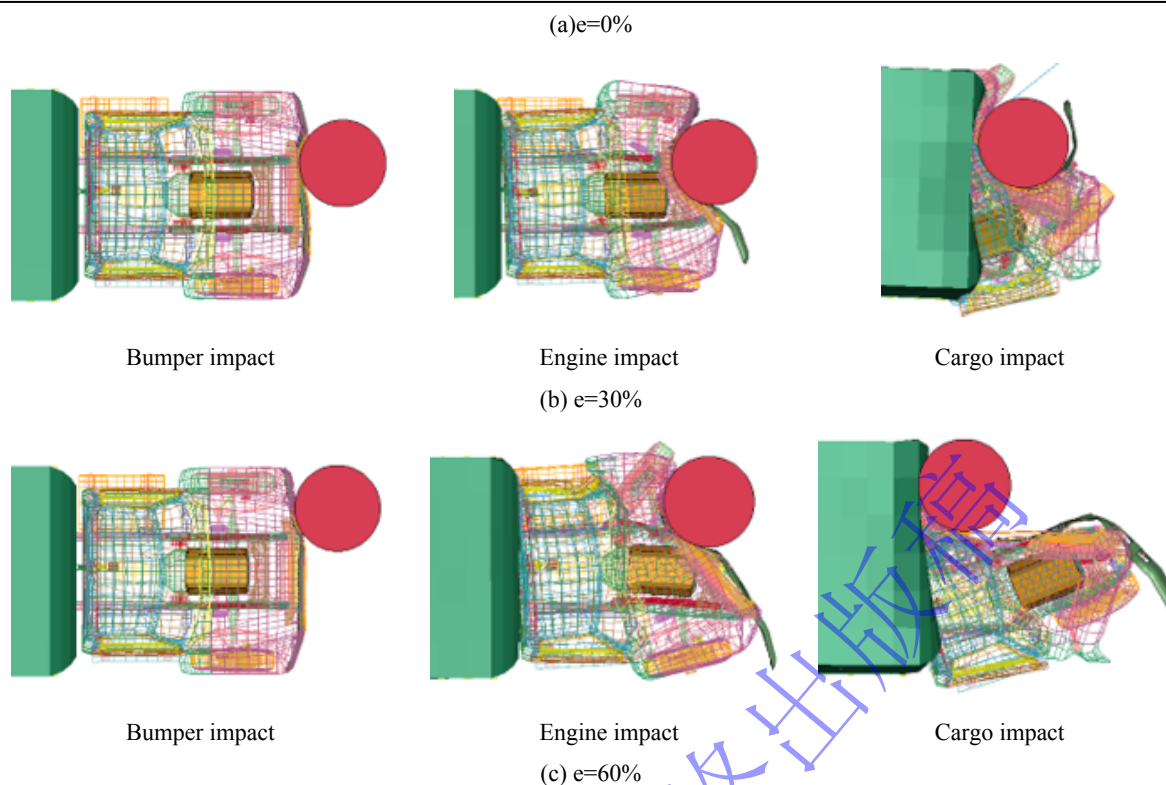


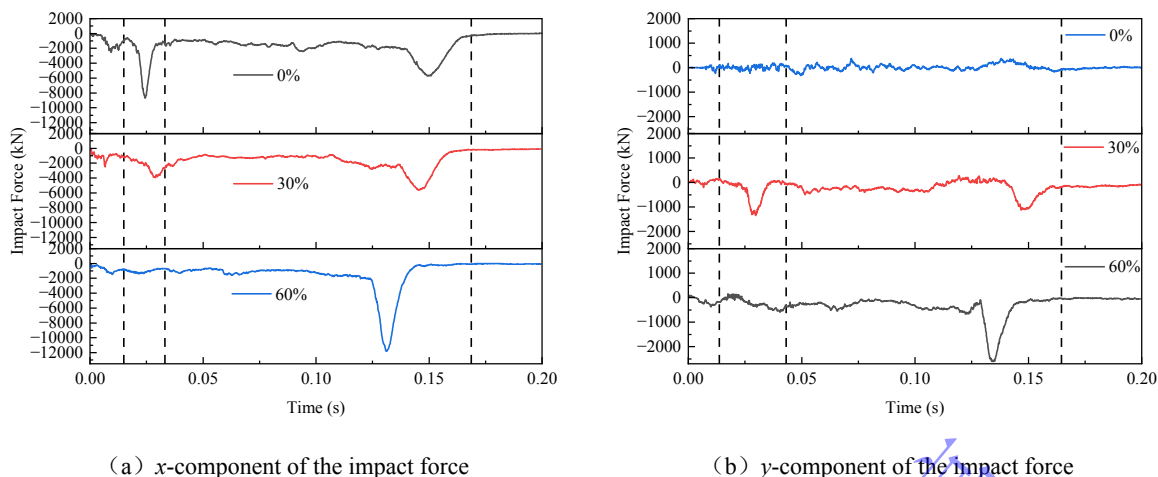
图 10 卡车与桥墩在不同撞击阶段的相互作用

Fig. 10 Interaction between the truck and the bridge pier at different impact stages

2.2 撞击力

图 9 定义了沿撞击方向 (x 向) 与垂直撞击方向 (y 向), 图 11 展示了在受车辆撞击时, 桥墩在 x 方向 (沿撞击方向) 和 y 方向 (垂直撞击方向) 上的受力情况。由 x 向的撞击力时间历史图 11(a) 可知: (1) 在 $e=0\%$ 与 $e=30\%$ 工况下, 均可识别保险杠、发动机与货物三个阶段的典型峰值; 而在 $e=60\%$ 工况下, 由于发动机与桥墩接触由直接撞击转为刮蹭, x 向响应呈以货物阶段为主的单峰特征。(2) 随偏心程度增大, 发动机撞击发生时间整体后移, 而货物撞击时间提前。(3) 偏心撞击导致车辆与桥墩有效接触面积减小, 保险杠与发动机阶段峰值显著降低; 货物阶段峰值在部分工况下可能高于正面撞击, 这与前部缓冲构件参与程度降低有关。总体而言, 从碰撞开始至货物接触前, 正面撞击的 x 向撞击力通常高于偏心撞击, 因而更易促使桥墩在货物阶段到来前发生刚度衰减; 相应地, 货物阶段峰值在正面撞击下反而可能较低。

图 11 (b) 为 y 向的撞击力时程曲线, 结果表明车辆前部的巨大变形使得前部部件 (如保险杠和驾驶室) 在与桥墩接触后沿桥墩表面向两侧滑移 (正面撞击) 或沿桥墩表面偏转并绕行 (偏心撞击), 从而产生与 y 向的撞击分力。 y 向的峰值撞击力远低于 x 向的峰值, 这表明无论偏心距离如何, 撞击力在 x 向上的分量始终占主导。由于卡车模型的复杂性, 在撞击过程中, 桥墩两侧的撞击力会不断变化, 当汽车正面撞击时, y 向的撞击力会发生振荡, 而不会产生明显峰值。偏心撞击时, 保险杠与桥墩的初始接触较为均匀, 左右受力差异不明显, 因此这一阶段在 y 方向上通常不会出现显著的撞击力峰值, 撞击力峰值主要发生在发动机和货物碰撞阶段。本文后续章节也以第二阶段 (发动机撞击), 第三阶段 (货物撞击) 的峰值撞击力为主。



(a) x-component of the impact force

(b) y-component of the impact force

图 11 撞击力时程曲线

Fig. 11 Impact force-time-history curve

2.3 桥墩损伤分析

图 12 对比了不同偏心程度下车辆撞击桥墩的典型损伤形态，采用有效塑性应变云图表征桥墩的损伤演化规律，本文所述桥墩混凝土损伤并非采用单一损伤因子变量进行定义，而是基于材料模型输出的有效塑性应变对损伤演化进行表征。颜色由蓝到红表示有效塑性应变逐渐增大，反映混凝土非弹性变形及损伤累积程度不断加剧。为保证不同工况下损伤分布结果的可比性，本文统一将云图比例尺设为 0~0.9，以较清晰地展示严重损伤区域的范围。为便于描述裂缝与损伤分布，从沿 x 轴观察 (x 向视图) /沿 y 轴观察 (y 向视图) 两种视图展示损伤情况，正面撞击时，桥墩损伤 y 向视图沿构件轴线呈近似对称分布，由 x 向视图可见，整体响应以面内弯曲为主；损伤主要集中在柱底剪切裂缝及柱背侧弯曲裂缝的形成与扩展。偏心程度为 30% 时，桥墩整体损伤较正撞有所减轻，背侧仅出现轻微弯曲裂缝，且裂缝影响范围明显缩小，表明中等偏心可在一定程度上削弱局部冲击效应并降低损伤集中程度。偏心程度增至 60% 后，结构响应仍以整体弯曲为主，但裂缝形态趋于扩展延伸，中部弯曲损伤加剧，同时柱顶弯曲裂缝进一步加剧。其原因在于，随着偏心程度增大至 60%，发动机已不再与桥墩发生直接接触，车辆前部沿圆形墩身表面绕柱偏转的趋势显著增强，货物以更高的剩余动能撞击桥墩，从而对桥墩造成更严重的损伤。

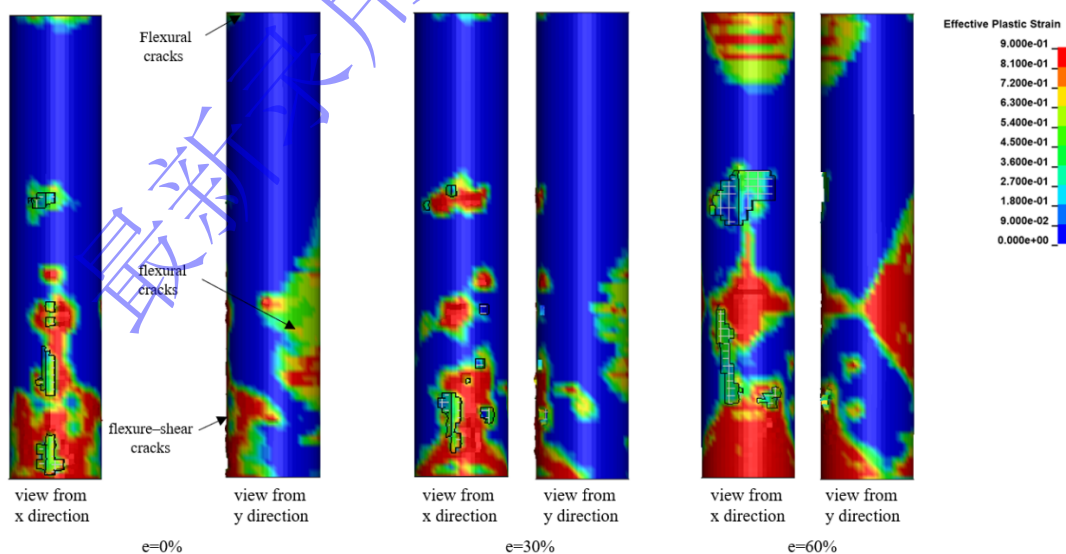


图 12 不同偏心程度下桥墩的损伤特性

Fig. 12 Damage characteristics of the bridge pier under different eccentricities

2.4 桥墩内力分析

为了分析车辆撞击桥墩引起的内力响应差异，沿桥墩高度方向每间隔 0.5m 选取一个截面（共 11 个截面），对各截面的剪力与弯矩进行对比。具体而言，提取每个截面剪力与弯矩的最大值和最小值作为对比指标，用于不同工况下内力响应的比较分析。本文内力分析主要对比 $e=0\%$ 与 $e=30\%$ 两种工况。这是因为两者均具有较完整的保险杠、发动机和货物三阶段碰撞过程，传力路径和受力特征具有较好的可比性。当偏心程度增大至 $e=60\%$ 时，发动机已不再直接参与撞击，碰撞过程转变为以货物撞击为主，其机理明显不同。基于可比性考虑，本文内力分析以及之后的位移分析重点讨论 $e=0\%$ 与 $e=30\%$ 工况。

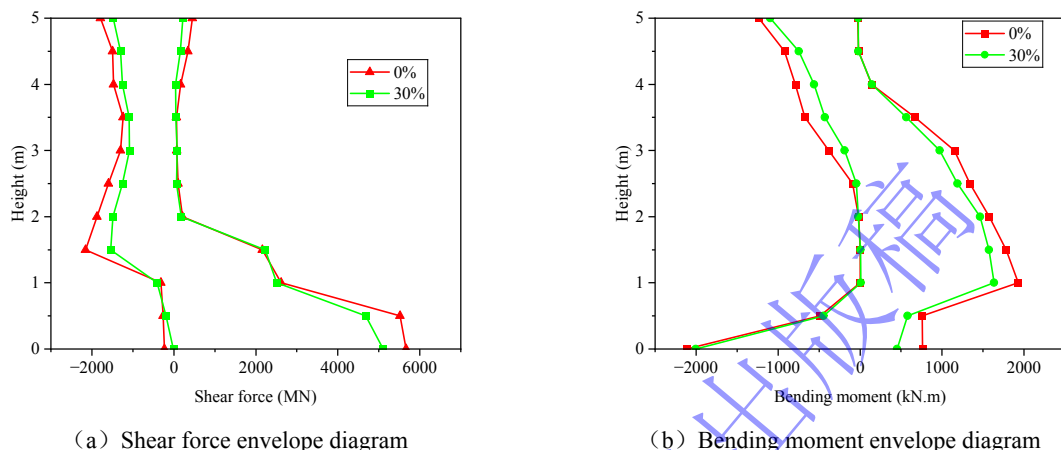


图 13 不同偏心程度下桥墩剪力与弯矩包络图

Fig. 13 Shear force and bending moment envelope diagrams for different eccentricities

如图 13 (a)所示，正面撞击工况下，正剪力在墩底截面达到峰值 5670 kN，随后沿高度迅速衰减，在 2.5–3.5 m 范围内已降至 100 kN；负剪力则在 1.5 m 高度处达到极值 -2160 kN。相比之下，偏心 30% 撞击时，剪力沿高度的变化趋势与正面撞击基本一致，但整体水平有所减小：墩底正剪力峰值降至 5110 kN，1.5 m 处的负剪力极值减小至 -1540 kN，同时上部正剪力的回升也不如正面撞击明显。这表明中等偏心并未改变剪力控制截面的高度位置，但会降低关键截面的剪力需求，并使剪力沿高度的分布更趋缓和。

如图 13 (b)所示，正面撞击下，墩底截面负弯矩达到峰值 -2120 kN·m，随后随高度快速衰减并在 1.0 m 高度附近接近零；正弯矩包络在中下部显著增加并在 1.0 m 处达到峰值 1930 kN·m，之后随高度逐步减小并在上部趋近于零。偏心撞击下，弯矩沿高度的分布形态与正面撞击基本一致，但总体幅值有所降低：墩底负弯矩峰值降至 -2000 kN·m，中下部正弯矩峰值降至 1630 kN·m，表明中等偏心并未改变各截面弯矩变化趋势，但可在一定程度上降低关键截面的弯矩需求。

2.5 桥墩位移分析

沿桥墩高度方向以 0.25 m 为间隔，在撞击面背面中心线处提取节点，并分析其沿 x 与 y 方向的位移分布。峰值位移长期出现在距地面约 1.5–2.5 m 的高度区间。由于基础的约束作用，墩底位移响应被显著抑制。而墩顶位移的增长相对滞后，其幅值亦受到边界条件的限制。

图 14 (a) 展示了桥墩受车辆正面撞击的正向位移 (x 向位移)，在保险杠撞击阶段 (0–18 ms)，各高度处位移均较小，最大位移出现在柱高 2 m 位置，最大值为 0.3 mm，表明该阶段对桥墩整体弯曲变形的作用有限。进入发动机撞击阶段初期 (25–30 ms) 后，位移迅速增大，并在柱高约 1 m 附近形成明显极值，30 ms 时峰值为 2.8 mm。随后在发动机撞击阶段末期 (50 ms)，该极值减小至 2.0 mm，说明随着撞击力衰减，桥墩出现一定程度的弹性恢复。在货物撞击阶段初期 (100–140 ms)，各高度位移曲线基本重合，桥墩响应进入相对稳定阶段。进入货物撞击 (150–200 ms) 后，最大位移位置上移至柱高约 2 m 处，且达到全程最大值 4.5 mm。撞击结束后，位移峰值有所回落，但桥墩中部 (1–2 m) 仍保留 1.5–1.7 mm 的残余位移，上部 (3–5 m) 维持在 0.9–1.3 mm，表明结构已产生一定塑性变形，难以完全恢复至初始状态。

偏心撞击工况下桥墩正向位移 (x 向位移) 的发展过程与正面撞击相同，如图 14 (b) 所示，

发动机撞击下在撞击点附近产生大量位移，发动机撞击后期位移的衰减以及墩顶的位移响应与正面撞击趋势相同。最大位移的发生高度一致，均位于 2 m 高度处，大小 3.4 mm 小于正面撞击的 4.5 mm。残余位移极值为 0.8 mm，同样小于正面撞击的 1.7 mm。

如图 15 所示，偏心撞击工况下桥墩侧向位移（y 向位移）的发展过程与正向位移不同。桥墩侧向响应主要集中在发动机撞击阶段，后期货物撞击阶段并没有进一步放大侧向变形。保险杠撞击阶段，位移几乎为 0，发动机撞击阶段，位移逐步增大，在 1.5–2.5 m 范围内出现相对集中的变形，峰值出现在约 2.0 m 高度处，最大值约为 0.8 mm。后续 50–200 ms 阶段位移趋于稳定，总体处于约 0.2–0.4 mm 的低水平。

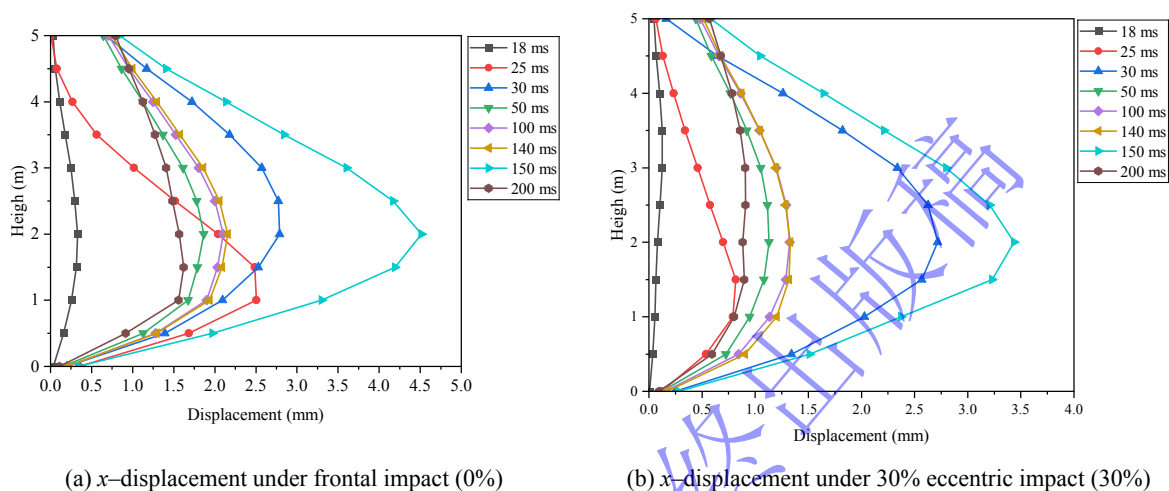


图 14 正撞及 30%偏心撞击下的 x 向位移
Fig. 14 X-direction displacement under central ($e = 0\%$) impact and 30% eccentric impact

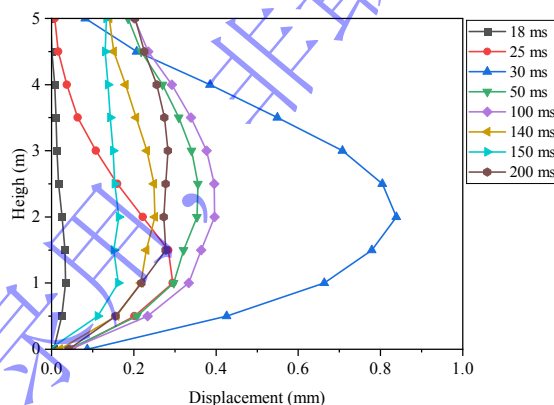


图 15 30%偏心碰撞下的 y 向位移
Fig. 15 Y-direction displacement in the 30% eccentric-impact case

正面撞击与偏心撞击均经历保险杠、发动机和货物主导的阶段作用过程，这说明车辆主要部件依次参与作用仍是控制桥墩响应演化的基本机制。两者的差异在于正面撞击时，撞击力主要沿 x 向传递。偏心撞击时，车辆前部会沿圆形墩身表面滑移、偏转和绕行，使桥墩除承受 x 向主撞击外，还受到 y 向侧向分力作用。30%偏心撞击下部分碰撞能量被车辆前部的滑移、偏转耗散以及转化为 y 方向的横向响应，沿主撞击方向传递到桥墩的有效冲击作用减弱，因此桥墩内力、位移及损伤程度低于正面撞击。当偏心程度进一步增大至 60%时，发动机不再直接参与撞击，更多剩余动能被保留到货物撞击阶段，从而使桥墩损伤更易由局部损伤向整体损伤发展。总体来看，正面撞击与偏心撞击均具有明显的阶段性响应特征，但偏心撞击会使桥墩响应由正向主导逐渐转变为正向与侧向冲击共同作用的复杂动力过程。

3 不同参数对车辆偏心撞击桥墩的影响

3.1 车辆速度

为研究车速对偏心撞击条件下混凝土桥墩损伤模式的影响规律，本文以 $e=30\%$ 偏心撞击为主要研究对象，同时把正面撞击作为对照工况。车速分别取 80、100、120 km/h 三个水平。表 2 和表 3 汇总了两类工况在不同车速下撞击力和位移的峰值响应，x 向三阶段的峰值力用 F1、F2、F3 表示，y 向三阶段的峰值力用 f1、f2、f3 表示；u 为 x 向最大位移，w 为 y 向最大位移；V 为车速，Me 为发动机质量，M 为货物质量，e 为偏心程度，力与位移的正负号仅表示矢量方向，表中出现的负值表示其方向与所定义正向相反，下文讨论以幅值（绝对值）表征大小。

$e=30\%$ 撞击工况下，F2、F3 均随车速的增加而增加，F2 随车速由 80 增加到 120 km/h 依次由 4.34×10^3 kN、 7.39×10^3 kN 增至 1.03×10^4 kN，相较之下，正面撞击对应 F2 由 6.22×10^3 kN 增至 9.62×10^3 kN，其随速度提升的增幅相对较小。在 $e=30\%$ 工况下，F3 随车速增加的总体增幅小于 F2，但在中等车速（100 km/h）已出现明显抬升；此时 $e=30\%$ 工况的 F3 约为正撞工况的 1.70 倍。当车速由 80 km/h 提高至 100 km/h 时， $e=30\%$ 工况的 F3 由 1.66×10^3 kN 显著增至 5.52×10^3 kN；而正撞工况的 F3 仅由 2.48×10^3 kN 增至 3.26×10^3 kN。

相较 x 向响应，y 向动力响应对车速更敏感；f2 随车速升高而增大，且在 $V=120$ km/h 时增幅进一步扩大。f3 在 $V=120$ km/h 时的幅值显著增大，约为 $V=100$ km/h 时的 2.6 倍。这表明随着车速增加，y 向的有效撞击分量显著增强。

峰值力的增大对应更显著的位移响应。桥墩 x 向与 y 向最大位移随车速的变化趋势与峰值力变化基本一致，且在 $V=120$ km/h 时位移增幅尤为显著。x 向位移 u 随车速由 80 km/h 增加到 100 km/h，仅由 1.60 mm 增至 2.69 mm，但当车速增至 120 km/h，u 突增至 33.8 mm。y 向位移 w 同样如此，在车速 120 km/h 时，显著增至 15.6 mm，约为 $V=100$ km/h 时的 20.5 倍。

表 2 沿撞击力方向峰值力与位移

Table 2 Peak force and displacement along the impact force direction

Label	Case	F1/kN	F2/kN	F3/kN	u/mm
V1	V80 - Me0.6 - M5 - e0%	-2133.37	-6216.34	-2478.69	1.64
V2	V100 - Me0.6 - M5 - e0%	-2435.49	-8744.64	-3255.05	3.89
V3	V120 - Me0.6 - M5 - e0%	-2878.10	-9618.50	-19913.10	32.30
V4	V80 - Me0.6 - M5 - e30%	-2375.38	-4341.87	-1662.81	1.60
V5	V100 - Me0.6 - M5 - e30%	-2911.18	-7389.75	-5522.50	2.69
V6	V120 - Me0.6 - M5 - e30%	-2808.04	-10262.60	-14534.90	33.80

表 3 垂直撞击力方向峰值力与位移

Table 3 Peak force and displacement perpendicular to the impact force direction

Label	Case	f1/kN	f2/kN	f3/kN	w/mm
V4	V80 - Me0.6 - M5 - e30%	-28.8457	-1154.63	-366.30	0.44
V5	V100 - Me0.6 - M5 - e30%	-31.6208	-1995.7	-590.84	0.76
V6	V120 - Me0.6 - M5 - e30%	-88.7299	-2614.95	-1534.22	15.60

由图 16 可见，桥墩损伤随车速提高呈非线性增长，且在较高车速（如 120 km/h）下增长更为显著。在 120 km/h 工况下，损伤程度会出现显著增加，受损不再局限于撞击点附近，而是从撞击区域向周边更大面积蔓延，迎撞面（x 向视图）出现大面积混凝土压碎、剥落，同时结构位移显著增大。

对比 $e=30\%$ 与 $e=0\%$ 工况可见：当车速由 80 km/h 提高至 100 km/h 时， $e=30\%$ 工况损伤增长相对较缓；当车速进一步增至 120 km/h 时， $e=30\%$ 工况的损伤增幅反而更为显著。说明在高车速（120 km/h）条件下，偏心效应更易导致不利的整体响应并加速损伤扩展。

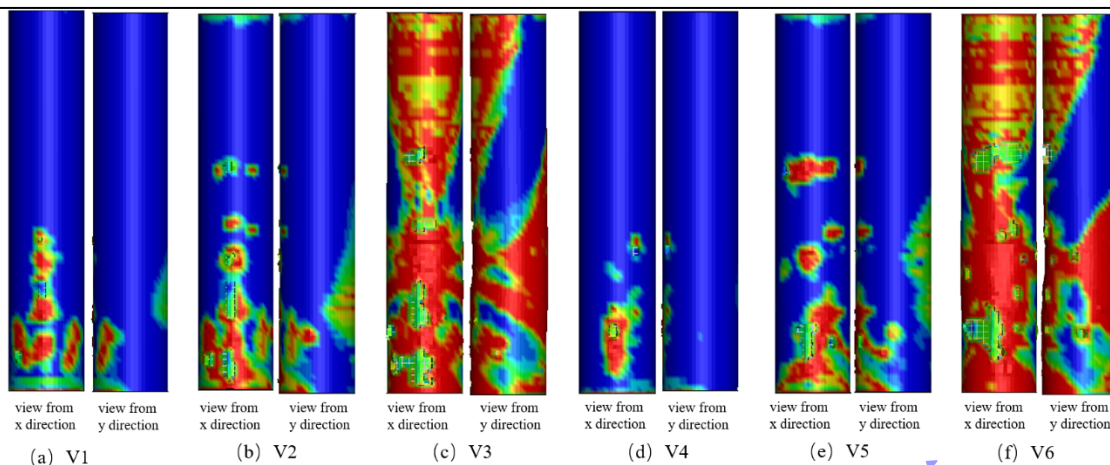


图 16 不同速度下正撞和 30%偏心撞击桥墩损伤情况

Fig. 16 Pier damage under frontal impact and 30% eccentric impact at different velocities

从机理上看, 车速增大不仅提高了车辆的初始动能, 也使车辆前部构件在更短时间内完成与桥墩的接触和压溃过程, 导致桥墩在单位时间内承受更大的动量交换与能量输入, 从而使局部受力增长更快、峰值撞击力更高, 并加速撞击区混凝土压碎及裂缝扩展。对于偏心撞击工况, 随着车速增加, 虽然车辆前部沿桥墩曲面的偏转与滑移现象仍然存在, 但高速条件下车辆前部部件变形更剧烈, 车辆整体惯性作用也更强, 使得桥墩不仅承受更大的法向撞击作用, 同时还受到更明显的横向分力和绕撞效应影响。

3.2 车体质量

为明确质量参数在 $e=30\%$ 偏心撞击条件下对混凝土桥墩损伤模式的影响, 本文设置 $e=0\%$ 正面撞击作为参照工况进行对比评估。表 4 和表 5 汇总了不同质量组合下两类工况的峰值撞击力与最大位移。

从 x 向峰值力看, F_2 与 F_3 分别主要由发动机质量 M_e 与货物质量 M 控制 (对应第二阶段与第三阶段)。随着 M_e 由 0.6 t 增至 1.2 t , 在 30% 偏心工况下, F_2 由 $4.34 \times 10^3\text{ kN}$ 增至 $6.59 \times 10^3\text{ kN}$, 其增幅略小于正面撞击; 与此同时, F_3 无显著变化, 说明提高发动机质量主要增强发动机接触阶段向桥墩传递的冲击强度。相较之下, 货物质量对第三阶段的影响更为突出。当 M 由 5 t 增至 15 t 时, $e=30\%$ 工况下 F_3 由 $1.66 \times 10^3\text{ kN}$ 增至 $1.43 \times 10^4\text{ kN}$ (约 8.6 倍); 正撞工况对应幅值变化约为 6.2 倍。说明在偏心条件下, 货物质量增加对第三阶段冲击峰值的放大效应更为显著。

在 y 向峰值力方面, M_e 增大主要作用于第二阶段, M_e 由 0.6 t 增至 1.2 t 时, f_2 的幅值由 1154.63 kN 增至 1863.60 kN 。相对地, f_3 的幅值由 366.30 kN 下降至 235.16 kN 。说明发动机质量增加显著增强发动机阶段的侧向推挤效应, 但不会同步抬升第三阶段的侧向峰值。货物质量增加则主要抬升第三阶段侧向峰值, 当 M 由 5 t 增至 15 t 时, f_3 的幅值由 366.30 kN 增至 1405.16 kN , 体现出货物阶段侧向作用的显著增强。

30% 偏心工况下发动机质量的增加对正向位移呈降低趋势, 当 $M=5\text{ t}$ 保持不变、 M_e 由 0.6 t 增至 1.2 t 时, x 向最大位移 u 由 1.60 mm 降至 0.90 mm ; 与此同时, y 向最大位移 w 由 0.44 mm 增至 5.24 mm 。该结果表明, M_e 增大更易增强偏心接触引起的侧向响应, 而正向弯曲变形的累积相对减弱。相比之下, 货物质量仍是触发大位移的主导因素, 当 $M_e=0.6\text{ t}$ 不变、 M 由 5 t 增至 15 t 时, 偏心工况下 x 向最大位移由 1.60 mm 增至 28.1 mm , y 向最大位移增至 15 mm , 说明货物质量增加会同时显著抬升 x 向与 y 向变形水平, 并导致大变形的发生。

图 17 的数值结果表明, 在偏心程度 $e=30\%$ 条件下, 质量参数对桥墩损伤演化具有显著影响。发动机质量增加时, 桥墩整体损伤程度随之加重, 主要表现为墩身中部弯曲裂缝分布范围扩大, 同时墩底附近的弯剪裂缝进一步延伸。这一现象说明, 发动机质量增大使发动机撞击阶段传递到桥墩的冲击作用更强, 从而使关键截面的弯曲与剪切受力需求提高。当货物质量提高至 15 t 后, 损伤形态出现明显转变。与轻载工况以局部裂缝逐步扩展为主不同, 重货物条件下墩身中部弯曲裂缝显著

发展，并呈现出更容易连成整体的趋势，表明货物碰撞阶段的冲击作用在后期逐渐占据主导，成为推动损伤进一步扩展的关键因素。与正面中心碰撞（ $e=0\%$ ）对照可见，偏心工况下桥墩总体损伤相对较轻，但损伤分布更不均匀，桥墩在撞击高度附近的裂缝与破坏更集中，局部区域的损伤特征更加突出。

表 4 沿撞击力方向峰值力与位移

Table 4 Peak force and displacement along the impact force direction

Label	Case	F1/kN	F2/kN	F3/kN	u/mm
V1	V80-Me0.6-M5-e0%	-2133.37	-6216.34	-2478.69	1.64
M1	V80-Me1.2-M5-e0%	-2074.24	-9639.42	-2462.33	3.05
M2	V80-Me0.6-M15-e0%	-2118.96	-6031.84	-15254.20	33.70
V4	V80-Me0.6-M5-e30%	-2375.38	-4341.87	-1662.81	1.60
M3	V80-Me1.2-M5-e30%	-2449.42	-6591.56	-1231.15	0.90
M4	V80-Me0.6-M15-e30%	-2436.51	-4288.42	-14308.90	28.10

表 5 垂直撞击力方向峰值力与位移

Table 5 Peak force and displacement perpendicular to the impact force direction

Label	Case	f1/kN	f2/kN	f3/kN	w/mm
V4	V80 - Me0.6 - M5 - e30%	-28.8457	-1154.63	-366.30	0.44
M3	V80 - Me1.2 - M5 - e30%	-122.16	-1863.60	-235.16	5.24
M4	V80 - Me0.6 - M15 - e30%	-9269.47	-1151.85	-1405.16	15.00

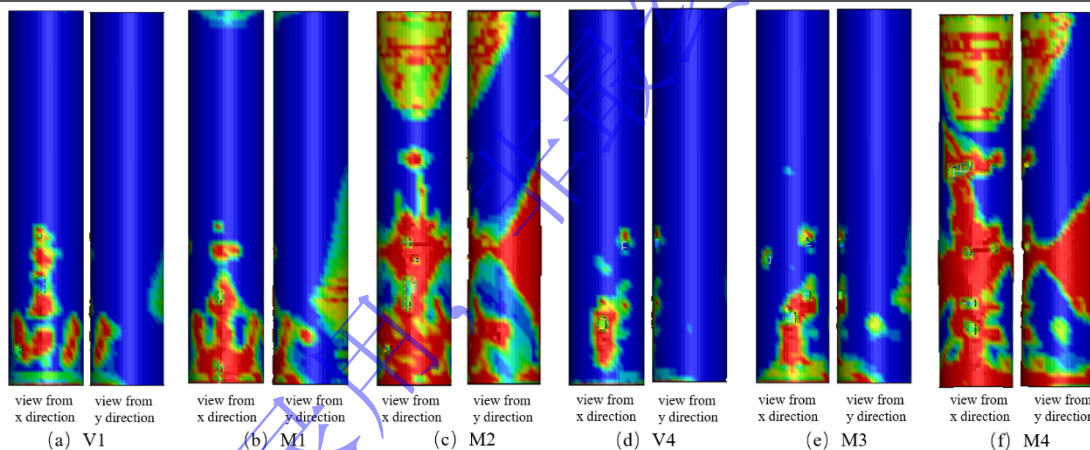


图 17 不同质量下正撞和 30%偏心撞击桥墩损伤情况

Fig. 17 Pier damage under frontal impact and 30% eccentric impact at different masses

从机理上看，车辆质量对桥墩损伤的影响主要通过改变各碰撞阶段的惯性水平和撞击力来实现。发动机质量增加时，发动机阶段传递给桥墩的冲击动量增大，导致该阶段峰值撞击力升高，并强化发动机接触高度附近桥墩截面的局部弯曲与剪切响应，从而促进墩身中部弯曲裂缝及墩底弯剪裂缝的发展。货物质量增加时，车辆前部压溃后货物保留的惯性更强，后期持续推挤和撞击作用更明显；同时，由于货物撞击位置更靠近桥墩中部，桥墩受力范围进一步扩大，结构响应由局部损伤逐渐向整体损伤演化。因此，发动机质量主要影响前期局部冲击损伤，而货物质量则对后期整体损伤扩展起主导作用。

4 结论

基于系统数值模拟，本文研究了圆形桥墩在偏心中心车辆碰撞作用下的动力响应特征，重点分析了偏心程度、车辆速度、车辆质量参数对桥墩撞击力、内力分布、位移响应与损伤模式的影响。主要结论如下：

(1) 偏心程度显著改变车辆—桥墩的接触状态, 其对圆形桥墩撞击响应的影响并非单调减弱, 而表现出先减弱后增强的特征。在本文分析范围内, 当偏心程度增大至 30% 时, 部分能量可通过车辆前部滑移、偏转及绕行等进行耗散, 从而减弱桥墩前中期的局部冲击效应; 而当偏心程度进一步增大至 60% 时, 发动机不再与桥墩发生直接撞击, 碰撞过程转变为货物撞击主导的作用模式, 桥墩损伤反而加重, 甚至超过正面撞击工况。因此, 工程设计中不宜仅将正面撞击视为唯一不利工况, 对存在较大偏撞风险的桥墩, 还应重点校核发动机不与桥墩直接撞击的情形。

(2) 撞击速度是控制桥墩损伤等级和破坏范围的关键参数, 且其影响呈显著非线性增长特征。偏心程度为 30% 的工况下, 当车速由 80 km/h 提高至 120 km/h 时, 高速条件下桥墩响应已由局部损伤主导逐步转向局部压碎、弯曲开裂与剪切损伤耦合发展的整体破坏模式。因此, 在本文参数范围内, 120 km/h 可视为损伤显著加剧的代表性高风险车速, 工程上应将高速撞击工况作为桥墩抗撞设计和防护验算中的重点控制情形。

(3) 车辆质量对桥墩损伤的影响具有明显的分阶段主导特征, 其中发动机质量主要控制中前期局部冲击强度, 货物质量则主导后期持续撞击及整体损伤扩展。偏心程度为 30% 工况下, 发动机质量的增加主要影响发动机接触阶段, 促使桥墩底部局部损伤进一步加剧。而货物质量增加则显著放大后期冲击效应, 并推动桥墩损伤由局部裂缝扩展向整体弯曲破坏演化。因此, 对于重载汽车撞击风险高的桥墩, 不仅在抗撞设计关注质量分布对桥墩损伤的不利影响, 而且在货物质量较大时 (如 15t) 还需考虑添加防护装置来减小不利影响。

参考文献

- [1] Wardhana K, Hadipriono F C. Analysis of Recent Bridge Failures in the United States[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3): 144-150.
- [2] 易仁彦, 周瑞峰, 黄茜. 近 15 年国内桥梁坍塌事故的原因和风险分析[J]. 交通科技, 2015, 23(5): 61-64.
YI R Y, ZHOU R F, HUANG Q. Reason and risk of bridge collapse in recent 15 years[J]. Transportation Science & Technology, 2015, 23(5): 61-64.
- [3] 王娟, 钱江, 周德源. 城市桥梁下部结构抗重型车辆撞击的数值仿真分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 88-95.
WANG J, QIAN J, ZHOU D Y. Numerical simulation of urban bridge substructures impacted by heavy vehicles[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 88-95.
- [4] Do T V, Pham T M, Hao H. Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision[J]. Engineering Structures, 2018, 156: 243-259.
- [5] Do T V, Pham T M, Hao H. Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact[J]. Engineering Structures, 2019, 183: 443-458.
- [6] Chen L, Xiao Y, Xiao G, et al. Test and numerical simulation of truck collision with anti-ram bollards[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 30-39.
- [7] Chen L, Wu H, Fang Q, et al. Full-Scale Experimental Study of a Reinforced Concrete Bridge Pier under Truck Collision[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(8): 05021008.
- [8] Heng K, Chen T, Li R, et al. Dynamic behaviors and equivalent static force of double-column pier under horizontal impact[J]. Structures, 2023, 49: 1093-1111.
- [9] Zhao W, Ye J, Qian J. Dynamic behavior and damage Mechanisms of reinforced concrete piers subjected to truck impact[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105158.
- [10] Buth C E, Brackin M S, Williams W F, et al. Collision loads on bridge piers: phase 2—report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions: FHWA/TX-11/9-4973-2; 9-4973-2[R]. College Station, TX: Texas A&M Transportation Institute, 2011.

- [11] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. 7th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
- [12] Zhou C, Xie Y, Wang W, et al. Machine learning driven post-impact damage state prediction for performance-based crashworthiness design of bridge piers[J]. *Engineering Structures*, 2023, 292: 116539.
- [13] Buth C E, Williams W F, Brackin M S, et al. Analysis of large truck collisions with bridge piers: phase 1—report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions: FHWA/TX-10/9-4973-1; 9-4973-1[R]. College Station, TX: Texas A&M Transportation Institute, 2010.
- [14] Chen X, Agrawal A K, El-Tawil S, et al. Inelastic behavior of a bridge bent subjected to truck impact: Experimental and computational study[J]. *Engineering Structures*, 2019, 199: 109543.
- [15] Chen L, El-Tawil S, Xiao Y. Reduced models for simulating collisions between trucks and bridge piers[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(6): 04016020.
- [16] Chen L, Wu H, Fang Q, et al. Numerical analysis of collision between a tractor-trailer and bridge pier[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2018, 9(4): 484-503.
- [17] Ma H, Cao Z, Shi X, et al. Performance assessment of reinforced concrete columns under vehicle impact load using P-I diagram[J]. *Structural Concrete*, 2020, 21(4): 1625-1643.
- [18] Xue S, Hao H, Hao Y. Numerical investigation of impact response of bridge pier subjected to off-center vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2024, 317: 118624.
- [19] Fu J, Wang W, Wang X, et al. Fragility assessment of RC bridge piers subjected to vehicle collision based on residual load-bearing capacity[J]. *Structures*, 2024, 68: 107103.
- [20] Xue S, Hao H, Hao Y, et al. Experimental and numerical investigations on the impact response of precast segmental bridge piers subjected to soft and hard missile impacts[J]. *Engineering Structures*, 2025, 339: 120602.
- [21] Liu Y, Yang J, Xu G, et al. Performance of UHPC bridge piers subjected to heavy vehicle collisions and probability analysis of damage level[J]. *Structures*, 2023, 47: 212-232.
- [22] Li R W, Wu H, Fang Q, et al. Damage evaluation and performance-based design of double-pier RC bridge subjected to vehicle collision[J]. *Structures*, 2021, 34: 3141-3154.
- [23] Auyeung S, Alipour A, Saini D. Performance-based design of bridge piers under vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 752-765.
- [24] Auyeung S, Alipour A. Evaluation of AASHTO Suggested Design Values for Reinforced Concrete Bridge Piers Under Vehicle Collisions[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2592(1): 1-8.
- [25] Symonds P S. Survey of methods of analysis for plastic deformation of structures under dynamic loading. BU/NSRDC/1-67[R]. Providence, RI: Division of Engineering, Brown University, 1967.
- [26] Sun W, Fan W, Yang C, et al. Lessons learned from vehicle collision accident of Dongguofenli Bridge: FE modeling and analysis[J]. *Engineering Structures*, 2021, 244: 112813.
- [27] Zhou C, Xie Y, Wang W, et al. Performance-based design for improving impact resistance of RC bridge piers with CFRP grid-reinforced ECC[J]. *Engineering Structures*, 2023, 275: 115217.
- [28] Wu M, Jin L, Du X. Dynamic responses and reliability analysis of bridge double-column under vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111035.
- [29] Heng K, Jia P, Xu J, et al. Vehicular impact resistance of highway bridge with seismically-designed UHPC pier[J]. *Engineering Structures*, 2022, 252: 113635.
- [30] Heng K, Li R, Li Z, et al. Dynamic responses of highway bridge subjected to heavy truck impact[J]. *Engineering Structures*, 2021, 232: 111828.

- [31] Fan W, Xu X, Zhang Z, et al. Performance and sensitivity analysis of UHPFRC-strengthened bridge columns subjected to vehicle collisions[J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 251-268.
- [32] Mohan P, Marzougui D, Kan C S. Validation of a single unit truck model for roadside hardware impact: NCAC-2003-W-001[R]. Ashburn: National Crash Analysis Center (NCAC), 2003.
- [33] NTRCI. F800 single unit truck FEM model for crash simulations with LS-DYNA[EB/OL]. 2005[2026-01-21]. Available: <https://thyme.ornl.gov/FHWA/F800WebPage/description/description.html>.
- [34] Abdelkarim O I, ElGawady M A. Performance of bridge piers under vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2017, 140: 337-352.
- [35] Fujikake K, Li B, Soeun S. Impact Response of Reinforced Concrete Beam and Its Analytical Evaluation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(8): 938-950.

Dynamic Response of Circular Bridge Piers Subjected to Eccentric Vehicle Impact

LIU Yunting, ZHANG Jie, LIANG Shaomin, YAN Tao, WANG Zhiyong

(1. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Material Strength and Structural Impact, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: Existing studies have extensively investigated the global dynamic response of bridge piers under vehicle impact; however, most of them focus on frontal collisions, and the pier response under eccentric collisions remains insufficiently clarified. This study conducts a numerical investigation on the dynamic response of a circular bridge pier subjected to eccentric vehicle impact. A finite element model for vehicle-circular pier collision is established and validated. Comparative analyses are performed between eccentric impact cases with different eccentricity levels and the frontal-impact case in terms of failure-mode evolution, impact-force time histories, and key-section displacement responses. In addition, the effects of impact velocity and vehicle mass on the dynamic response under eccentric collision are examined. The results indicate that when the eccentricity is less than 60%, the damage in the impacted region and the bending cracks on the rear face are generally less severe than those under a central frontal collision. As the eccentricity increases such that the engine no longer directly participates in contact, the collision mechanism shifts, and the overall damage level becomes higher than that of the central frontal collision. The velocity effect is non-linear; when the speed increases to 120 km/h, damage is markedly aggravated, accompanied by a significant increase in peak structural displacement. Mass parameters exhibit stage-dependent dominance: the engine mass mainly governs the flexural-shear response during the engine-contact phase, whereas increasing cargo mass substantially amplifies the impact effect in the cargo-contact phase, promoting the pier damage from localized cracking to more extensive flexure-dominated failure.

Keywords: eccentric vehicle impact; circular bridge pier; dynamic response; damage evolution