

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20251118001

文章编号:1674-599X(2026)02-0013-10

引用格式:林上顺,罗鸣睿,郭景阳.外包橡胶混凝土RC构件冲击损伤关键参数分析[J].交通科学与工程,2026,42(2):13-22.

Citation: LIN Shangshun, LUO Mingrui, GUO Jingyang. Key parameters influencing impact damage of RC member encased with rubber concrete [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 13-22.

外包橡胶混凝土RC构件冲击损伤关键参数分析

林上顺¹, 罗鸣睿¹, 郭景阳²

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省交通科研院有限公司, 福建 福州 350004)

摘要:【目的】明确影响外包橡胶混凝土钢筋混凝土(RC)构件冲击损伤的关键参数,揭示各参数对构件动力响应及破坏模式的作用规律。【方法】通过6根外包橡胶混凝土RC构件的落锤冲击试验,获取构件的典型破坏特征;建立有限元模型,分别对轴压比、冲击速度及冲击质量等参数开展对比分析,并根据截面损伤因子划分损伤等级。【结果】轴压比、冲击速度与冲击质量是影响外包橡胶混凝土RC构件冲击损伤的关键因素;较低轴压比可提高构件稳定性,较高轴压比易使构件提前发生剪切破坏;冲击速度提升会引起动能急剧增加,促使构件局部裂缝快速发展为严重损伤;在冲击速度恒定的条件下,落锤质量增大会增强构件的惯性效应,使局部损伤更为集中,并加剧构件整体破坏。【结论】所建立的有限元模型具有较高的计算精度,可用于外包橡胶混凝土RC构件的冲击损伤分析,相关研究成果可为实际工程应用提供参考。

关键词:橡胶混凝土;冲击损伤;损伤因子;落锤试验;关键参数

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Key parameters influencing impact damage of RC member encased with rubber concrete

LIN Shangshun¹, LUO Mingrui¹, GUO Jingyang²

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Province Traffic Academy Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to identify the key parameters influencing the impact damage of reinforced concrete (RC) members encased with rubber concrete, and to clarify the influence of these parameters on the dynamic response and failure modes of the members. [Methods] Drop-weight impact tests were conducted on six RC members encased with rubber concrete to obtain typical damage characteristics. A finite element (FE) model was developed and validated using the experimental results. Parametric analyses were then performed to investigate the effects of axial compression ratio, impact velocity, and impact mass. Damage levels were classified using a section-based damage factor. [Findings] The axial compression ratio, impact velocity, and impact mass were identified as the key factors affecting the impact damage of RC members encased with rubber concrete. A lower axial compression ratio enhances the structural stability, whereas a higher axial compression ratio tends to induce premature shear failure. An increase in impact velocity significantly elevates the kinetic energy, causing localized cracks to rapidly evolve into severe damage. Under a constant impact velocity, an increase in the hammer mass intensifies the inertial effects, leading to more concentrated local damage

收稿日期:2025-11-18

基金项目:福建省交通科技计划项目(AQ202301)

通信作者:林上顺(1972—),男,教授,主要从事桥梁结构工程方面的研究工作。E-mail: 578982122@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

and exacerbated global failure. [Conclusions] The developed FE model demonstrates high computational accuracy and is suitable for analyzing the impact damage behavior of RC members encased with rubber concrete. The findings provide a useful reference for practical engineering applications.

Key words: rubber concrete; impact damage; damage factor; drop-weight test; key parameter

近年来,车辆冲击桥梁桥墩的事故频发。2019年5月,104国道东郭分离桥发生集装箱货车侧撞双柱式钢筋混凝土桥墩事故,导致墩体严重损毁^[1]。同年7月,某高速公路人行天桥桥墩遭渣土车正面撞击,发生剪切破坏并完全丧失竖向承载能力,致使上部结构坠落^[2]。2021年2月,连霍高速与郑州西三环北延线交汇处再次发生货车撞击桥墩事故,撞击后车辆翻覆于路面。此类事故不仅造成了重大经济损失,更暴露出传统钢筋混凝土桥墩在抗冲击性方面存在明显短板。在交通流量与车辆荷载持续增长的背景下,提升桥墩抗冲击能力已刻不容缓。

外包橡胶混凝土正是应对这一挑战的理想防护材料。采用废旧橡胶颗粒部分取代天然骨料后,橡胶混凝土兼具高阻尼、高延性与良好的能量耗散能力。采用橡胶混凝土外包层,不仅能够利用橡胶的弹性有效延长冲击作用持时、降低撞击力峰值,还能通过多裂纹扩展机制耗散冲击能量,有效避免脆性破坏,从根本上提升桥墩的抗冲击韧性与损伤容限,为桥梁结构安全提供可靠保障。

冯明扬等^[3]通过摆锤冲击试验研究发现,尽管橡胶混凝土的抗压强度与弹性模量总体上比普通混凝土的低,但通过对橡胶颗粒的粒径及体积掺量进行优化设计,可在降低冲击力峰值的同时,显著提升构件的耗能能力,实现防撞与吸能的协同作用。王向阳等^[4]采用有限元软件建立了车辆-防撞装置-桥墩碰撞模型,针对单一材料防撞装置存在的固有局限,设计了泡沫铝-橡胶混凝土复合圆筒结构,并通过多工况数值模拟对其防撞性能进行对比分析。结果表明,该复合装置通过刚柔协同作用实现了吸能与变形控制的最优平衡:吸能量接近纯泡沫铝的水平;塑性撞深较纯泡沫铝减小了25%,降至58.6 mm;撞击力折减率稳定在23.6%以上;在高速重载工况下,当橡胶混凝土变形趋近极限时,复合装置仍可持续发挥缓冲吸能作用。

然而,实际工程结构往往处于复杂环境之下。庄金平等^[5]通过动态冲击试验发现,高温(200~

800 °C)与橡胶掺量之间存在耦合效应(与常温下的性能规律相反,高温冷却后构件冲击韧性随橡胶掺量的增加呈下降趋势),据此建立了考虑温度损伤影响的动态增长因子修正公式,研究表明,环境工况是制约橡胶混凝土防护效能的关键边界条件。

但现有研究仍存在明显不足:对构件的破坏现象缺乏系统的定性描述;缺少适用于外包橡胶混凝土RC构件的定量化损伤评价指标;未对不同参数下的损伤等级进行系统划分,导致研究成果难以直接应用于工程设计中。现有研究已充分证实,通过优化橡胶混凝土关键参数可显著提升RC构件的抗冲击性能。

LAN等^[6]通过落锤冲击试验定量分析表明,橡胶颗粒替代细砂存在阈值效应:当替代率为10%时,构件的冲击韧性与能量耗散比达到最优;过量掺入会因强度下降、界面薄弱区域增多而加剧损伤。这说明冲击能量水平与橡胶颗粒掺量的匹配关系直接影响损伤模式的演化过程,但该研究仅开展了单因素试验,难以反映车辆撞击过程中真实存在的多因素耦合作用机制。曹国瑞等^[7]采用三点弯曲梁断裂试验与数字图像相关方法,研究了橡胶混凝土的断裂性能。结果表明:试件的断裂性能随试件尺寸与橡胶掺量的增大而提升,且在橡胶掺量为6%~10%时提升效果最为明显;橡胶的掺入可提升材料延性,但对峰值荷载影响较小;断裂韧性阻力曲线存在明显的尺寸效应,但与橡胶掺量无关,其变化主要由骨料咬合力决定。刘妙燕等^[8]基于声发射技术开展三点弯曲疲劳断裂试验,研究了不同橡胶掺量混凝土在疲劳荷载作用下的损伤及断裂性能。结果表明:断裂性能随橡胶掺量的增加呈线性增长;裂缝长度与损伤变量呈倒“S”形变化,与声发射累积能量呈正“S”形变化;裂缝均在荷载水平较低时萌生并扩展;当橡胶掺量为10%和20%时,试件疲劳寿命分别为普通混凝土的20倍和54倍,但离散性显著增大。

为系统揭示外包橡胶混凝土RC构件的冲击损

伤响应关键参数及其耦合作用机制,本文首先设计并开展考虑冲击速度、冲击质量、轴压比等多因素耦合的落锤冲击试验,获取试件裂缝扩展模式及破坏过程的数据;然后通过试验验证有限元模型的可靠性,在此基础上采用ANSYS/LS-DYNA软件建立三维精细化非线性有限元模型,以截面损伤因子为核心损伤表征指标,系统分析上述关键参数对损伤演化规律的敏感性;最后基于数值模拟结果的参数化统计与回归分析,定量表征各关键参数对构件损伤等级的贡献程度,明确影响外包橡胶混凝土RC构件冲击损伤特性的关键参数。

1 落锤冲击试验

1.1 试验设计

本次共设计制作了6根外包橡胶混凝土RC试件,试件采用核-壳复合结构:内核为C50普通混凝土,外包层为橡胶混凝土。外包橡胶混凝土原材料组成为:胶凝材料为强度等级42.5的普通硅酸盐水泥;粗骨料为公称粒径5~10 mm的连续级配碎石;细骨料为细度模数2.6~2.8的河砂,最大粒径不大于2.5 mm;橡胶颗粒由40目与60目废旧轮胎胶粉按质量比2:1配制,采用等体积方式替代细骨料,体积替代率为10%。搅拌过程中掺加0.8%聚羧酸高性能减水剂改善拌合物工作性能,并掺入适量有机硅消泡剂抑制气孔缺陷。所有原材料性能均满足《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310—2019)^[9]的相关要求。

为更贴合工程实际受力状态,本研究将构件长度取为2 000 mm,并在试件设计阶段综合考虑橡胶颗粒配合比等多种因素的影响。具体试件设计参数见表1。表1中, B 为外包橡胶混凝土层半径, b 为外包橡胶混凝土RC构件核心混凝土层半径。

表1 试件参数设计

Table 1 Design parameters of members

试件编号	B/cm	b/cm	橡胶颗粒掺量/%
RC11	16	11	0
CRC10-10	16	10	10
CRC11-10	16	11	10
CRC11-5	16	11	5
CRC11-15	16	11	15
CRC12-10	16	12	10

1.2 试验方案及装置

本研究的落锤冲击试验在福建省土木工程新技术与信息化重点实验室完成,采用超高重型落锤试验机进行加载,装置布置如图1所示。该装置通过双侧竖向导轨对落锤运动轨迹进行精准限位,确保冲击点始终作用于试件跨中的截面。落锤主体集成圆形锤头、可调式配重模块与高频测力传感器三大核心部件。锤头直径为110 mm,冲击接触面积为94.98 cm²,通过增减配重块可实现230~880 kg的无级调载。单个配重块质量为50 kg,共配置13个,可满足外包橡胶混凝土RC构件在不同冲击能量等级下的动力响应测试要求。

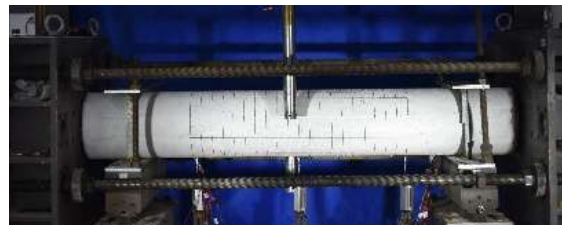


图1 超高重型落锤试验系统

Fig. 1 Ultra-high-capacity drop-weight test system

美国国家仪器(NI)数据采集系统可自动采集冲击过程中的各项试验数据,并将其转换为电信号后自动存储。本试验通过触发装置确保图像采集与数据采集同步进行;采用高速相机记录整个冲击过程;使用北京智博联科技股份有限公司生产的ZBL-F800裂缝综合测试仪测量裂缝宽度。

1.3 试验流程

具体试验流程为:

1) 将试件放置于承台中央,利用刻有中心坐标的定位基准或十字线板逐点调整试件位置,确保试件纵向中心线与落锤中心的偏差不大于2 mm。试验采用一端固结、一端铰接的支撑形式,并设置接触限位块。位移传感器布置于预定冲击面或承台下方,按规定力矩拧紧螺栓进行安装,以保证传感器接触刚度一致。

2) 调整导轨系统后,将落锤提升至2 m的设计高度;采用激光测距仪或刻度标尺进行校核,确保高度误差不超过2 mm。

3) 试验前设置采样频率、触发时间与触发方式,确保数据记录时长覆盖整个冲击过程;调整高速摄像机位置,确保冲击过程记录的有效性。

1.4 试验结果

在冲击速度6.3 m/s、落锤质量230 kg工况下,

外包橡胶混凝土 RC 试件呈现出典型的延性破坏模式,试件 CRC11-10 破坏形态如图 2 所示。



图2 试件 CRC11-10 破坏形态

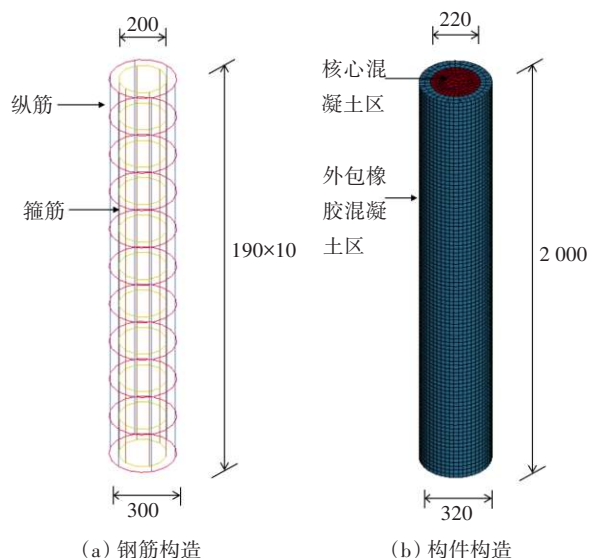
Fig. 2 Failure mode of CRC11-10

由图 2 可知,在试件冲击面形成了直径约为 15 cm 的环形弹塑性压痕区;外包层未发生贯穿性崩裂,仅出现 3~5 条放射状微裂纹,最大裂缝宽度为 0.18 mm;核心混凝土保持完整,无压溃与剥落现象;橡胶混凝土外包层借助橡胶颗粒的桥接效应,可有效抑制裂缝贯通,使试件的破坏形态由脆性破坏向弯剪混合型破坏转变。

2 有限元模型的建立

2.1 材料

本研究基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,构建了外包橡胶混凝土 RC 构件在冲击荷载作用下的数值仿真模型,相关参数取值参照《混凝土结构设计标准》(GB 50010—2010)^[10]。试件 CRC11-10 构造图如图 3 所示。



(a) 钢筋构造

(b) 构件构造

图3 试件 CRC11-10 构造图(单位:mm)

Fig. 3 Structure of CRC11-10 (unit:mm)

本研究对 RC 构件及其外包覆层进行了有限元网格划分。混凝土采用 ANSYS/LS-DYNA 内置的 CSCM_Concrete 本构模型予以表征^[11],该模型可精准描述低围压下混凝土的应变率强化、刚度退化与

应变软化等力学行为,并通过标量损伤参数量化混凝土单元的损伤程度。

橡胶混凝土的单轴抗压强度为 38.6 MPa,最大骨料粒径为 25 mm,其余参数采用 ANSYS/LS-DYNA 的默认值。钢筋选用塑性随动强化模型,弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.3,屈服应力为 400 MPa,应变率参数为 40,切线模量为 2 000 MPa,失效应变为 0.15。

采用 Cowper-Symonds 模型^[12]考虑材料的应变率效应,屈服强度 σ_y 为:

$$\sigma_y = (1 + \frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{P}} \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 、 P 为与应变率相关的材料参数。

为满足实际试验条件,通过调整落锤材料密度使其总质量达到 230 kg,并将落锤提升高度设定为 2 m。

2.2 落锤冲击荷载

本研究采用钢制圆柱形锤头施加冲击荷载。在 ANSYS/LS-DYNA 中,将落锤定义为 RIGID 刚体模型,其质量为 230 kg,弹性模量为 20.5 GPa,泊松比为 0.3。对锤头几何模型进行网格划分,单元特征尺寸为 40 mm。加载方式设定如图 4 所示:从试件中心正上方 2.0 m 高度处自由释放。通过 LOAD_BODY_X 关键字施加重力加速度,并采用 DEFINE_CURVE 关键字定义恒定时程曲线,以实现锤头的自由落体运动。

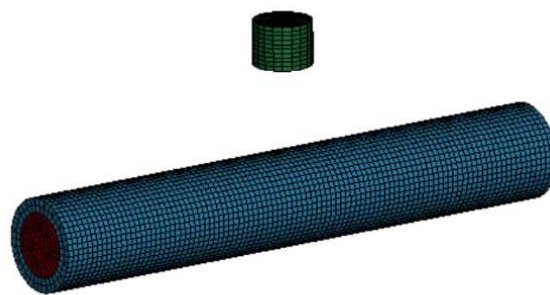


图4 构件有限元模型网格划分

Fig. 4 Finite element model meshing of members

2.3 接触与约束

钢筋与混凝土之间的黏结行为采用流固耦合方法进行模拟,通过对二者节点施加速度及加速度约束,保证了变形协调性^[13],从而提高了模型构建效率。除已约束界面外,所有潜在接触区域均定义

为 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 接触,其关键控制参数为静摩擦系数^[14]。其中,外包橡胶混凝土层与核心钢筋混凝土层之间的静摩擦系数取 0.5,落锤与构件之间的静摩擦系数取 0.2;核心钢筋混凝土与外包橡胶混凝土则采用 TIED_SURFACE_TO_SURFACE 接触算法实现完全绑定。

2.4 数值模拟方法的验证

试件 CRC11-10 侧面损伤分布的模拟结果与试验结果如图 5 所示。裂缝演化采用受拉损伤因子进行表征。由图 5 可知,冲击区域损伤程度较高,竖向裂缝发育明显,数值模拟结果与试验结果的损伤特征整体上吻合较好。

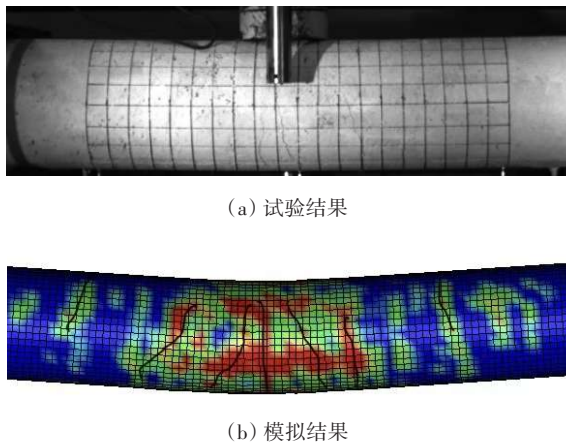


图 5 冲击后构件损伤分布对比

Fig. 5 Damage distribution in members after impact

图 6 进一步对比了落锤碰撞力时程曲线的试验与模拟结果,二者整体上吻合较好。尽管时程曲线在全过程中存在一定偏差,但碰撞力峰值的模拟值与试验值偏差均未超过 10%。结果表明,本文针对外包橡胶混凝土 RC 构件冲击响应所采用的数值模拟方法及参数设置是合理的。

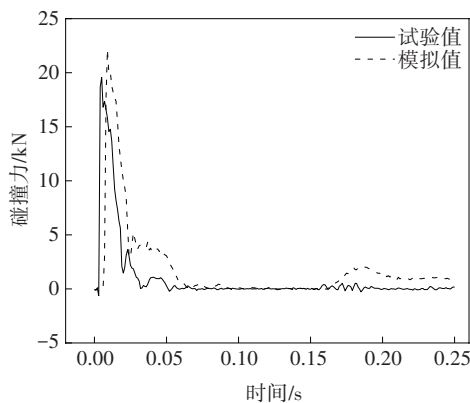


图 6 碰撞力试验与模拟结果对比

Fig. 6 Results of impact force experiments and simulations

3 冲击损伤评价方法

3.1 冲击损伤分析

为明确构件损伤特征,预先通过数值模拟对冲击质量与冲击速度进行标定;再结合试验设备条件,采用 230 kg 落锤以 6.3 m/s 的初速度开展冲击试验。图 7 给出了试件 CRC11-10 随时间 t 的损伤演化过程:初始时刻($t=0$ ms),碰撞点受惯性效应影响损伤显著,跨中与固定端支座处仅表面出现轻微损伤,边界效应不明显;随后($t=6$ ms),损伤由碰撞点向柱体内部纵深发展;至 12 ms 时,损伤程度进一步加剧,但横向扩展范围有限;24 ms 时,损伤趋于稳定,有限元模拟结果与试验结果基本吻合。

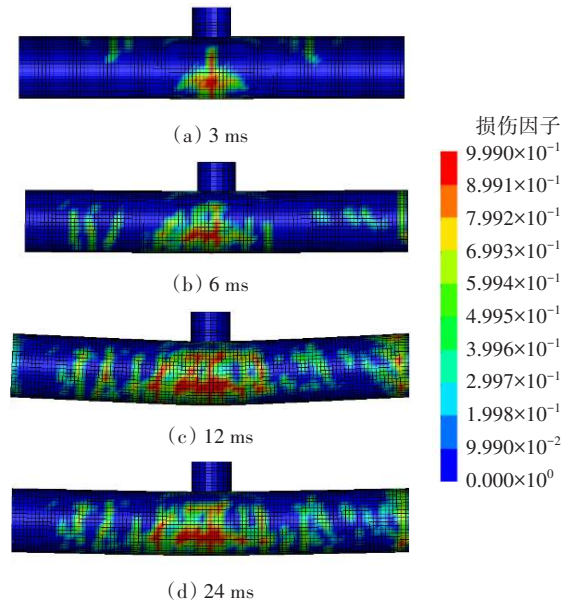


图 7 试件 CRC11-10 有限元损伤云图

Fig. 7 Damage contours obtained from finite element analysis of CRC11-10

3.2 损伤因子的选取方法

构件在冲击作用下,局部能量发生瞬态集聚,易诱发局部损伤破坏,进而影响构件整体稳定性^[15]。为定量评估其损伤破坏程度,本文采用赵武超等^[16]提出的截面损伤因子(取同一截面内单元损伤因子 d 的平均值),以反映冲击作用空间集中、时间短促的特点。基于截面损伤因子的损伤评估等级见表 2。

$$d_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d \quad (2)$$

式中: d_s 为截面损伤因子; n 为截面的单元数目。

表2 损伤评估等级

Table 2 Classification of damage levels

损伤程度	轻度损伤	中度损伤	重度损伤	构件失效
截面损伤因子	0 ~ <0.3	0.3 ~ <0.6	0.6 ~ <0.9	0.9 ~ 1.0

为量化损伤演化过程,将冲击响应划分为四个阶段:峰值段(0 ~ <3 ms)、振荡段(3 ~ <12 ms)、平台段(12 ~ <24 ms)及衰减段(24 ms以后)。图8给出了墩柱截面损伤因子沿高度方向的时程分布。由图8可知:初始接触阶段损伤主要集中于撞击点区域,并随应力波的传播逐步向柱端扩展;最终截面损伤因子峰值达到0.595,对应中度破坏等级。在12 ms时,撞击区损伤因子趋于极值,表明墩柱损伤主要形成于首个冲击力峰值时段。

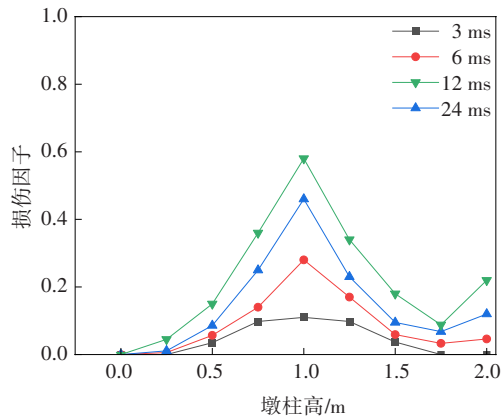


图8 截面损伤因子分布

Fig. 8 Distribution of sectional damage factors

综上,截面损伤因子可有效表征RC墩柱的冲击损伤演化规律。田力等^[17]提出的评估准则包含双重约束:既能反映外包橡胶混凝土RC墩柱整体上的受力性能,又能保证所选取的性能指标具备现场实测的可行性与便捷性。

4 冲击荷载下参数影响分析

为系统研究外包橡胶混凝土RC构件的冲击力学特性,本文以试件CRC11-10为基准开展参数化分析,共设置9组工况,重点考察轴压比、冲击速度、冲击质量等关键参数对构件动力响应及损伤演化规律的影响。

4.1 同等落锤质量、冲击速度下不同轴力墩柱的冲击响应分析

图9给出了外包橡胶混凝土RC墩柱在不同轴压比下承受相同冲击作用时的损伤云图。结果表

明:轴压比为0.10时,墩柱破坏程度最轻;当轴压比提高至0.20时,在冲击点下方墩柱出现明显剪切损伤并发展为压碎破坏,跨中挠度亦随之增大;随着轴压比增大,损伤分布逐渐向冲击区域局部演化,使该区域剪切破坏敏感性提高;墩柱失效模式也随轴压比升高,由跨中弯剪破坏向冲击点下方的剪切破坏转变。本文计算结果与刘飞等^[18]的结论存在差异,主要原因是冲击体刚度(本文采用刚性锤体)与试件几何尺寸不同。

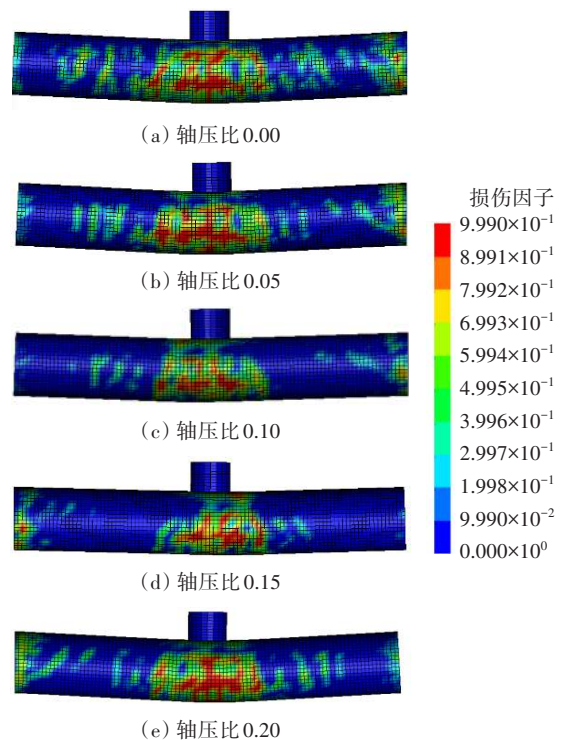


图9 不同轴压比下的损伤云图

Fig. 9 Damage contours at different axial compression ratios

RC墩柱设计参数及破坏情况见表3。由表3可知,峰值冲击力随轴压比增大而逐渐增大,冲击点最大位移则呈先减小后增大的趋势;轴压比对冲击效应与能量耗散的影响相对有限。研究表明,轴压比较低时,轴向压力对墩柱抗冲击性能有积极作用,但随着轴压比持续增大,构件抗冲击能力逐渐降低。数值分析结果显示,轴向压力的正效应阈值约为0.10,远低于普通RC构件静力抗剪承载力正效应的上限。

4.2 同等落锤质量、冲击速度下有无外包橡胶混凝土层墩柱的冲击响应分析

图10为有无外包橡胶混凝土RC试件的损伤云图。由图10可知,外包橡胶混凝土使结构的冲击行为发生了根本性转变:无外包层试件呈现出脆性剪

表 3 RC 墩柱设计参数及破坏情况

Table 3 Design parameters and failure of RC columns

试件编号	落锤冲击速度/(m·s ⁻¹)	落锤质量/kg	初始动能/J	轴压比/%	碰撞点最大位移/mm	碰撞力峰值/kN	截面损伤因子	构件破坏情况
RC1	6.3	230	4 176	10	74.2	677	0.432	中度损伤
CRC1	6.3	230	4 176	0	74.2	677	0.395	中度损伤
CRC2	6.3	230	4 176	5	72.5	683	0.324	中度损伤
CRC3	6.3	230	4 176	10	68.8	686	0.293	轻度损伤
CRC4	6.3	230	4 176	15	73.1	688	0.337	中度损伤
CRC5	6.3	230	4 176	20	76.3	693	0.403	中度损伤
CRC6	10.8	230	12 247	10	155.6	823	0.077	重度损伤
CRC7	14.0	230	20 580	10		1 032	0.931	结构失效
CRC8	6.3	280	5 601	10	126.5	764	0.668	重度损伤
CRC9	6.3	350	7 102	10		926	0.904	结构失效

切贯通破坏,损伤因子峰值达 0.432,裂纹直接侵入核心混凝土,导致钢筋屈曲;而有外包层试件的损伤仅局限于浅表层,损伤因子降至 0.293,破坏模式转变为延性弯剪混合破坏。

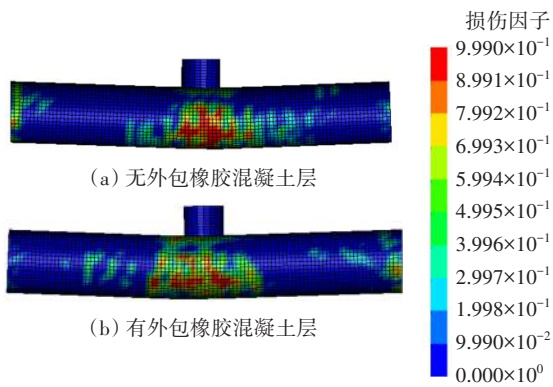


图 10 RC 试件损伤云图

Fig. 10 Damage contours of RC members

墩身加速度如图 11 所示。由图 11 可知,橡胶混凝土外包层通过刚度梯度效应,使墩身加速度峰值降低了 14.3%、冲击脉冲持时延长了 36%,有效重构了能量耗散路径。这表明,橡胶混凝土外包层并非单纯提升结构抗力,而是通过多相材料协同作用,将冲击行为由“脆性失效”导向“韧性可控”,进而实现了现代桥墩防护工程中保护桥墩与车辆的设计目标。

4.3 同等落锤质量、不同冲击速度下墩柱响应分析

橡胶混凝土墩柱在不同落锤冲击速度下的损伤云图如图 12 所示。结合图 12 与表 3 可知,当冲击速度由 6.3 m/s 递增至 14.0 m/s 时,构件损伤程度呈递增趋势。其中,在落锤质量 230 kg、冲击速度 14 m/s 工况下,墩柱跨中出现贯通剪切裂缝,纵向主筋屈曲外露,核心混凝土压溃脱落,损伤因子达 0.931。

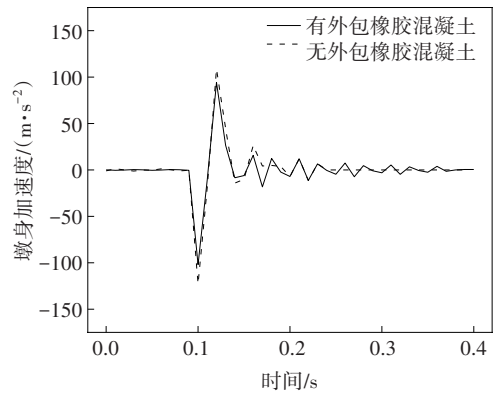


图 11 墩身加速度

Fig. 11 Pier acceleration

由上述试验结果可知,随着冲击速度与落锤质量的增大,冲击动能呈平方量级增长,导致构件损伤由可修复的弯曲裂缝逐步演变为不可修复的剪切-压溃复合破坏,损伤等级也由轻微破坏发展至严重破坏,这充分验证了冲击能量对构件破坏演化路径的决定性影响。

图 12 揭示了墩柱的三种损伤等级:图 12(a)中,构件整体变形微弱,损伤仅局限于冲击点及端部区域;图 12(b)中,构件为中度损伤状态,发生侧向位移,冲击点与两端的损伤显著加剧;图 12(c)中,试件为破坏失效状态,柱体呈现明显“V”形变位,冲击区域混凝土严重开裂,承载力完全丧失。

不同冲击速度下外包橡胶混凝土 RC 墩身加速度时程响应如图 13 所示。由图 13 可知,随着冲击速度由 6.3 m/s 增至 14.0 m/s,外包橡胶混凝土 RC 墩身损伤因子持续上升,但破坏模式始终为延性弯剪混合破坏。原因在于:冲击速度增大致使应变率效应显著增强;橡胶颗粒的黏弹性松弛时间无法适配荷载作用时长,最终使墩身加速度峰值分别提高了

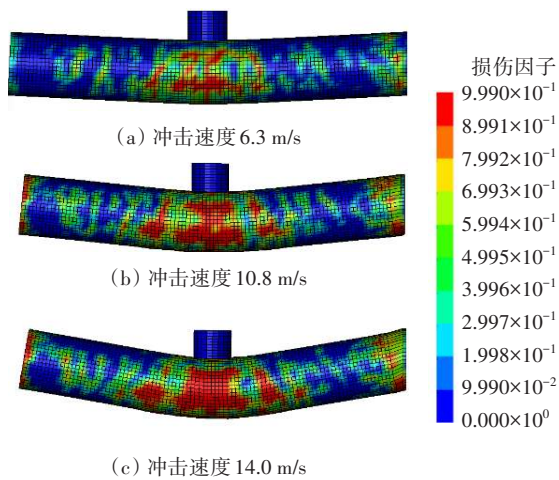


图12 不同冲击速度下墩柱损伤云图

Fig. 12 Damage contours of columns at different impact velocities

27.7%与48.6%;外包橡胶混凝土RC墩身通过裂纹分岔机制将能量分散至更大体积的混凝土中,避免构件出现单一剪切带贯通破坏。同时,冲击动能剧增使构件惯性效应增强、材料应变率效应加剧,接触刚度增大导致冲击脉冲宽度变窄。高速冲击下,截面损伤因子达0.931,混凝土压溃与钢筋屈曲导致刚度急剧退化,引发剧烈振荡响应,最终实现从可修复弯曲破坏到剪切-压溃复合失效的模式转变,但外包橡胶混凝土RC墩身在高速重载下仍具备良好的损伤可控性。

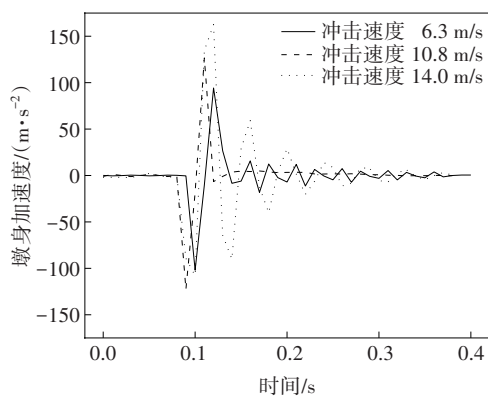


图13 不同冲击速度下墩身加速度

Fig. 13 Acceleration response of piers at different impact velocities

4.4 不同落锤质量、同等冲击速度下墩柱响应分析

不同落锤质量、同等冲击速度下墩柱损伤云图如图14所示。由图14可知,在冲击速度保持6.3 m/s的条件下,试验分别选取230、280、350 kg的落锤质量进行落锤冲击试验,计算得到对应的冲击能量分别为4 170、5 601、7 102 J。

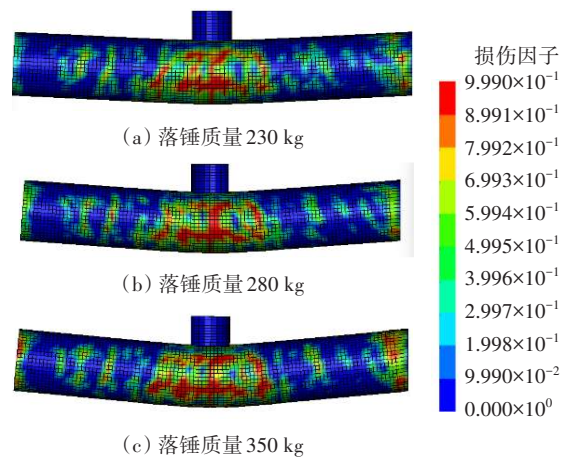


图14 不同落锤质量下墩柱损伤云图

Fig. 14 Damage contours of columns at different impact masses

不同落锤质量下墩身加速度时程响应如图15所示。由图15可知,随着落锤质量从230 kg增至350 kg,墩身加速度峰值分别提高了19.1%与38.3%。其机理在于:落锤质量的增加使冲击能量提升,而橡胶混凝土外包层通过橡胶颗粒的摩擦滑移与压碎区的密实化作用,将冲击能量分散。落锤质量的提升显著增加了冲击动量,并强化了构件的惯性效应,而在高能量输入下橡胶混凝土的耗能能力不足以完全消散冲击能量,进而导致局部损伤集中与动力响应放大^[19]。该现象表明,橡胶混凝土外包层具备良好的质量缓冲效应,其防护性能随落锤质量增大而显著提升,可适用于重载车辆防撞防护场景。

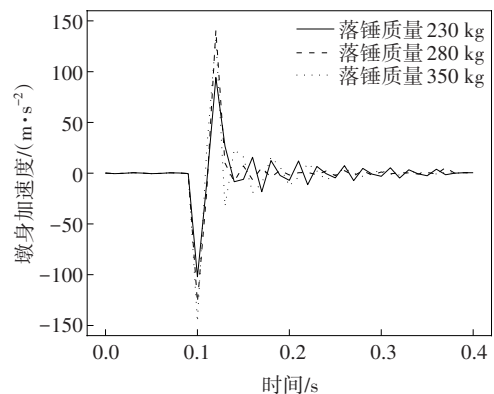


图15 不同落锤质量下墩身加速度

Fig. 15 Acceleration of piers at different impact masses

5 结论

1) 轴压比对外包橡胶混凝土RC构件的抗冲击性能具有明显的双重效应。轴压比处于较低水平,

可增强构件的整体稳定性并减轻其损伤;但当轴压比增大后,构件的损伤开始在冲击区域集中,破坏模式由弯剪破坏逐渐过渡为以剪切-压溃为主的脆性破坏,抗撞性能也随之显著降低。这说明轴向压力存在一定的有利范围,一旦超过该界限,便会促使构件剪切破坏提前发生。

2) 冲击速度是影响外包橡胶混凝土RC构件冲击损伤的最敏感参数。随着冲击速度的提高,冲击动能加速增长,这不仅使构件的加速度反应更为剧烈,还使冲击持续时间缩短,进而导致损伤迅速扩展。此时,橡胶混凝土的耗能能力难以及时消耗高速冲击带来的能量输入,构件破坏易由轻微损伤逐步发展为严重的剪切破坏甚至整体失效。因此,高速冲击成为决定构件损伤等级的主导因素。

3) 在冲击速度保持不变的情况下,落锤质量的增加主要表现为增强构件的惯性响应。落锤质量越大,构件的加速度峰值越高,冲击过程也更为急促,局部区域的损伤则更趋集中。而峰值冲击力受落锤质量变化的影响相对有限。较大的落锤质量进一步提高了冲击能量输入,使构件位移增大、损伤加剧,甚至可能导致构件失稳失效。因此,质量参数对构件损伤程度的影响,主要体现在惯性效应的强化和总能量输入能力的提升上。

参考文献(References):

- [1] SUN W B, FAN W, YANG C C, et al. Lessons learned from vehicle collision accident of Dongguofenli Bridge: FE modeling and analysis [J]. *Engineering Structures*, 2021, 244: 112813. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112813.
- [2] 何水涛, 陆新征, 卢啸, 等. 超高车辆撞击钢桥上部结构模型试验研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(5): 31-35. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.05.022.
- HE Shuitao, LU Xinzhen, LU Xiao, et al. Tests for collision between over-high trucks and steel bridge superstructures [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(5): 31-35. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.05.022.
- [3] 冯明扬, 刘保东, 张敏强, 等. 外包橡胶混凝土覆层对梁式桥墩防撞性能影响的试验研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(2): 269-274. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.02.038.
- FENG Mingyang, LIU Baodong, ZHANG Minqiang, et al. Experimental study on the anti-collision performance of beam bridge piers with wrapped crumb rubber concrete layers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(2): 269-274. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.02.038.
- [4] 王向阳, 张林凯. 实心圆柱桥墩防撞装置的防撞性能对比分析[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(4): 63-73. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.04.007.
- WANG Xiangyang, ZHANG Linkai. Comparative analysis on performance of solid cylinder pier anti-collision devices [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(4): 63-73. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.04.007.
- [5] 庄金平, 任凯, 许可, 等. 高温后钢纤维橡胶自密实混凝土动态冲击性能[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(20): 19-29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.20.003.
- ZHUANG Jinping, REN Kai, XU Ke, et al. Dynamic impact performance of steel fiber rubber self-compacting concrete after high temperature [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(20): 19-29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.20.003.
- [6] LAN S, LIU F, YANG F, et al. Dynamic compressive and splitting tensile characteristics of rubber-modified non-autoclaved concrete pipe piles [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 69: 106292. DOI: 10.1016/j.job.2023.106292.
- [7] 曹国瑞, 王娟, 卿龙邦, 等. 橡胶混凝土断裂性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(6): 91-97. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.013.
- CAO Guorui, WANG Juan, QING Longbang, et al. Experimental study on the fracture characteristics of crumb rubber concrete [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2018, 40(6): 91-97. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.013.
- [8] 刘妙燕, 陆俊, 明攀, 等. 疲劳荷载对橡胶混凝土损伤和断裂性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(5): 1594-1603. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200723.004.
- LIU Miaoyan, LU Jun, MING Pan, et al. Effect of fatigue load on damage and fracture properties of rubber concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(5): 1594-1603. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200723.004.
- [9] 交通运输部. 公路工程混凝土结构耐久性设计规范: JTG/T 3310—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for durability design of concrete structures in highway engineering: JTG/T 3310—2019 [S]. Beijing: People's Transportation Press, 2019.
- [10] 住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] JONES N. *Structural impact* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

- [12] MURRAY Y D. User manual for LS-DYNA concrete material model [R]. McLean: Federal Highway Administration, 2007.
- [13] 马海英, 邱媛, 夏焯, 等. 预制墩柱撞击性能与破坏机理研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(4): 1027-1034. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2025.04.011.
MA Haiying, QIU Yuan, XIA Ye, et al. Performance and failure mechanism of prefabricated columns under impact effect [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(4): 1027-1034. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2025.04.011.
- [14] 潘泓杉. 预制拼装墩柱承台UHPC连接节点抗震性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2022.
PAN Hongshan. Experimental study on seismic performance of UHPC connection joints between prefabricated assembled pier columns and caps [D]. Shanghai: Tongji University, 2022.
- [15] THILAKARATHNA H M I. Vulnerability assessment of reinforced concrete columns subjected to vehicular impacts [D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 2010.
- [16] 赵武超, 钱江. 侧向冲击荷载下钢筋混凝土墩柱的性能[J]. 工程科学学报, 2019, 41(3): 408-415. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.015.
ZHAO Wuchao, QIAN Jiang. Performance of reinforced concrete pier columns subjected to lateral impact [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(3): 408-415. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.015.
- [17] 田力, 朱聪. 碰撞冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的损伤评估及防护技术[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 144-150, 157.
TIAN Li, ZHU Cong. Damage evaluation and protection technique of RC columns under impulsive load [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 144-150, 157.
- [18] 刘飞, 罗旗帜, 严波, 等. RC柱侧向冲击破坏模式的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 122-127. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.16.019.
LIU Fei, LUO Qizhi, YAN Bo, et al. Numerical study on the failure mode of RC column subjected to lateral impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 122-127. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.16.019.
- [19] MURALI G. A comprehensive review of drop weight impact testing [J]. Seminars in Arthritis and Rheumatism, 2014, 353361. DOI: 10.1016/j.2024.109934.

(责任编辑:熊怡;校对:石月珍)