

柔性撞击下RC柱动态剪切响应的有限元分析

陶贞¹, 谢献忠¹, 冯非凡^{1,2*}

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²湖南科大工程检测有限公司, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月26日

摘要

本文采用三维有限元分析方法, 对柔性撞击下钢筋混凝土柱的动态剪切响应以及损伤破坏模式进行了研究。通过建立柔性撞击下钢筋混凝土柱的精细化有限元模型, 研究了冲击体刚度以及冲击速度两个关键参数对钢筋混凝土柱动态剪切响应和损伤机理的影响规律。结果表明: 冲击体刚度将显著影响钢筋混凝土柱的动态响应以及损伤模式, 在撞击过程中柔性冲击体通过自身变形消耗了部分初始动能, 因此减小了钢筋混凝土柱在局部响应阶段发生冲切破坏以及整体响应阶段发生剪切破坏的概率; 当冲击体刚度保持不变时, 冲击速度的提高将加剧钢筋混凝土柱的损伤; 在高速撞击作用下, 存在使得钢筋混凝土柱的破坏模式从冲切破坏转变为剪切破坏的临界刚度, 并且对应破坏模式转变的临界刚度随着冲击速度的提高而降低。

关键词

柔性撞击, 钢筋混凝土柱, 冲击体刚度, 动态响应, 有限元分析

Finite Element Analysis of Dynamic Shear Response of RC Columns under Soft Impact

Zhen Tao¹, Xianzhong Xie¹, Feifan Feng^{1,2*}

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan University of Science and Technology Engineering Testing Co., Ltd., Xiangtan Hunan

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 26, 2026

Abstract

The dynamic shear response and damage failure mode of reinforced concrete (RC) columns under soft impact are investigated through three-dimensional finite element analysis method in this study.

*通讯作者。

By establishing a refined finite element model of RC columns under soft impact, the influence laws of two key parameters, namely the stiffness of the impactor and the impact velocity, on the dynamic shear response and damage mechanism of RC columns are studied. The results show that the stiffness of the impactor significantly affects the dynamic response and damage mode of RC columns. During the impact process, the soft impactor consumes part of the initial kinetic energy through its own deformation, thereby reducing the probability of punching shear failure in local response stage and the shear failure in overall response stage of RC columns. When the stiffness of the impactor remains unchanged, the increase in impact velocity will exacerbate the damage of RC columns. Under high-speed impact, there exists a critical stiffness that causes the failure mode of RC columns to change from shear failure to punching shear failure, and the corresponding critical stiffness decreases with the increase of impact velocity.

Keywords

Soft Impact, RC Column, Impactor Stiffness, Dynamic Response, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在交通基础设施与建筑工程领域,钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)柱作为核心承重构件,频繁面临车辆撞击、落石冲击等荷载。此类冲击事件易引发柱体剪切破坏、承载力下降,甚至导致结构整体坍塌,造成严重的生命财产损失与社会经济影响。特别是当落石、车辆等冲击作用靠近柱端位置时,剪切效应显著增强,其破坏机制更为复杂,对结构整体安全起着决定性作用。

早期针对 RC 构件冲击响应的研究,多聚焦于侧向冲击作用下的力学机制与承载力特性,研究者通过试验与有限元模拟相结合的方式,明确了剪切破坏机制、提出了冲击荷载模型与承载力计算公式,并开展了可靠性分析等相关研究工作[1]-[3]。

相较于早期研究,近年来 RC 构件冲击后的残余性能与损伤评估逐渐成为研究热点。部分学者通过建立耦合分析模型或显式有限元模型,经试验验证后系统分析了关键参数对构件性能的影响,定义了损伤评价指标或损伤因子,进而建立了残余承载力预测模型与损伤评估方法[4][5]。同时,也有学者围绕 RC 构件侧向冲击下的响应特性展开探究,通过改变冲击能量、速度等关键变量,结合试验或有限元模拟手段,分析构件水平位移、力学行为及静动态响应差异,深入揭示了冲击作用下 RC 柱的损伤机制[6]-[8]。在抗冲击性能增强方面,Zhou 等[9]通过试验与有限元模拟验证了 CFRP 格栅增强 ECC 复合材料提升 RC 柱抗冲击性能的可行性,为 RC 构件抗冲击优化设计提供了新思路。

针对 RC 柱及桥梁墩柱冲击场景的防护措施与效果验证,相关研究已积累一定成果。Xie 等[10]通过数值模拟探究金属泡沫对 RC 方柱的防护作用,Liu 等[11]开展 FRP 包裹 RC 柱抗车辆撞击试验,张于晔等[12]通过试验与数值模拟分析泡沫铝防撞装置的防撞性能,上述研究均证实此类防护形式能够有效吸收冲击能量、削弱撞击力,进而减轻构件损伤程度。在柔性冲击下的损伤量化与响应规律研究方面 Vepsä 等[13]通过试验分析倾斜柔性冲击对 RC 板弯曲损伤的影响,Zhao 等[14][15]、Zhong 等[16]则通过建立精细化有限元模型,定义损伤因子或量化评估框架,系统探究冲击体刚度等关键参数的影响机制,明确了柔性冲击与刚性冲击在动力响应上的本质差异,并建立了相应的损伤分级标准与快速评估方法。关于

柔性冲击相关的参数分析, 陈林等[17]聚焦边界条件、箍筋直径对 RC 桥墩动力响应及损伤特征的影响, 明确了墩柱惯性力的抵抗作用; 赵武超等[18]则重点分析碰撞刚度对墩柱损伤程度的影响规律。潘政华等[19]在相关综述研究中指出, RC 结构在柔性冲击作用下会呈现特定破坏模式, 而现行规范采用的等效静力法, 难以适配柔性冲击场景的多样性与复杂性, 这也凸显了开展柔性冲击下 RC 柱动态响应专项研究的必要性。

尽管目前在 RC 构件冲击响应、防护措施及损伤评估等方面已开展了大量研究, 但与刚性冲击研究相比, 柔性冲击下 RC 柱的动态剪切响应分析仍存在明显不足。现有研究尚未充分揭示柔性冲击与刚性冲击力学行为等效的关键参数, 对撞击刚度、冲击速度耦合作用下柱体损伤模式转换机理的研究不够深入, 且关于不同工况下柱体由斜向剪切破坏向冲切破坏转变的内在机制仍需进一步明确。鉴于冲击问题本身的复杂性与随机性, 有必要开展针对性研究以弥补上述研究空白。

本文聚焦柔性撞击作用下 RC 柱的动态剪切响应问题, 基于 LS-DYNA 软件建立含单自由度柔性撞击体的精细化有限元模型。通过系统的参数化分析, 明确柔性冲击与刚性冲击力学行为等效的弹簧刚度值; 深入探究撞击刚度、冲击速度对 RC 柱损伤模式、冲击力时程曲线、位移时程曲线以及动剪力峰值的影响规律; 阐明不同工况下柱体破坏模式转换的机理, 揭示柔性冲击下 RC 柱的动态剪切受力本质, 为工程实践中该类核心承重构件的抗冲击设计提供技术参考。

2. 试验概况

为了研究近地端侧向冲击下钢筋混凝土柱的承载能力, 之前对六个 1/4 比例的方形钢筋混凝土柱进行了摆锤冲击试验[20]。所有试件的几何尺寸为 200 mm × 200 mm × 1000 mm。根据钢筋配置的不同, 试件分为三类: 标准试件(C1、C4、C5 和 C6)、纵向钢筋直径减小的试件(C2)和不配置箍筋的试件(C3)。试验中的研究参数包括撞击速度和撞击高度(剪跨比)。表 1 给出了试件的设计细节和加载条件。试验装置由三部分组成, 分别为加载系统、固定系统和支撑系统。加载系统由一个反力架和一个摆锤组成, 用来施加冲击载荷。固定系统包括一个钢制基座和一个夹具, 用于将试件固定。支撑系统由地面、混凝土块和反力墙组成。

Table 1. Design and loading conditions of specimens

表 1. 试件设计和加载条件

试件	直径/mm		箍筋间距/ mm	冲击高度/ mm	摆锤提升角 度/°	冲击速度/ (m·s ⁻¹)	冲击能量/ kJ
	纵筋	箍筋					
C1	16	6	100	250	90	6.92	7.53
C2	10	6	100	250	90	6.92	7.53
C3	16	/	/	250	90	6.92	7.53
C4	16	6	100	350	60	4.90	3.78
C4R*	16	6	100	350	60+90	6.92	7.53
C5	16	6	100	350	75	5.68	5.07
C6	16	6	100	350	90	6.92	7.53

*注: C4 试件的损伤很小, 因此再次以 90°的摆锤提升角度撞击(即试件 C4R)。

试验结果表明: 控制试件 C1 经历了对角剪切破坏, 并有一定程度的弯曲破坏。当纵向钢筋的直径减小时, C2 试件的纵向钢筋在试验过程中在受拉侧发生了断裂, 导致上部柱沿着柱底部的受压区发生了明显转动。没有配置箍筋的试件 C3 发生了严重的斜向剪切破坏, 剪跨区的保护层混凝土严重剥落。当冲击

高度变为 350 mm 时, 试件 C6 产生了更多的弯曲损伤, 在冲击后受压侧的混凝土被压碎。此外, 随着冲击能量的增加, 相关试件的损伤也越大。无论钢筋配置如何, 试件的峰值冲击力在相同的冲击速度下非常接近。另一方面, 随着冲击速度的增加峰值冲击力也显著增加。有关试验的更多详细信息可参见 Chen 等人的文章[20]。

3. 有限元模型

3.1. 摆锤撞击有限元模型

为平衡计算精度与效率, 依据各构件受力特点选取单元类型并优化网格。摆锤、地面、夹具、混凝土垫块及试件混凝土等实体构件采用 SOLID164 单点积分实体单元, 可有效模拟冲击下的大变形与断裂行为; 纵筋与箍筋选用 BEAM161 梁单元以精准表征其拉弯屈服特性; 锚固螺栓采用桁架单元模拟轴向拉力。试件混凝土采用 12.5 mm 网格尺寸, 锤头顶板为 10 mm 网格尺寸; 地面、夹具采用 25 mm 网格, 摆锤其余部件采用 20 mm 网格, 以此兼顾计算效率与精度, 有限元模型如图 1(a)所示。

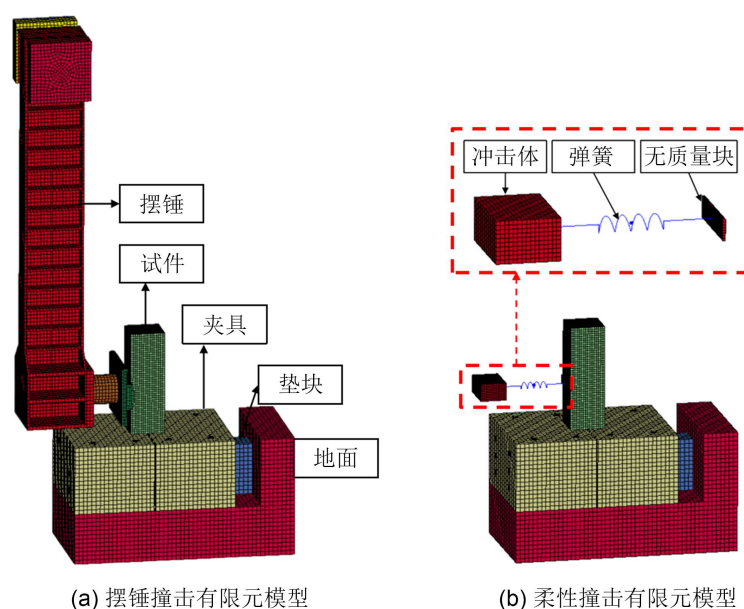


Figure 1. Finite element model of impact test
图 1. 撞击试验有限元模型

混凝土采用 Mat_159 (CSCM) 材料模型, 该模型适用于低速冲击分析, 可考虑应变率强化、刚度退化及损伤演化, 通过 *MAT_CSCM_CONCRETE 关键字定义, 输入混凝土圆柱体抗压强度(FPC)、最大骨料粒径(DAGG)及密度(RO)后, 程序自动生成其余参数, 并设置单元侵蚀与损伤控制参数。钢筋采用 MAT_PLASTIC_KNEMATIC 材料模型, 考虑各项同性与随动强化, 结合 Cowper-Symonds 模型($C = 40.4$, $P = 5.0$)表征应变率效应, 纵筋与箍筋按其力学性能设置弹性模量、屈服强度及硬化模量。摆锤、地面、夹具及螺栓因刚度大、变形小, 采用 MAT_ELASTIC 线弹性材料模型; 混凝土垫块等效弹性模量校准为 1000 MPa, 确保约束效果与试验一致。

边界约束方面, 通过 CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE 定义摆锤旋转轴, 约束其仅能发生转动; 地面采用 BOUNDARY_SPC_SET 施加全约束; 通过 *INITIAL_BEAM_STRESS 为横向与竖向螺杆施加预紧力, 模拟试件固定条件。接触关系上, 钢筋与混凝土采用共节点连接, 忽略粘结滑移; 锤头顶板与试

件、试件与夹具等接触面采用 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE，静、动摩擦系数取为 0.3；通过 CONTACT_AUTOMATIC_BEAMS_TO_SURFACE 考虑锤头对钢筋笼的冲击；夹具与垫块通过*CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE 实现绑定接触。关于摆锤撞击有限元模型的验证，请参见作者前期的文章[1]。

3.2. 柔性撞击有限元模型的建立

3.2.1. 单自由度柔性撞击体的建立

基于前期刚性冲击工况中已验证的混凝土动态本构模型、应变率效应表征方法、接触定义规则及建模技术，本文建立了横向柔性冲击作用下 RC 柱的有限元分析模型，如图 1(b)所示。模型中冲击体与无质量块均采用 Solid164 实体单元，该单元适用于模拟大变形与高速冲击问题，可有效捕捉接触界面的非线性响应；弹簧特性则由 Discrete 离散单元实现，通过定义线性刚度参数来表征柔性撞击器的变形行为。试件的边界条件与摆锤冲击试验一致。鉴于冲击作用机理涉及接触非线性行为、材料应变率效应及结构能量耗散等复杂物理过程，撞击器刚度与初始冲击动能的差异，会直接导致钢筋混凝土构件的动力响应规律产生显著差异。为简化分析流程，本研究采用单自由度模型对柔性撞击器进行等效模拟，通过对比刚性冲击工况下的冲击能量[21]来确定柔性撞击体的质量参数，实现两种工况下冲击能量完全一致；具体建模中，先构建尺寸为长 212.5 mm、宽 6.25 mm、高 50 mm 的刚性无质量接触面作为撞击器与 RC 柱的接触界面，其材料模型选用 MAT_020 (MAT_RIGID)；同时采用材料模型为 MAT_S01 (MAT_SPRING_ELASTIC) 的线性弹簧单元表征撞击器刚度特性以反映弹性变形特征；柔性撞击体也采用刚性材料模型 MAT_020。本研究通过能量等效原则，确保柔性冲击与摆锤刚性冲击工况的力学效应具备可比性，为后续精准探究不同撞击体刚度、不同冲击速度下 RC 柱的损伤模式转化、力时程曲线演化及动剪力峰值变化规律奠定可靠基础。

3.2.2. 弹簧等效刚度的确定

对比刚性冲击作用下，柔性冲击对 RC 柱的动态响应呈现出显著差异。从撞击动力学机理分析，刚性冲击具有瞬时加载、高接触应力、作用时程短的特点。因撞击器刚度极大，冲击过程中自身变形可忽略，能量主要以局部集中荷载形式作用于构件表面，易导致 RC 柱产生混凝土剥落、钢筋断裂等局部脆性损伤；而柔性冲击的撞击器具备一定的柔性变形能力，撞击作用时间更长，能量传递过程更平缓，RC 柱的损伤往往表现为整体的塑性变形，局部破坏程度相对较轻。值得注意的是，撞击器的弹簧刚度是区分柔性、刚性冲击特性的关键参数：当弹簧刚度趋近于无限大时，撞击器的变形量可忽略不计，其力学行为将完全趋近于刚性撞击体，对应的冲击类型也随之向刚性冲击转化。为精准界定柔性冲击向刚性冲击过渡的临界刚度区间，本研究通过对比冲击速度为 7 m/s 时摆锤冲击与柔性冲击的力学响应与损伤模式，来获取等效于刚性撞击的弹簧等效刚度。

为实现上述目标，本研究设定具体冲击工况：采用质量为 314.21 kg 的柔性冲击体，以 7 m/s 的速度撞击 RC 柱，冲击高度设定为 250 mm；选取 500 kN/mm、1000 kN/mm、1500 kN/mm、2000 kN/mm 四组不同弹簧刚度参数进行对比模拟。通过调取各刚度工况下撞击过程的冲击力时程曲线、撞击点位移时程曲线及 RC 柱损伤破坏形态，与摆锤冲击工况下进行对比。

图 2 展示了冲击力时程曲线对比。从图中可以看出，当刚度为 500 kN/mm 时，冲击力作用时间较长、峰值较小，且峰值出现时刻明显滞后；当刚度提升至 1000 kN/mm 时，冲击力峰值已与刚性冲击工况接近，同时冲击作用时间显著缩短；而当刚度进一步增大至 1500 kN/mm、2000 kN/mm 时，冲击力峰值呈现明显的收敛趋势，说明随着刚度增大，冲击力峰值的增长幅度逐渐减弱。图 3 展示了冲击点位移时程曲线对比。由图可知，在刚度达到 1000 kN/mm 后，冲击点的位移时程响应与刚性冲击工况吻合较好，说

明此时刚度变化对位移响应的影响已逐渐可以忽略不计。图 4 展示了不同刚度下 RC 柱的损伤破坏模式。由图可知，在速度为 7 m/s 时，撞击体刚度对 RC 柱的损伤模式影响较小，在这四个刚度参数下，RC 柱均出现了明显的斜向剪切裂缝，损伤模式与刚性冲击基本一致。

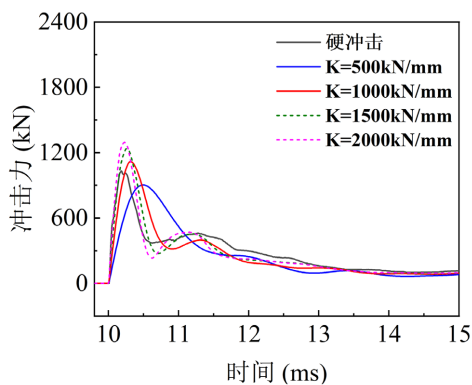


Figure 2. Comparison of impact force time history
图 2. 冲击力时程对比

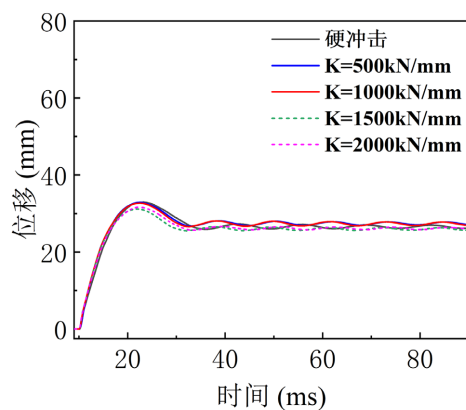


Figure 3. Comparison of displacement time history
图 3. 位移时程对比

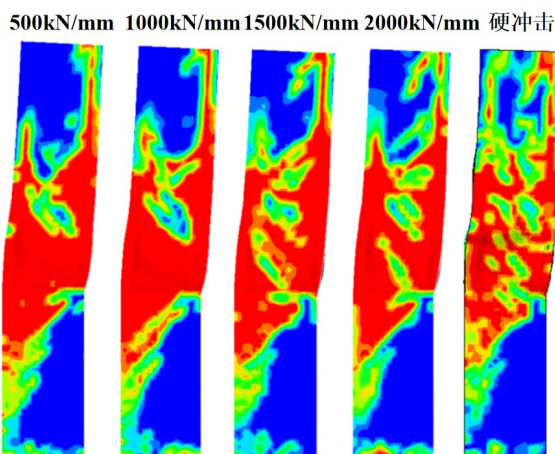


Figure 4. Damage of reinforced concrete columns under different stiffness
图 4. 不同刚度下钢筋混凝土柱的损伤

综上, 通过对比冲击力时程曲线、冲击点位移时程曲线和损伤破坏模式, 可确定柔性冲击下与刚性冲击力学行为相近的等效弹簧刚度为 1000 kN/mm。

4. 参数分析

4.1. 参数分析工况

本研究主要关注冲击体刚度以及冲击速度两个关键参数对钢筋混凝土柱动态剪切响应和损伤机理的影响。在前述确定的等效弹簧刚度基础上, 分别考虑 0.5 kN/mm、1 kN/mm、10 kN/mm、100 kN/mm、1000 kN/mm 5 个刚度等级。由作者之前开展的刚性冲击研究可知, RC 柱在冲击速度为 7 m/s 时发生了典型的斜向剪切破坏; 在冲击速度为 16 m/s 时进入了由斜剪破坏向冲切破坏的过渡阶段; 在冲击速度为 24 m/s 时则发生了典型的冲切破坏。因此, 基于这一破坏模式转变特性, 本文冲击速度参数选取此三个速度, 分别对应低速、中速和高速三个等级。柔性冲击参数工况如表 2 所示。

本文模型的命名规则为: FR 表示 RC 柱的边界条件为下端固定 - 上端自由; H 表示冲击高度; V 表示冲击速度; K 表示冲击体刚度。例如, FR-H250-V7-K₁₀₀₀ 模型表示下端固定 - 上端自由的 RC 柱在 250 mm 高度处遭受了撞击刚度为 1000 kN/mm 的撞击体以 7 m/s 的速度撞击。

Table 2. Soft impact parameters of reinforced concrete columns

表 2. RC 柱柔性冲击参数

系列	撞击速(m/s)	撞击刚度(kN/mm)	截面尺寸(mm ²)
FR-H250-V7	7	0.5、1、10、100、1000	200 × 200
FR-H250-V16	16	0.5、1、10、100、1000	200 × 200
FR-H250-V24	24	0.5、1、10、100、1000	200 × 200

4.2. 参数分析结果

4.2.1. 低速撞击时(V = 7 m/s), 撞击刚度对 RC 柱动态响应和损伤模式的影响

图 5(a)展示了冲击速度为 7 m/s 时, 不同撞击体刚度对冲击力时程曲线的影响。从图中可以看出, 随着撞击刚度的增大, 冲击力峰值不断增大, 而冲击力作用时间则持续缩短。图 5(b)展示了冲击速度为 7 m/s 时, 不同撞击体刚度对 RC 柱位移时程的影响。从图中可以看出, 随着撞击刚度的增大, 柱体位移峰值整体呈上升趋势, 而位移达到峰值的时间则不断缩短, 残余位移也随之增大并最终趋于稳定。发生此现象的原因在于当撞击刚度较低时, 弹簧的缓冲效应显著, 在压缩过程中吸收能量, 有效降低了冲击力峰值并减缓了能量传递过程, 此时柱体主要发生弹性变形; 随着刚度提升, 弹簧缓冲效应逐渐减弱, 能量传递效率与速率相应提高, 冲击力峰值快速增大且作用时间大幅缩短, 同时位移峰值增大、达峰时间提前、残余位移随之增加, 柱体逐步进入塑性损伤阶段; 当刚度达到一定临界值后, 柱体发生剪切破坏, 位移响应特征趋近于刚性冲击工况, 此时即使继续增大刚度, 位移峰值也趋于收敛, 撞击体的力学行为也基本趋近于刚性撞击。

图 6 展示了冲击速度为 7 m/s 时, 不同撞击体刚度对 RC 柱损伤和开裂模式的影响。从图中可以看出当刚度较低时, 撞击体的缓冲效应显著, 柱体主要表现为弹性变形, 无明显混凝土开裂和剥落现象。随着刚度增加, 弹簧缓冲效应减弱, 能量传递效率提高, 弯剪耦合效应逐渐加强, 斜向裂缝数量增多、长度和宽度增大, 局部出现轻微混凝土剥落, 损伤程度逐步加重。在高弹簧刚度工况下, 柱内形成贯通全截面的斜向剪切裂缝, 其损伤特征与刚性冲击工况高度吻合, 表明此时撞击体已接近刚性, 冲击能量以应力波形式快速传递, 发生典型的斜向剪切破坏, 损伤达到最大。

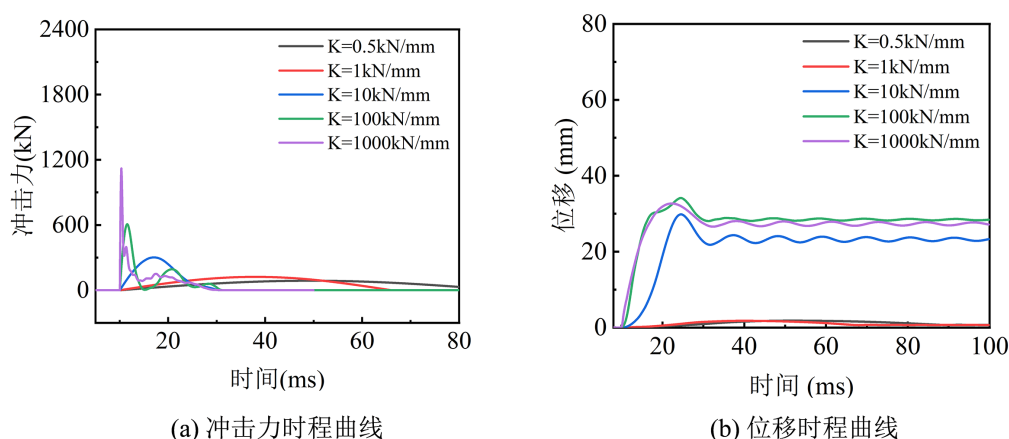


Figure 5. 7 m/s impact force time history curve and displacement time history curve
图 5. 7 m/s 时冲击力时程曲线和位移时程曲线

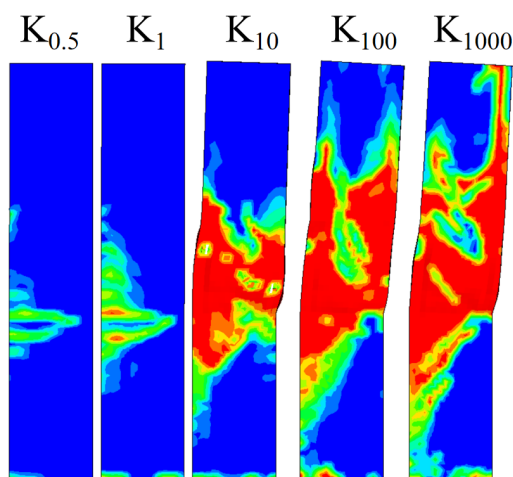


Figure 6. Damage of reinforced concrete columns at different stiffness at 7 m/s
图 6. 7 m/s 时不同刚度下钢筋混凝土柱的损伤

4.2.2. 中速撞击时($V = 16 \text{ m/s}$), 撞击刚度对 RC 柱动态响应和损伤模式的影响

图 7(a)展示了冲击速度为 16 m/s 时, 不同撞击体刚度对冲击力时程曲线的影响。由于在该速度冲击下, 刚度为 0.5 kN/mm 时弹簧会被完全压缩并失去缓冲能力, 冲击体与柱体发生刚性冲击接触, 其响应规律与其他刚度工况存在明显差异, 因此图中不再考虑 $K_{0.5}$ 这一工况。从图中可以看出, 相较于低速工况, 各刚度下的冲击力响应特征差异显著。低刚度(1 kN/mm、10 kN/mm)工况时冲击力峰值显著提升, 作用时间略有缩短; 中高刚度工况(100 kN/mm、1000 kN/mm)的冲击力峰值增长速率进一步加快, 其中 1000 kN/mm 刚度对应的峰值增幅尤为明显, 且作用时间大幅压缩。结合图 7(b)的损伤形态可知, 损伤模式随刚度增大呈现“斜向剪切-冲切破坏”的转化: 低刚度(1 kN/mm、10 kN/mm)工况下, RC 柱以斜向剪切破坏为主, 裂缝贯通柱体截面, 混凝土剥落现象较低速同刚度工况更严重; 刚度达到 100 kN/mm 时, 冲切破坏特征显现, 冲击面形成明显的剪切栓, 混凝土剥落集中于冲击点周边; 刚度进一步增大到 1000 kN/mm 时, 冲切破坏愈发明显, 剪切栓完全形成, 柱体冲击侧形成明显凹陷, 此时位移响应已接近刚性冲击工况特征, 体现了中速工况下刚度在超过 1000 kN/mm 时, 刚度不再是影响混凝土损伤模式的主要因素。

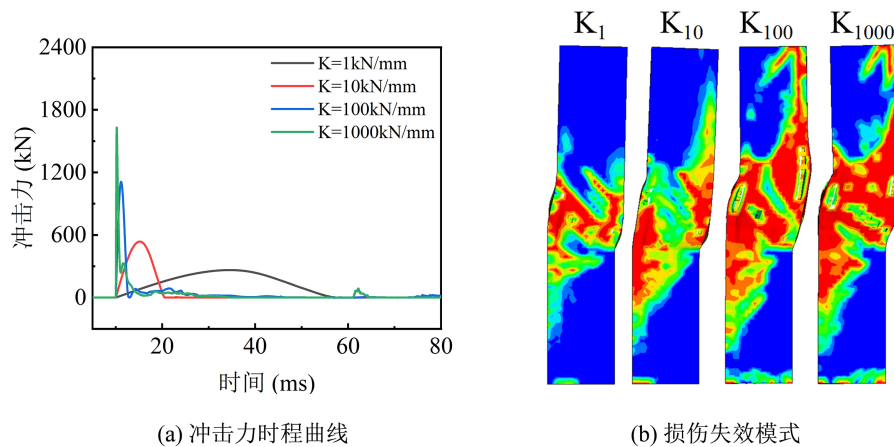


Figure 7. Calculation results of the finite element model at 16 m/s
图 7. 16 m/s 时有限元模型计算结果

4.2.3. 高速撞击时($V = 24 \text{ m/s}$), 撞击刚度对 RC 柱动态响应和损伤模式的影响

图 8 展示了冲击速度为 24 m/s 时, 不同撞击体刚度对冲击力时程曲线和 RC 柱损伤破坏模式的影响。与中速撞击工况类似, 在 $V = 24 \text{ m/s}$ 时, 刚度为 0.5 kN/mm 时弹簧会被完全压缩并失去缓冲能力, 冲击体与柱体将发生刚性冲击接触, 其响应规律与其他刚度工况存在明显差异, 因此图中不再考虑 $K_{0.5}$ 这一工况。从图 8(a) 的冲击力时程曲线对比可知: 低刚度(1 kN/mm、10 kN/mm)工况下, 冲击力峰值较中速同刚度水平显著增大, 而弹簧缓冲作用显著降低; 中高刚度(100 kN/mm、1000 kN/mm)工况下, 冲击力峰值增长趋势平缓, 刚度为 1000 kN/mm 时的峰值与刚性冲击工况基本一致。结合图 8(b) 的损伤形态可知, 高速工况下损伤模式转化的临界刚度进一步降低, 冲切破坏占据主导。刚度为 10 kN/mm 时, RC 柱已出现冲切破坏迹象, 冲击区域混凝土压溃并形成初步剪切栓; 刚度为 100 kN/mm 时, 冲切破坏特征凸显, 剪切栓开始形成, 混凝土崩落范围扩大, 纵筋外露且部分屈服; 刚度为 1000 kN/mm 时, 冲切破坏愈发剧烈, 剪切栓完全形成, 柱体冲击侧形成严重凹陷, 混凝土大量崩落, RC 柱发生了典型的冲切破坏。

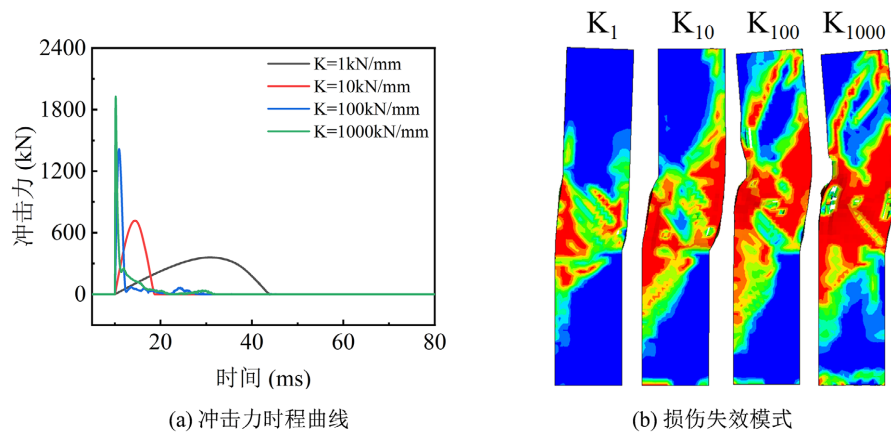


Figure 8. Calculation results of finite element model at 24 m/s
图 8. 24 m/s 时有限元模型计算结果

4.2.4. 动剪力峰值变化规律

参考文献[1]的方法, 本文对剪切栓的相关力时程曲线进行了调取分析。图 9 为 RC 柱剪切栓示意图。

剪切栓冲击侧接触高度 H_1 取为 50 mm, 冲切破坏对应的上、下截面取为冲击体与混凝土柱接触面向外沿 45° 的斜截面。模型中上、下斜截面内混凝土、箍筋及纵筋对水平剪力的贡献, 通过关键字 *DATABASE_CROSS_SECTION_PLANE 进行提取。在后续分析中, 上截面力为上截面内混凝土、箍筋与纵筋所提供剪力的总和, 下截面力按相同方式计算。将上、下截面力叠加, 即可得到试件的总动剪力; 惯性力则通过冲击力与总动剪力作差计算得到。

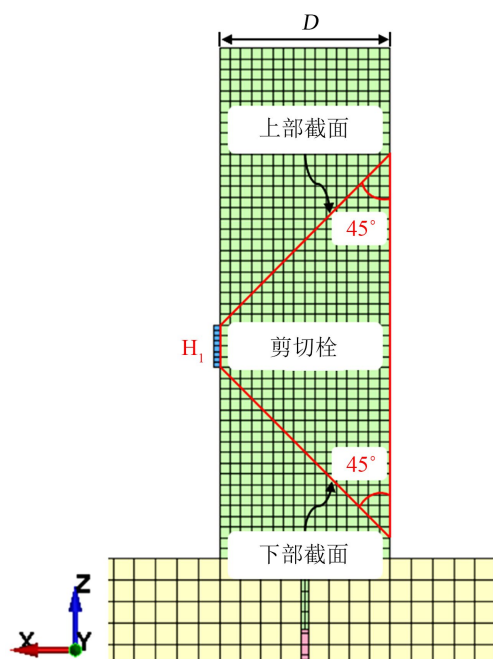


Figure 9. Schematic diagram of RC column shear plug
图 9. RC 柱剪切栓示意图

图 10 展示了不同冲击速度下动剪力峰值与撞击体刚度的关系。由图 10 可知: 当冲击速度为 7 m/s 时, 其动剪力峰值随刚度增长而稳步上升。刚度较低时弹簧压缩变形量大, 冲击能量经充分缓冲后平缓传递, 剪切效应较弱, 即便刚度增大, 低速下冲击体的动能有限, RC 柱以弯剪耦合损伤为主; 刚度达到临界值后, 此时撞击体趋近刚性, 能量以应力波形式快速传递, RC 柱损伤模式随刚度提升逐步向斜向剪切破坏发展(参见图 6)。

当冲击速度为 16 m/s 时, 刚度从 10 kN/mm 增至 100 kN/mm 时, 动剪力峰值呈现快速上升趋势, 增长幅度大于低速工况。这是因为中速工况下冲击动能显著提高, 进而推动动剪力峰值快速上升, 此时 RC 柱仍以斜向剪切破坏为主; 当刚度达到 100 kN/mm 后, 增长趋势开始减弱, 直至 1000 kN/mm 时甚至还稍有降低, 这与中速工况下损伤模式开始向冲切破坏模式过渡有关。此时受力机制从剪切破坏向冲切破坏转变, 上下截面力在局部响应阶段达到峰值, 下截面力不再继续上升, 所以总的动剪力不再继续增大。

当冲击速度为 24 m/s 时, 动剪力峰值在 1 kN/mm 至 100 kN/mm 区间内的增长速率与速度为 16 m/s 时相似, 而刚度从 100 kN/mm 增至 1000 kN/mm 时动剪力峰值开始呈现下降趋势。这也是因为在高速撞击下, 随着刚度提升, 柱子的破坏模式逐渐由整体响应阶段的剪切破坏模式向局部影响阶段的冲切破坏模式转变, 此时上下截面力在局部响应阶段均达到了峰值(对应冲切破坏), 进入整体响应阶段后下截面力不再增长, 因此动剪力呈现了下降趋势。综合以上分析可知, 当撞击速度较大时, 随着撞击刚度增大, RC 柱的破坏模式将逐渐由剪切破坏模式向冲切破坏模式转变。

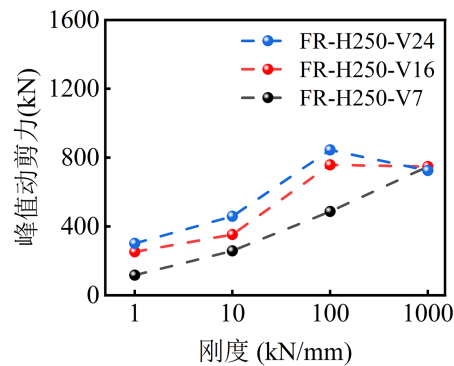


Figure 10. The relationship between dynamic shear peak and stiffness
图 10. 动剪力峰值与刚度的关系

5. 讨论

由前述分析可以看出, 撞击刚度与撞击速度将显著影响柔性撞击下 RC 柱的损伤程度和破坏模式。在低速(7 m/s)工况下, 由于动能较小, 此时撞击刚度仅影响 RC 柱剪切损伤的程度, RC 柱的破坏模式不会随着刚度的增大而发生根本转变。而在中高速(16 m/s、24 m/s)工况下, 随着冲击动能的显著提升, RC 柱将发生显著的斜向剪切破坏或者冲切破坏。两种破坏模式受到撞击体刚度的显著影响。当撞击体刚度较低时, 即使撞击速度为 24 m/s, 此时柱子依然只会发生斜向剪切破坏, 不会发生冲切破坏。随着撞击刚度的增大, RC 柱的破坏模式才逐渐由斜向剪切破坏转变为冲切破坏。并且对比冲击速度为 16 m/s 和 24 m/s 时的两种工况可以发现, 随着冲击速度的增大, 对应破坏模式转变的临界刚度将降低, 即更低的撞击刚度将使得柱体发生冲切破坏。

结合 Feng 等[1]提出的刚性撞击下局部响应阶段 RC 柱抗冲切承载力计算公式, 对具有较大撞击刚度的模型的破坏模式进行了评估。表 3 展示了 6 个具有较高撞击刚度的模型的峰值冲击力以及计算得到的抗冲切承载力[1], 从表中可以看出, 模型 FR-H250-V7-K₁₀₀、FR-H250-V7-K₁₀₀₀、FR-H250-V16-K₁₀₀ 的峰值冲击力均小于计算得到的抗冲切承载力, 这表明它们不会发生冲切破坏, 这也与计算得到的破坏模式吻合较好(图 6、图 7)。其中 FR-H250-V16-K₁₀₀ 由于撞击速度较高, 其破坏模式已接近由剪切破坏向冲切破坏转变。而对于模型 FR-H250-V16-K₁₀₀₀、FR-H250-V24-K₁₀₀、FR-H250-V24-K₁₀₀₀, 可以看出它们的峰值冲击力与抗冲切承载力已非常接近, 甚至略微大于抗冲切承载力, 这表明试件将发生冲切破坏。这也与图 7、图 8 中相应模型的损伤失效模式吻合较好。这也从侧面印证了文献[1]中所提出的局部响应阶段 RC 柱抗冲切承载力计算公式的准确性。

Table 3. Evaluation of punching/shear failure mode of RC columns

表 3. RC 柱冲切/剪切破坏模式评估

模型	峰值冲击力 (kN)	抗冲切承载力 (kN)	比例	破坏模式
FR-H250-V7-K ₁₀₀	607.1	837.6	0.72	剪切
FR-H250-V7-K ₁₀₀₀	1120.0	1189.8	0.94	剪切
FR-H250-V16-K ₁₀₀	1110.2	1182.3	0.94	剪切
FR-H250-V16-K ₁₀₀₀	1631.7	1616.2	1.01	冲切
FR-H250-V24-K ₁₀₀	1414.7	1426.2	0.99	冲切
FR-H250-V24-K ₁₀₀₀	1927.6	1897.1	1.02	冲切

6. 结论

本文通过建立柔性撞击下 RC 柱的精细化有限元模型,研究了冲击体刚度以及冲击速度两个参数对 RC 柱动态剪切响应和损伤破坏模式的影响。主要结论如下:

1) 通过与摆锤撞击 RC 柱模型计算结果的对比确定了柔性冲击的等效弹簧刚度。通过对比不同弹簧刚度下 RC 柱的冲击力时程曲线、冲击点位移时程曲线以及损伤破坏模式,发现当弹簧刚度为 1000 kN/mm 时,柔性撞击的力学行为与刚性撞击吻合良好,此时撞击体的变形基本可以忽略不计,柱体损伤模式与刚性撞击趋于一致。该刚度值的确定为考虑撞击体刚度的柔性撞击参数分析奠定了基础。

2) 撞击体刚度将显著影响 RC 柱的动态响应以及损伤模式。由于柔性冲击体在撞击过程中通过自身变形消耗了部分初始动能,因此减小了 RC 柱在局部响应阶段发生冲切破坏以及整体响应阶段发生剪切破坏的概率。随着撞击体刚度的增大,冲击力峰值随之增大,峰值出现时间提前,并且作用持续时间缩短。

3) 当撞击体刚度保持不变时,冲击速度的提高将加剧 RC 柱的损伤。在高速撞击作用下,随着撞击刚度的增大,RC 柱的破坏模式将逐渐由斜向剪切破坏转变为冲切破坏,并且随着冲击速度的增大,对应破坏模式转变的临界刚度将降低。即撞击速度和撞击体刚度在导致 RC 柱破坏模式转变方面存在耦合关系,当冲击速度增大时,此时更低的撞击刚度将使得柱体发生冲切破坏。

基金项目

湖南省教育厅优秀青年项目(25B0442)。

参考文献

- [1] Feng, F.F., Chen, L., Zhou, D.J., *et al.* (2025) Two-Stage Dynamic Shear Response of Square RC Columns under Lateral Impact: Mechanisms, Inertial Force Analysis, and Punching Shear Resistance Model. *Engineering Structures*, **338**, Article 120579. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120579>
- [2] Do, T.V., Pham, T.M. and Hao, H. (2019) Impact Force Profile and Failure Classification of Reinforced Concrete Bridge Columns against Vehicle Impact. *Engineering Structures*, **183**, 443-458. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.040>
- [3] Zhao, W.H. and Qian, J. (2020) Resistance Mechanism and Reliability Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral Impact. *International Journal of Impact Engineering*, **136**, Article 103413. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103413>
- [4] 李文博, 杜永峰, 朱翔. 钢管混凝土柱侧向冲击后剩余承载力研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(2): 73-83.
- [5] Luan, H., Wu, J., Cao, T., Zhao, X., Geng, F. and Dong, G. (2023) Axial Compression Performance of Reinforced Concrete Columns after Lateral Impact Load. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, **27**, 3528-3541. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0307-6>
- [6] 查丽娟, 马智永, 代庆斌. 冲击载荷作用下钢筋混凝土结构动力响应仿真及损伤机理[J]. 混凝土, 2021(3): 59-61+70.
- [7] Sohel, K.M.A., Al-Jabri, K. and Al Abri, A.H.S. (2020) Behavior and Design of Reinforced Concrete Building Columns Subjected to Low-Velocity Car Impact. *Structures*, **26**, 601-616. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.054>
- [8] Ye, J., Cai, J., Chen, Q., Liu, X., Tang, X. and Zuo, Z. (2020) Experimental Investigation of Slender RC Columns under Horizontal Static and Impact Loads. *Structures*, **24**, 499-513. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.034>
- [9] Zhou, C., Wang, W., Zheng, Y., Liu, X., Cao, H. and Hui, Y. (2023) Dynamic Behavior of RC Columns Confined with CFRP Grid-Reinforced ECC Subjected to Lateral Low-Velocity Impact. *International Journal of Impact Engineering*, **172**, Article 104402. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104402>
- [10] Xie, Z.Y. (2020) Numerical Simulations of Metallic Foam Safeguarded RC Square Columns under Lateral Soft Impact. *Archives of Civil Engineering*, **66**, 3-17. <https://doi.org/10.24425/ace.2020.131792>
- [11] Liu, T., Chen, L., Xu, J.J., *et al.* (2022) Vehicle Collision with Reinforced Concrete Columns Wrapped with Fiber-Reinforced Polymer Composites. *ACI Structural Journal*, **119**, 165-179.
- [12] 张于晔, 潘睿阳, 蒋冬启. 车辆撞击作用下泡沫铝防撞桥墩的动态响应特性[J]. 振动工程学报, 2021, 34(1): 89-

98.

- [13] Vepsä, A., Darraba, A., Fedoroff, A., *et al.* (2022) Bending Damage of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Soft Missile Impact, Part I: Recent Tests on Influence of Inclined Impact. 2022 26th International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, 10-15 July 2022, 1-10.
- [14] Zhao, W.C. and Ye, J.H. (2022) Dynamic Behavior and Damage Assessment of RC Columns Subjected to Lateral Soft Impact. *Engineering Structures*, **251**, Article 113476. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113476>
- [15] 赵武超, 钱江, 李江远. 柔性冲击下钢筋混凝土柱的动态响应[J]. 兵工学报, 2021, 42(S1): 117-126.
- [16] Zhong, Z., Fan, W., Wu, Q., Huang, X. and Chen, B. (2024) Damage Quantification Based on Drift Ratios and Axial Capacity Degradation for RC Columns under Low-Velocity Impact Loads. *International Journal of Impact Engineering*, **194**, Article 105078. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.105078>
- [17] 陈林, 曾玉焯, 颜泽峰, 等. 车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的动力响应及损伤特征[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 261-267+273.
- [18] 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.
- [19] 潘政华, 邹晓伟, 张媛媛. 基于车辆撞击下框架结构动力响应的探究[J]. 建材发展导向(上), 2025, 23(21): 115-117.
- [20] Chen, L., Zhou, D.J., Feng, F.F., Liu, T. and Wu, C. (2024) Shear Damage Behavior of RC Columns with Small Shear-to-Span Ratios under Lateral Impact and Static Load. *China Journal of Highway and Transport*, **37**, 211-221 (in Chinese)
- [21] 陈林, 周戴江, 李乐平, 等. 小剪跨比 RC 柱及钢管增强 RC 柱多次冲击的响应行为[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(3): 463-473.