

钢筋混凝土墩柱冲击动力响应简化分析

任亮, 方舟, 郑胜佩

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为探讨钢筋混凝土墩柱在冲击作用下的动力响应, 依托两自由度质量-弹簧-阻尼模型, 结合 OPENSEES 计算平台, 在明确钢筋混凝土墩柱等效抗力-位移曲线的基础上, 提出了融合材料非线性和冲击应变率效应的钢筋混凝土墩柱冲击简化分析方法, 通过与钢筋混凝土墩柱落锤冲击试验进行对比, 验证了两自由度简化分析方法的有效性。在此基础上, 探讨了撞击速度、撞击质量、轴压比和纵筋率等敏感参数对钢筋混凝土墩柱落锤冲击响应的影响。结果表明: 提出的简化分析方法计算的冲击力峰值与试验值误差为 4.30%, 跨中峰值位移误差为 2.16%; 随着撞击速度和撞击质量的增加, 墩柱构件冲击力峰值和跨中位移峰值逐渐增大, 但撞击速度和撞击质量的增加会导致构件跨中位移峰值出现时间滞后的特征; 随着轴压比与纵筋率的增大, 墩柱构件冲击力峰值逐渐增大, 而跨中位移峰值表现出逐渐减小的趋势, 并且纵筋率变化对冲击力时程曲线中二次冲击影响显著大于轴压比变化的影响。

关键词: 钢筋混凝土墩柱; 冲击动力响应; 质量-弹簧-阻尼模型; 简化分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

Simplified Analysis on Impact Dynamic Response of Reinforced Concrete Columns

Ren Liang, Fang Zhou, Zheng Sheng Pei

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

Abstract: To discuss the dynamic response of reinforced concrete columns under impact, relying on the two-degree-of-freedom mass-spring-damper model and combining with the OPENSEES computing platform, on the basis of clarifying the equivalent resistance-displacement curve of reinforced concrete columns, a simplified impact analysis method for reinforced concrete columns integrating material nonlinearity and impact strain rate effects is proposed. By comparing with the drop hammer impact test of reinforced concrete columns, the validity of the proposed two-degree-of-freedom simplified analysis method is verified. On this basis, the impacts of sensitive parameters like impact velocity, impact mass, axial compression ratio and longitudinal reinforcement ratio on the drop hammer impact response of reinforced concrete columns are explored. The results showed that the peak impact force calculated by the proposed simplified analysis method has a deviation of approximately 4.30% from the test value, and the deviation of the peak displacement at mid-span is approximately 2.16%. With the increase of the impact velocity and impact mass, the peak impact force and the peak displacement at the mid-span of the column gradually increased, but the increase of the impact velocity and impact mass would lead to a delayed characteristic of the peak displacement at the mid-span of the column. With the increase of the axial compression ratio and the longitudinal reinforcement ratio, the peak impact force of the column gradually increased, while the peak displacement at the mid-span showed a gradually decreasing trend. Moreover, the change of the longitudinal reinforcement ratio had a significantly greater influence on the secondary impact in the impact force time history curve than the change of the axial compression ratio.

Key words: reinforced concrete columns; impact dynamic response; mass-spring-damper model; simplified analysis

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52068024, 52368015); 江西省自然科学基金项目 (20224BAB204055)

作为桥梁的主要受力和传力构件，墩柱在服役过程中可能面临车辆、船舶、落石及漂浮物等外物的撞击风险^[1-3]。如何有效评估桥梁墩柱在冲击荷载作用下的动力响应显得尤为重要。

目前，桥梁墩柱的碰撞问题研究主要有试验研究、数值模拟和理论分析三种方法。其中，试验研究对撞击过程展现最为直观，通过获取墩柱构件冲击力时程和位移时程曲线，可较好地评估构件的抗撞能力，但试验费用昂贵、受现实因素影响较多，且试验过程复杂^[4-7]。随着非线性有限元分析方法的进步和计算能力的大幅提高，使得研究人员能够对碰撞事故进行重建，以获得桥梁结构或构件在碰撞作用下的损伤劣化过程，大型有限元软件如 ABAQUS、LS-DYNA 等均可应用于墩柱构件抗撞数值分析，但数值模拟节点单元数量巨大，计算耗时长、效率低^[8-11]。因此，为方便设计者在实际工程中使用，不少学者通过各种假设，将瞬时有大量能量转换的桥梁碰撞问题简化为数值上的理论模型^[12-17]，其中经典的等效质量-弹簧-阻尼模型最受研究者关注。Weng^[18]构建了一个质量及双线性刚度与实际试验梁一致的单自由度质量弹簧冲击模型；Suaris^[19]和 Fujikake^[20]分别构建了两自由度质量-弹簧-阻尼模型用于预测 RC 梁和墩柱冲击响应，通过与试验对比表明在弹性阶段能够取得较好的预测效果；此后，赵德博等^[21]通过引入一个将剪切栓效应等效成质量节点的构件，将两自由度模型变成三自由度质量-弹簧-阻尼模型，能较好分析钢筋混凝土压弯构件在冲击作用下产生剪切失效的响应过程。然而，理论分析在提高计算效率的同时，却难以考虑墩柱构件材料非线性以及材料应变率效应等因素的综合影响，导致给出的撞击响应数据精度不高，实用性不强。

基于此，本文依托两自由度质量-弹簧-阻尼作用模型，结合 OPENSEES 计算平台，在明确钢筋混凝土墩柱等效抗力-位移曲线的基础上，提出了融合材料非线性和冲击应变率效应的钢筋混凝土墩柱冲击简化分析方法，通过与钢筋混凝土墩柱落锤冲击试验进行对比，验证了提出的两自由度简化分析方法的有效性。在此基础上，探讨了撞击速度、撞击质量、轴压比和纵筋率等敏感参数对钢筋混凝土墩柱冲击响应的影响。所提出的简化分析方法能够较好地考虑材料非线性以及冲击应变率效应等因素的影响，对快速准确分析钢筋混凝土墩柱冲击动力响应具有实际意义。

1 两自由度质量-弹簧-阻尼冲击模型

1.1 两自由度质量-弹簧-阻尼运动方程

如图 1 所示，以受压墩柱跨中落锤冲击为例，采用两个质点 m_1 和 m_2 来模拟锤头的质量和墩柱的质量，锤头与墩柱之间的局部接触刚度和墩柱的等效抗力刚度分别用弹簧 k_1 和弹簧 k_2 来模拟，而局部接触阻尼和结构阻尼则通过线性粘滞阻尼器 c_1 和 c_2 来模拟，最终得到受压墩柱落锤冲击两自由度质量-弹簧-阻尼冲击模型。模型中忽略锤头和墩柱尺寸以及形状对运动的影响，并假设弹簧的恢复力与变形、阻尼力与物体速度均成正比；边界条件一端为固结，一端为滑动支座；该模型适用于低速冲击模拟。

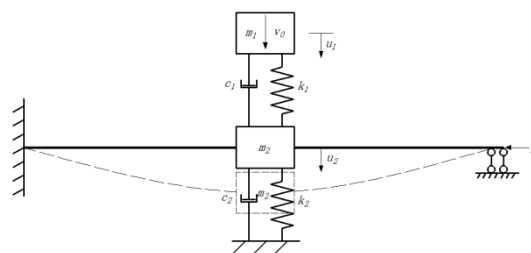


图 1 两自由度质量-弹簧-阻尼冲击模型

Fig.1 Two-degree-of-freedom mass-spring-damper impact model

通过赋予落锤初始冲击速度 V_0 ，得到其运动方程为：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (1)$$

式中： M ， C ， K ， P 分别为质量矩阵，阻尼矩阵，刚度矩阵和外力矩阵； \ddot{u} ， \dot{u} ， u 分别为加速度、速度和位移向量。

其中

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 + c_2 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} m_1 g \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\ddot{u} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} \quad \dot{u} = \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

式中： \ddot{u}_1 ， \ddot{u}_2 ， \dot{u}_1 ， \dot{u}_2 ， u_1 ， u_2 分别为冲击过程中锤头和墩柱的加速度，速度和位移。

1.2 参数确定及运动方程求解

为简化运算过程，可以认为接触力和接触刚度以及变形之间是线性相关的，其关系为

$$P_c = k_l(u_1 - u_2) \quad u_1 - u_2 \geq 0 \quad (2)$$

式中， p_c 为接触力； k_l 为接触刚度； u_1 ， u_2 分别为两质点的位移。

已有的研究表明，接触刚度的大小仅对冲击力峰值有显著影响^[16,22]，所以可采用试算的方式并根据实际冲击力峰值来确定接触刚度的最终取值，当缺少实测数据时，可由下式确定

$$k_l = \frac{4\sqrt{R}}{3} \left[\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中， E_1 、 E_2 和 ν_1 、 ν_2 为两个物体的弹性模量和泊松比； R 为落锤锤头的半径。

以往研究表明，结构阻尼对墩柱峰值动力响应影响较小^[16,23]。当系统进入自由振动状态后，无阻尼系统的位移会在残余位移值附近波动，此时可将其波动的均值作为残余位移的预计值，故设定 $c_2=0$ 。接触阻尼对冲击力影响较为显著，计算落锤与墩柱之间接触阻尼的表达式为

$$c_1 = 2\xi \sqrt{\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot k_l} \quad (4)$$

式中： ξ 为阻尼比。

在两自由度质量-弹簧-阻尼冲击模型中，受压墩柱等效抗力刚度 k_2 可由下式确定：

$$k_2 = P_e / u_2 \quad (5)$$

式中， P_e 为等效抗力。

为正确获得受压墩柱的等效抗力-位移曲线，将落锤冲击作用等效成一个集中力荷载并施加在墩柱被撞点上，根据集中力荷载在被撞点位移与实际结构位移相等的准则来确定等效抗力。简化模型与实际结构之间的荷载换算系数为 $K_L=P_e/P_t=1$ ，抗力换算系数为 $K_R=k_2/k_t=1$ 。其中： P_t 为真实荷载， k_t 为真实刚度。可以通过对受压墩柱被撞点开展推导分析，在明确等效抗力-位移曲线基础上得到等效抗力刚度。

在确定各部分质量、阻尼和刚度后，通过中心差分法求解式 (1) 即可求得动力响应。对应的方程为

$$u_{i+1} = \hat{K}^{-1} \hat{P}_i \quad (6)$$

$$\hat{K} = \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t} \quad (7)$$

$$\hat{P}_i = P_i - \frac{M}{\Delta t^2} u_{i-1} + \frac{C}{2\Delta t} u_{i-1} + \frac{2M}{\Delta t^2} u_i - K u_i \quad (8)$$

式中： i 为计算时间步。

2 等效抗力-位移曲线

2.1 非线性纤维有限元模型

依托 OPENSEES 计算平台，采用非线性梁柱单元对受压墩柱的非线性行为进行模拟，结合截面纤维模型，建立受压墩柱的非线性有限元模型，如图 2 所示。模型中，沿墩柱轴线方向将非线性梁柱单元等间距划分，单元截面纤维包括基于 concrete02 本构模型的混凝土纤维和基于 steel02 本构模型的钢筋纤维；墩柱一端采用固结约束，另一端仅释放 x 方向自由度；轴力通过在两端节点施加轴向集中力来实现。以位移控制的方式在撞击点施加竖向荷载，混凝土和钢筋在动力冲击过程中均为应变率敏感材料，如何计入应变率效应对这些材料的影响是建立可靠的非线性纤维有限元模型的关键^[24]。考虑到受压墩柱等效抗力-位移曲线中，等效抗力在经过峰值后会出现下降，此时由于塑性铰并未完全形成，构件能继续承载直至破坏，为此将等效抗力下降至峰值荷载的 80% 作为有限元模型计算终止的判定条件。

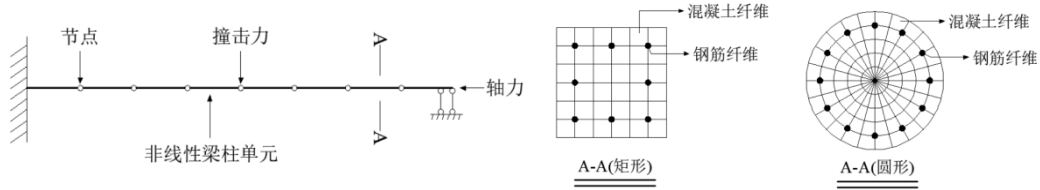


图 2 受压墩柱冲击荷载作用下的两自由简化模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of two free simplified model under impact load of RC column under compression

2.2 冲击应变率效应

对于混凝土材料，通过修正 concrete02 本构模型中的混凝土抗压强度和弹性模量来考虑应变率效应，相应的表达式为

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\theta} \times \frac{x_u}{2} \quad (9)$$

$$f_{co,d} = f_{co} \cdot \frac{1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}_c}{0.035 \cdot f_{co}^2} \right]^{\frac{1}{6}}}{1 + \left[\frac{0.00001}{0.035 \cdot f_{co}^2} \right]^{\frac{1}{6}}} \quad (10)$$

$$E_{c,d} = E_c \cdot \frac{1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}_c}{0.035 \cdot f_{co}^3} \right]^{\frac{1}{6}}}{1 + \left[\frac{0.00001}{0.035 \cdot f_{co}^3} \right]^{\frac{1}{6}}} \quad (11)$$

式中， f_{co} 为混凝土极限抗压强度； E_c 为混凝土弹性模量； $\dot{\epsilon}_c$ 为混凝土应变率； $f_{co,d}$ 为应变率为 $\dot{\epsilon}_c$ 时，混凝土抗压强度； $E_{c,d}$ 为应变率为 $\dot{\epsilon}_c$ 时，混凝土弹性模量； θ 为屈服曲率； x_u 为静力加载时截面中性轴至有效截

面顶的距离。

对于钢筋，通过修正 steel02 本构模型中的钢筋屈服应力，来考虑应变率效应，相应的表达式为：

$$\dot{\epsilon}_s = \dot{\theta} \times \frac{(d - x_u)}{2} \quad (12)$$

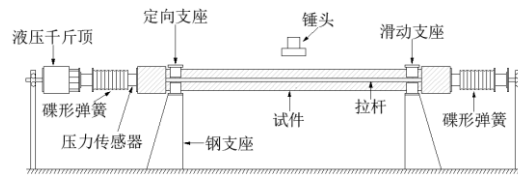
$$f_{sy} = f_y \times (1.202 + 0.040 \times \log_{10} \dot{\epsilon}_s) \quad (13)$$

式中： d 为钢筋至有效截面顶的距离； $\dot{\epsilon}_s$ 为钢筋应变率； f_y 为钢筋屈服强度； f_{sy} 为 $\dot{\epsilon}_s$ 时钢筋的屈服强度。

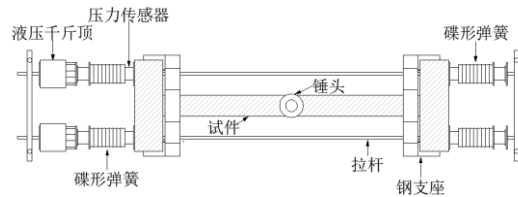
3 简化分析方法验证

3.1 验证试验概况

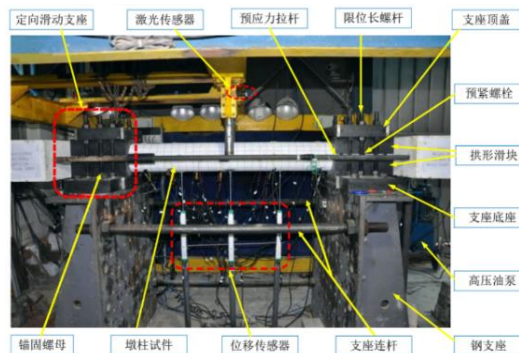
本文选用文献[16]中开展的受压钢筋混凝土墩柱落锤冲击试验，验证提出的简化分析方法的有效性，试验装置如图3所示。试件为钢筋混凝土圆形墩柱，直径为200 mm，长度为2200 mm，保护层厚度为20 mm。试件两端设置长900 mm、宽250 mm、高350 mm的横梁，通过预加轴力系统施加200 kN的轴向力，轴压比为0.143。试件混凝土强度等级为C30，实测单轴抗压强度为32.5 MPa；纵筋和箍筋均采用HRB400钢筋，纵筋直径为8 mm，箍筋直径为6 mm。纵筋共12根，均匀分布于墩柱圆形截面，箍筋间距为55 mm。落锤质量为442 kg，初始冲击速度为4.85 m/s，相应的冲击能为5198.5 J。试件两端边界条件分别为固定约束和滑动约束。



(a) 正视图



(b) 俯视图



(c) 实物图

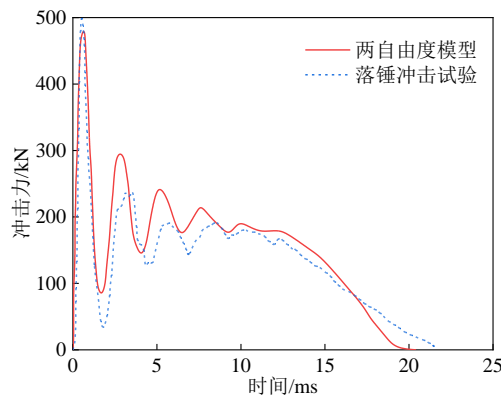
图3 落锤冲击试验装置

Fig.3 Drop hammer impact test device

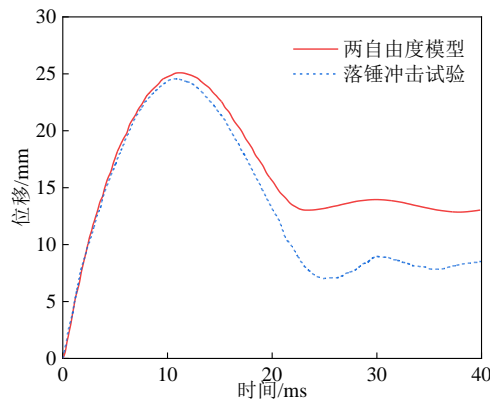
3.2 试验结果与计算结果对比

基于所建立的两自由度简化分析模型，对上述受压钢筋混凝土墩柱落锤冲击试验开展简化分析，将两自由度简化分析模型计算结果与试验结果进行对比验证。

图 4 为落锤作用下跨中位移时程曲线和冲击力时程曲线与计算曲线的对比。从图中可以看出，在落锤冲击荷载作用下，冲击力时程分析曲线与试验曲线吻合度较好，上升阶段和衰减阶段两者基本重合，中间稳定阶段分析曲线略高于试验曲线。位移时程分析曲线在上升段与试验曲线较为吻合，但在经过峰值下降到一定程度后，由于简化分析中 c_2 取值为 0，位移值随残余位移波动幅度较小，致使其在稳定阶段相对平缓。图中简化分析冲击力峰值为 484.02 kN，试验值为 505.79 kN，两者误差为 4.30%；简化分析位移峰值为 25.09 mm，试验值为 24.56 mm，两者误差为 2.16%。简化分析冲击力峰值和位移峰值与试验值误差均控制在 10% 以内，表明建立的两自由度简化分析方法具有较好的适用性。



(a) 冲击力时程曲线



(b) 跨中位移时程曲线

图 4 冲击响应分析曲线与试验曲线对比

Fig.4 Comparison of impact response analysis curve with test curve

4 参数分析

基于上述建立的融合材料非线性和冲击应变率效应的钢筋混凝土墩柱冲击简化分析方法，本节选取撞击速度、撞击质量、轴压比、纵筋率等敏感参数，对钢筋混凝土墩柱落锤冲击动力响应进行分析，其中试件选用验证试验中的原型试件，相应的撞击速度为 5 m/s，撞击质量为 450 kg，轴压比为 0.1，纵筋率为 1.92%，当单个参数改变时，其他参数保持不变。

4.1 撞击速度

图 5 和图 6 分别为不同撞击速度下的冲击力时程和跨中位移时程曲线，图 7 给出了冲击力峰值与位移峰值随撞击速度变化曲线。

随着撞击速度增大，冲击力和位移峰值随之增加，这是因为撞击速度提升增大了冲击能量。同时，撞击速度增加使跨中位移峰值出现时间滞后，这是由于冲击能量增加使试件从弹性逐渐进入塑性阶段，产生塑性变形，进而延缓了峰值位移出现的时间。

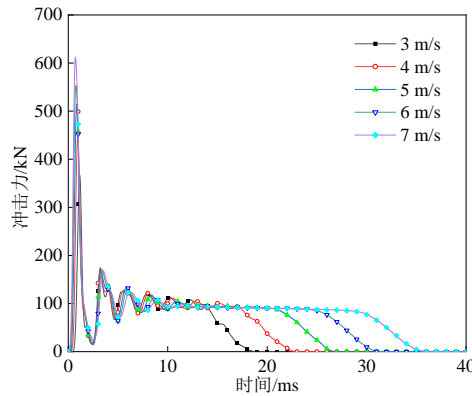


图 5 不同撞击速度下冲击力-时程曲线

Fig.5 Impact force-time history curves under different impact velocities

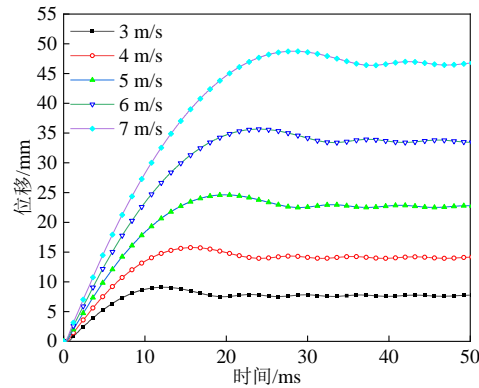


图 6 不同撞击速度下跨中位移-时程曲线

Fig.6 Displacement-time history curves under different impact velocities at the midspan

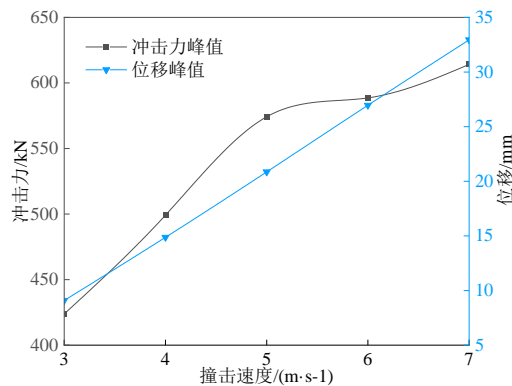


图 7 不同撞击速度下冲击力峰值和位移峰值

Fig.7 Impact force peak and displacement peak curve under different impact velocities

4.2 撞击质量

图 8 和图 9 分别为不同撞击质量下的冲击力时程和跨中位移时程曲线，图 10 给出了冲击力峰值与位移峰值随撞击质量变化曲线。

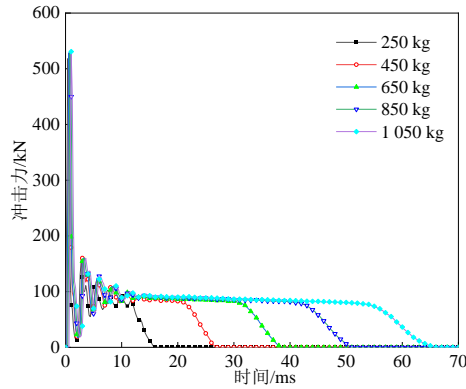


图 8 不同撞击质量下冲击力-时程曲线

Fig.8 Impact force-time history curves under different impact masses

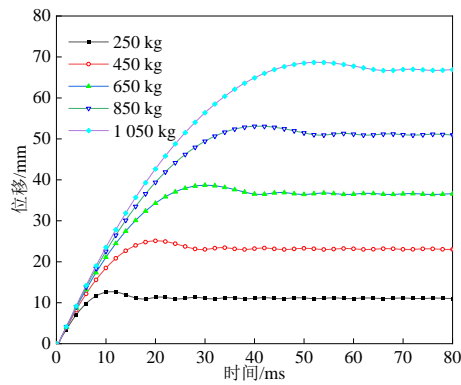


图 9 不同撞击质量下跨中位移-时程曲线

Fig.9 Displacement-time history curves under different impact masses at the midspan

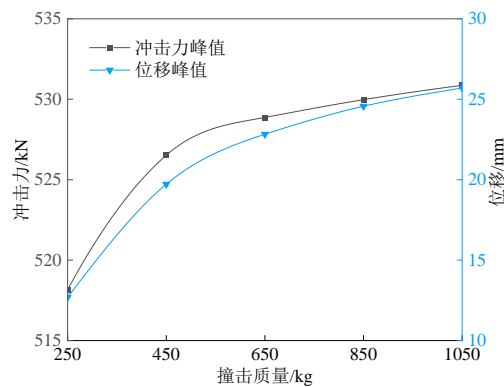


图 10 不同撞击质量下冲击力峰值和位移峰值

Fig.10 Impact force peak and displacement peak curve under different impact masses

撞击质量增大，冲击能量也随之变大，导致冲击力峰值和位移峰值逐渐增加，但两者增长趋势均逐渐放缓。这是由于撞击质量的增大使得落锤与墩柱之间的接触阻尼 c_l 逐渐增大，导致冲击力峰值和位移峰值的增长逐渐变缓。跨中位移峰值随着撞击质量增大，表现出与撞击速度类似的时间滞后特征。

4.3 轴压比

图 11 和图 12 分别为不同轴压比下冲击力时程和跨中位移时程曲线，图 13 给出了冲击力峰值与位移峰值随轴压比变化曲线。

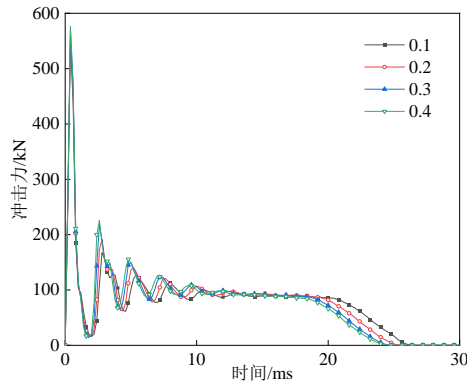


图 11 不同轴压比下冲击力-时程曲线

Fig.11 Impact force-time history curves under different axial load ratio

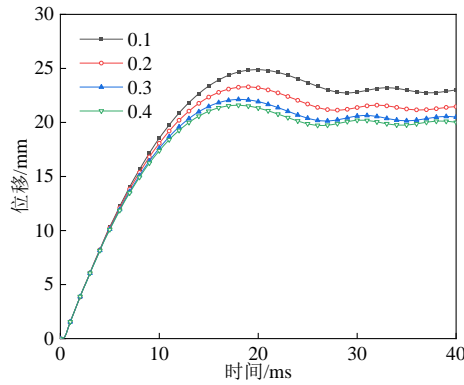


图 12 不同轴压比下跨中位移-时程曲线

Fig.12 Displacement-time history curves under different axial load ratio at the midspan

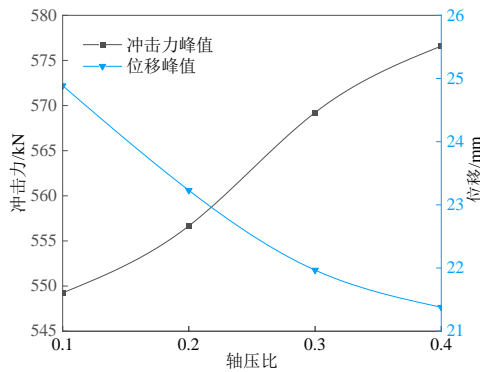


图 13 不同轴压比下冲击力峰值和位移峰值

Fig.13 Impact force peak and displacement peak curve under different axial load ratio

当轴压比从 0.1 增大到 0.4，冲击力峰值逐渐增大，约增大了 4.98%，而跨中位移峰值表现出逐渐减小的趋势，约减少了 14.09%。其原因是轴压比的增加会导致墩柱等效抗力刚度 k_2 逐渐增大，进而增大了冲击力峰值，但墩柱的延性在逐渐降低，使跨中位移峰值表现出下降的趋势。

4.4 纵筋率

图 14 和图 15 分别为不同纵筋率下冲击力时程和跨中位移时程曲线，图 16 给出了冲击力峰值与位移峰值随纵筋率变化曲线。

当纵筋率从 0.48% 增大到 4.30%，冲击力峰值和跨中位移峰值的变化趋势与轴压比类似，其中冲击力峰值增大 2.60%，位移峰值降低 74.54%。冲击力时程曲线中纵筋率改变对二次冲击影响显著大于轴压比变化的影响，这是由于纵筋率的增加，在增强墩柱抗冲击性能的同时，增大了等效抗力-位移曲线中下降段割线刚度，进而增大了二次冲击效应所致。

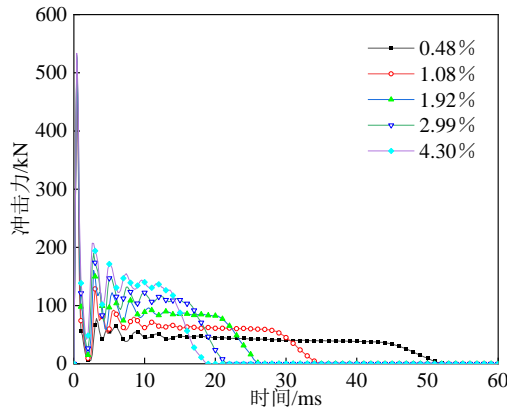


图 14 不同纵筋率下冲击力-时程曲线

Fig.14 Impact force-time history curves under different longitudinal reinforcement ratio

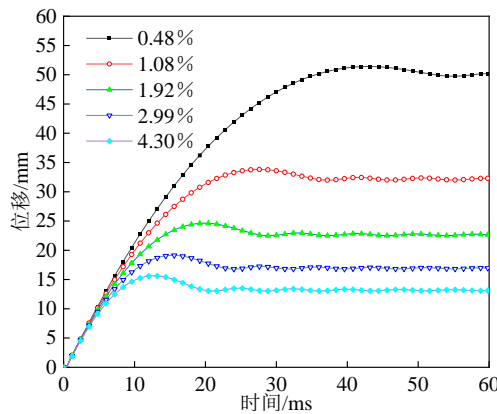


图 15 不同纵筋率下跨中位移-时程曲线

Fig.15 Displacement-time history curves under different longitudinal reinforcement ratio at the midspan

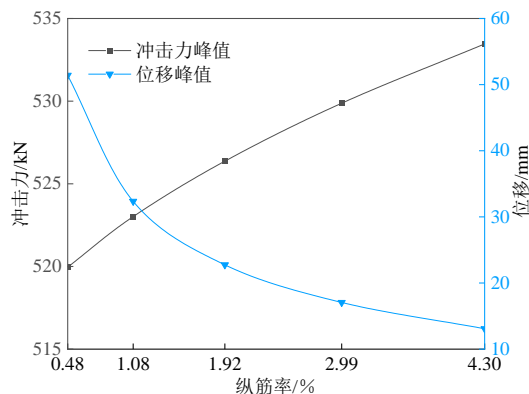


图 16 不同纵筋率下冲击力峰值和位移峰值

Fig.16 Impact force peak and displacement peak curve under different longitudinal reinforcement ratio

5 结论

本文基于两自由度质量-弹簧-阻尼模型体系，结合 OPENSEES 计算平台，提出融合材料非线性和冲击应变率效应的钢筋混凝土墩柱冲击简化分析方法，在试验验证的基础上，进一步开展了参数分析，得到以

下结论。

1) 基于合适的材料模型和参数选取,综合考虑试验与理论分析存在的偏差,应用融合了材料非线性和冲击应变率效应的钢筋混凝土墩柱两自由度冲击简化分析方法计算的冲击力峰值与试验值误差约为 4.30%,跨中峰值位移误差约为 2.16%,表明提出的简化分析方法能较好地预测钢筋混凝土墩柱冲击动力响应。

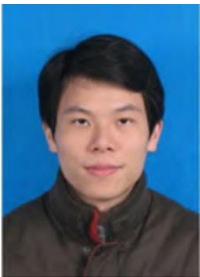
2) 随着撞击速度和撞击质量的增加,墩柱构件冲击力峰值和跨中位移峰值逐渐增大。当撞击速度从 3 m/s 增加到 7 m/s 时,冲击力峰值增大了 44.91%,位移峰值增大了 262.33%;当撞击质量从 250 kg 增加到 1 050 kg 时,冲击力峰值增大了 2.45%,位移峰值增大了 102.54%,且撞击速度和撞击质量的增加会导致构件跨中位移峰值出现滞后的特征。

3) 随着轴压比与纵筋率的增大,墩柱构件冲击力峰值逐渐增大,而跨中位移峰值表现出逐渐减小的趋势。当轴压比从 0.1 增加到 0.4 时,冲击力峰值增大了 4.98%,位移峰值降低了 14.09%;当纵筋率从 0.48% 增加到 4.30%时,冲击力峰值增大了 2.60%,位移峰值降低了 74.54%,且纵筋率变化对冲击力时程曲线中二次冲击影响显著大于轴压比变化的影响。

参考文献

- [1] 刘占辉,卢治谋,张锐,等. 桥梁撞击问题 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):242-251.
LIU Z H,LU Z M,ZHANG R,et al. State-of-the art review of bridge impact research in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2021,43(S1):242-251.
- [2] 樊伟,钟正午,王君杰,等. 桥梁船撞研究进展综述:事故、分析与防护[J]. 中国公路学报,2024,37(5):38-66.
FAN W,ZHONG Z W,WANG J J. Vessel-bridge collisions:accidents,analysis,and protection[J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(5):38-66.
- [3] 王世超,庞兴发,张岗,等. 货车撞击双柱式 RC 桥墩的损伤机理与计算方法[J]. 中国公路学报,2024,37(5):108-121.
WANG S C,PANG X F,ZHANG G,et al. Damage mechanism and calculation method for double-column RC bridge piers subjected to truck impact[J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(5):108-121.
- [4] JIA P C,WU H,WANG R,et al. Dynamic responses of reinforced ultra-high performance concrete members under low-velocity lateral impact[J]. International Journal of Impact Engineering,2021,150:103818.
- [5] SWESI A O,COTSOVOS D M,VAL D V. Effect of CFRP strengthening on response of RC columns to lateral static and impact loads[J]. Composite Structures,2022,287:115356.
- [6] HUANG Z J,KHAN M Z N,CHEN W S,et al. Experimental and numerical study of the performance of geopolymer concrete columns reinforced with BFRP bars subjected to lateral impact loading[J]. Construction and Building Materials,2022,357:129362.
- [7] CHEN L,FANG L,FAN W,et al. Field test and numerical simulation of a full-scale RC pier under multiple lateral impacts[J]. Engineering Structures,2022,268.
- [8] WEI J,LI J,WU C Q. Behaviour of hollow-core and steel wire mesh reinforced ultra-high performance concrete columns under lateral impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering,2020,146:103726.
- [9] FAN W,SHEN D J,YANG T,et al. Experimental and numerical study on low-velocity lateral impact behaviors of RC,UHPFRC and UHPFRC-strengthened columns[J]. Engineering Structures,2019,191:509-525.
- [10] 任亮,万超,喻贤明. 基于 HJC 模型的车辆-桥墩碰撞响应分析[J]. 华东交通大学学报,2022,39(3):24-30.
REN L,WAN C,YU X M. Analysis of vehicle-pier collision response based on HJC model[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(3):24-30.
- [11] 伍敏,黄于倩,潘仁胜,等. NC-UHPC 组合梁抗冲击性能的数值研究[J]. 工程科学学报,2024,46(2):354-364.
WU M,HUANG Y Q,PAN R S,et al. Numerical study on impact resistance of NC-UHPC composite beam[J]. Chinese Journal of Engineering,2024,46(2):354-364.
- [12] FAN W,LIU B,HUANG X,et al. Efficient modeling of flexural and shear behaviors in reinforced concrete beams and columns

- subjected to low-velocity impact loading[J]. Engineering Structures. 2019,195:22-50.
- [13] LIU B,FAN W,HUANG X,et al. A Simplified Method to Predict Damage of Axially-Loaded Circular RC Columns Under Lateral Impact Loading[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2020,14(1):337-352.
- [14] BERTRAND D,KASSEM F,DELHOMME F,et al. Reliability analysis of an RC member impacted by a rockfall using a nonlinear SDOF model[J]. Engineering Structures,2015,89:93-102.
- [15] DAS ADHIKARY S,LI B. Simplified Analytical Models to Predict Low-Velocity Impact Response of RC Beams[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction,2017,23(2):04018002.
- [16] 樊伟,杨涛,申东杰,等. 受压 UHPC 圆形墩柱抗冲击试验及简化分析方法[J]. 中国公路学报,2019,32(11):165-175.
FAN W,YANG T,SHEN D J,et al. Experiments and a Simplified Analytical Method of an Axially Loaded Circular UHPC Column Under Impact Loading[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(11):165-175.
- [17] YI W,ZHAO D B,KUNNATH S K. Simplified approach for assessing shear resistance of reinforced concrete beams under impact loads[J]. ACI Structural Journal,2016,113(4):747-756.
- [18] Weng Z Y. Impact effect of reinforced concrete beam and plate subjected to impact loading[J]. Nuclear Power Engineering,1989,10(3):45-52.
- [19] SUARIS W,SHAH S P. Inertial effects in the instrumented impact testing of cementitious composites[J]. Cement,Concrete and Aggregates,1981,3(2):77-83.
- [20] 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.
- [21] ZHAO D B,YI W J,KUNNATH S K,Numerical simulation and shear resistance of reinforced concrete beams under impact[J]. Engineering Structures,2018,166:387-401.
- [22] FUJIKAKE K,SENGA T,UEDA N. et al. Study on Impact Response of Reactive Powder Concrete Beam and Its Analytical Model[J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2006,41(1):99-108.
- [23] 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.
- [24] THOMAS R,SORENSEN D A. Review of strain rate effects for UHPC in tension[J]. Construction and Building Materials,2017,153:846-856.



第一作者: 任亮 (1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为桥梁抗震与抗撞。E-mail:renliang@ccitu.jx.cn。



通信作者: 方舟 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为桥梁抗撞。E-mail:3525960400@qq.com。