

落石冲击速度对双幅式空心薄壁超高墩动力响应影响研究

张博宇¹, 黄晓敏², 张祐祯³, 周大兴⁴, 孙玉龙⁴, 岳强⁴, 张海潮⁴, 齐勇强⁵, 许维炳^{1*}

¹北京工业大学建筑工程学院, 北京

²昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明

³华北电力大学水利与水电工程学院, 北京

⁴中铁建设集团有限公司, 北京

⁵北京构力科技有限公司, 北京

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年4月27日; 发布日期: 2026年5月8日

摘要

西南山区连续刚构桥常采用空心薄壁超高墩, 其在施工与运营阶段易遭受落石冲击, 结构安全问题突出。为研究落石冲击速度对双幅式空心薄壁超高墩动力响应的影响, 本文以某双幅式空心薄壁超高墩连续刚构桥为工程背景, 基于LS-DYNA建立1:20缩尺有限元模型, 并通过已有钢筋混凝土梁落锤冲击试验对建模方法进行验证; 在此基础上, 系统分析了不同冲击速度下桥墩的塑性损伤分布、撞击力时程特征及横向位移响应规律。结果表明: 随着冲击速度增大, 桥墩塑性损伤持续加剧, 损伤范围由撞击区逐步向系梁连接区及墩底扩展, 撞击力峰值增大、持续时间延长, 较高速度下还会出现再次接触现象; 此外, 随着冲击速度的增大, 桥墩横向位移响应显著增大, 振动周期增大, 残余变形更为明显, 表明高速度冲击下结构易进入塑性变形阶段。

关键词

双幅式超高墩, 空心薄壁墩, 落石冲击, 抗撞性能, 动态响应

Effect of Rockfall Impact Velocity on the Dynamic Response of Twin-Deck Hollow Thin-Walled Super-High Bridge Piers

Boyu Zhang¹, Xiaomin Huang², Youzhen Zhang³, Daxing Zhou⁴, Yulong Sun⁴, Qiang Yue⁴, Haichao Zhang⁴, Yongqiang Qi⁵, Weibing Xu^{1*}

¹College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 张博宇, 黄晓敏, 张祐祯, 周大兴, 孙玉龙, 岳强, 张海潮, 齐勇强, 许维炳. 落石冲击速度对双幅式空心薄壁超高墩动力响应影响研究[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 17-26. DOI: 10.12677/hjce.2026.155111

²College of Architecture and Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

³School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing

⁴China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

⁵Beijing Glory PKPM Technology Co., Ltd., Beijing

Received: April 7, 2026; accepted: April 27, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

Continuous rigid frame bridges in mountainous areas of Southwest China commonly adopt hollow thin-walled super-high piers, which are susceptible to rockfall impacts during construction and service stages, posing significant threats to structural safety. To investigate the influence of rockfall impact velocity on the dynamic response of twin-deck hollow thin-walled super-high bridge piers, this study takes a continuous rigid frame bridge with such piers as the engineering background. A 1:20 scaled finite element model was established using LS-DYNA, and the modeling approach was validated against existing drop-weight impact test results of reinforced concrete beams. Based on the validated model, the plastic damage distribution, impact force time-history characteristics, and lateral displacement responses of the piers under different impact velocities were systematically analyzed. The results indicate that with increasing impact velocity, the plastic damage of the pier intensifies and expands from the impact region to the coupling beam connections and pier base. Meanwhile, the peak impact force increases and the contact duration becomes longer, and secondary contact may occur at higher velocities. In addition, the lateral displacement response of the pier is significantly amplified with increasing impact velocity, accompanied by a longer vibration period and more pronounced residual deformation, indicating that the structure is more likely to enter the plastic deformation stage under high-velocity impacts.

Keywords

Double-Width Super-High Pier, Hollow Thin-Walled Pier, Rockfall Impact, Impact Resistance, Dynamic Response

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

连续刚构桥因跨越能力强、整体受力性能好,被广泛应用于我国西南山区[1],其中空心薄壁超高墩是其常用的桥墩形式[2]。受崩塌、泥石流等地质灾害影响,此类桥梁在施工和运营阶段均易遭受落石冲击[3][4]。由于空心薄壁超高墩柔度大、构造复杂[5],落石作用下不仅容易产生局部损伤,还会引发整体动力响应,威胁桥梁结构安全。

近年来,国内外众多学者围绕桥墩的抗撞击性能以及动力响应规律开展了相关研究。Malek 等[6]通过摆锤冲击试验研究了包含墩柱、承台及桩基的桥梁下部结构整体受撞行为,结果表明随着墩柱截面尺寸增大,墩身横向位移及传递至桩基的应力均明显减小。Heng 等[7]通过双柱式钢筋混凝土桥墩水平冲击试验与有限元分析,系统研究了冲击质量和速度对结构动力响应和损伤演化规律的影响,并据此提出了双柱墩抗撞等效静力计算方法。类似地,吴昊等[8]基于经试验验证的有限元模型,重现了落石撞击下双柱式 RC 梁桥的倒塌破坏过程,并系统分析了落石质量、撞击速度和撞击高度对桥梁动力响应与损伤演

化的影响。张雨琼[9]利用 LS-DYNA 软件系统分析了空心薄壁高墩落石冲击下的损伤演化、动力响应及能量机理,并提出了基于响应面法的损伤评估准则。刘昭昭等[10]以山区现浇式空心薄壁超高墩为研究对象,系统分析了落石冲击高度对桥墩结构体系损伤模式、撞击力及位移动态响应的影响。Wang 等[11]开展了现浇与灌浆套筒连接装配式空心薄壁超高墩纵向冲击试验与数值分析,比较了两类桥墩的破坏模式与动力响应差异。总体来看,现有桥墩抗冲击性能研究仍以实心截面的中矮墩为主,有关空心薄壁高墩的研究集中于单墩形式,针对双幅式空心薄壁超高墩抗冲击性能以及动力响应规律的研究成果相当匮乏。此外,落石冲击速度直接决定冲击动能输入水平,是控制桥墩动力响应与损伤演化的关键参数之一。

鉴于此,本文以某双幅式空心薄壁超高墩连续刚构桥为工程背景,建立并验证了 LS-DYNA 有限元模型,系统分析了不同落石冲击速度下结构的动力响应特征,为同类桥梁抗落石设计提供依据。

2. 工程概况

本文研究对象为我国西南山区某双幅现浇式钢筋混凝土超高墩连续刚构桥。该桥跨径布置为 $88 + 166 + 88$ m, 全长 342 m; 上部结构采用单箱单室变截面混凝土箱梁,主梁根部梁高 10 m,跨中及端部梁高 3.5 m,桥面宽度 12 m,底板宽度 7.5 m; 下部结构采用钢筋混凝土空心薄壁墩,墩高 100 m,墩梁固结形成连续刚构体系。该桥具有典型的山区双幅式、空心薄壁、超高墩特征,能够较好代表西南山区高墩连续刚构桥的工程实际。原型桥的几何信息如图 1 所示。

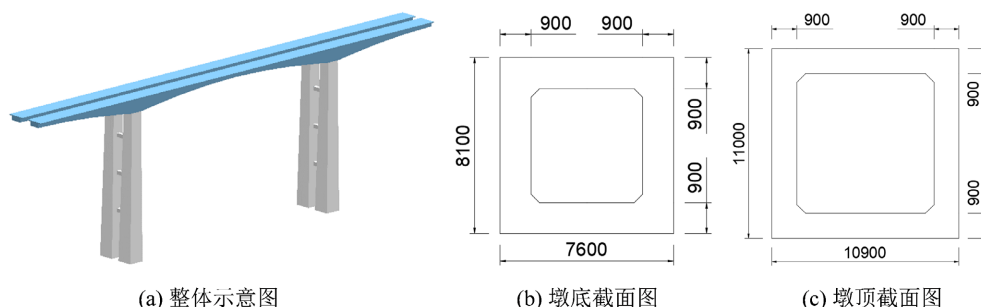


Figure 1. Structural dimensions of prototype bridge (mm)

图 1. 原型桥结构尺寸图(mm)

3. 有限元模型

3.1. 模型建立

为兼顾计算可行性与动力响应相似性,本文使用 LS-DYNA 有限元软件,在原型桥基础上建立了 1:20 缩尺比的双幅式空心薄壁超高墩有限元模型。缩尺模型延续原型桥的基本受力体系与主要构造特征,考虑到几何缩尺后模型质量分布与原型桥存在偏差,通过在主梁及墩身设置附加质量的方式修正整体动力特性,使缩尺模型能够更合理地反映原型桥的冲击响应特征。

缩尺有限元模型采用双幅“T”形布置,总高度为 5500 mm,其中墩身高度 5000 mm、主梁高度 300 mm、承台高度 200 mm。墩身采用矩形空心薄壁等截面形式,纵向向外宽 300 mm、横桥向外宽 290 mm、壁厚 62 mm;沿墩高方向共设置 3 道 $120 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 矩形实心截面的横系梁。为更好模拟试验中的墩底固结条件,模型底部承台按钢承台形式建立。

在建模过程中,钢筋采用 BEAM 梁单元进行模拟,而对主梁、墩身、承台及落石均选取 SOLID 实体单元,以兼顾局部响应模拟精度与整体计算效率。综合网格精度与计算效率,将钢筋网格尺寸取为 20 mm,其余主要构件网格尺寸取 30 mm,所建立的有限元模型如图 2 所示。

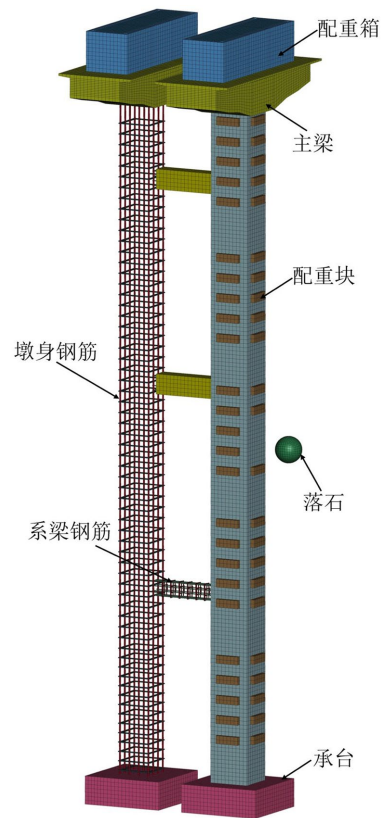


Figure 2. Finite element model of super-high pier
图 2. 超高墩有限元模型

材料本构方面，混凝土采用 LS-DYNA 中的 CSCM 连续盖帽模型。该模型能够较好地考虑混凝土在冲击荷载下的非线性特性及应变率效应，适用于本文所涉及的低速冲击动力分析。钢筋采用随动强化双线性弹塑性模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC)，并通过 Cowper-Symonds 参数考虑应变率效应。对于承台、配重箱、落石等构件则采用*MAT_ELASTIC 弹性材料模型进行模拟。材料模型的具体参数见表 1。

Table 1. Material constitutive model parameters

表 1. 材料本构模型参数

部件	材料模型	参数	数值
混凝土	*MAT_CSCM	密度	2400 kg/m ³
		抗压强度	31.6 MPa
		最大骨料直径	20.3 mm
		失效值	1.05
		弹性模量	210 GPa
钢筋	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC	密度	7850 kg/m ³
		泊松比	0.3
		屈服强度	400 MPa (纵筋) 300 MPa (箍筋)
承台、配重	*MAT_ELASTIC	弹性模量	210 GPa
		泊松比	0.3

通过关键字*CONstrained_LAGRANGE_IN_SOLID 将钢筋梁单元嵌入并耦合到混凝土实体单元中，实现钢筋与混凝土的共同变形与受力传递。接触方面，采用关键字*CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL 建立钢筋笼内纵筋与箍筋的接触关系，以反映碰撞过程中钢筋网格可能产生的相对挤压与接触效应；采用关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 来定义落石与桥墩的接触关系，其中接触摩擦参数取静摩擦系数为0.6，动摩擦系数为0.5；采用关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 定义落石与钢筋笼之间的接触，以保证混凝土表层单元发生失效删除后，落石仍可与内部钢筋笼发生合理接触并继续传递作用力。

3.2. 模型验证

为验证所建立落石-桥墩有限元模型的有效性，现根据 Fujikake 等[12]开展的钢筋混凝土梁落锤冲击试验，对模型中的材料本构、接触设置、求解设置等参数进行验证。试件两端为简支约束条件，落锤冲击位置位于梁跨中区域。参考本文落石-桥墩有限元模型的建模方法，建立钢筋混凝土梁落锤冲击有限元模型如图 3 所示。

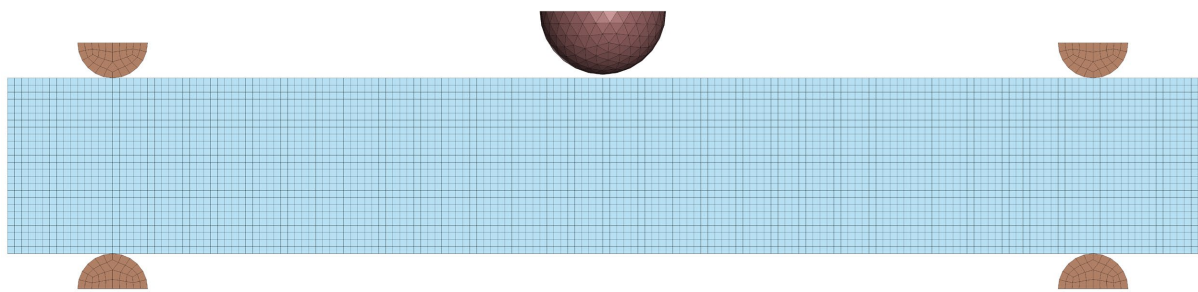


Figure 3. Finite element model of drop hammer impact test
图 3. 落锤冲击试验有限元模型

本文选取纵向钢筋直径为 22 mm 的试验工况进行验证，对落锤试验以及有限元模拟所得的损伤情况、撞击力与跨中位移时程曲线进行对比分析，其中试验与有限元分析所得的试件损伤情况对比如图 4 所示，撞击力与跨中位移时程曲线对比情况见图 5。

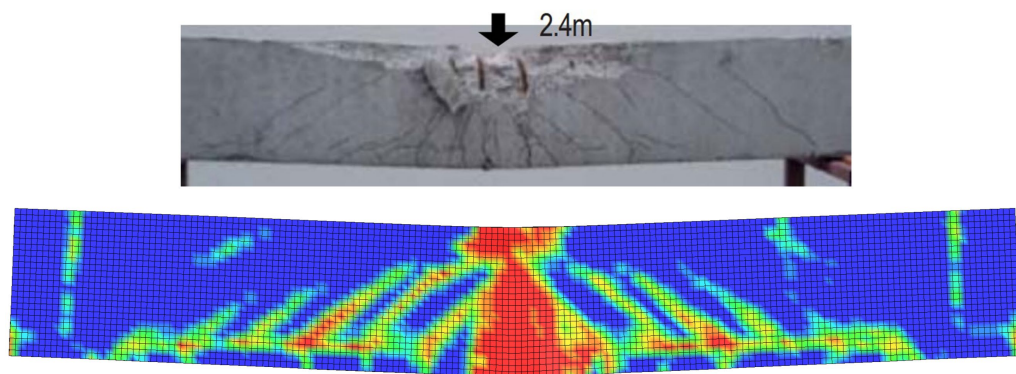


Figure 4. Comparison of specimen damage
图 4. 试件损伤情况对比

如图 4 所示，有限元模型能够较好地反映试件实际的裂缝开展与损伤状态。如图 5 所示，模拟结果与试验结果在撞击力峰值及整体变化趋势上基本一致，其中模拟所得撞击力峰值为 390.5 kN，试验所得

冲击力峰值为 372.2 kN，误差为 4.92%，总体能够较好地反映冲击过程中结构受力特征；跨中位移方面，模拟结果与试验结果在峰值大小及曲线变化趋势上吻合较好，其中模拟所得位移峰值为 33.7 mm，试验所得位移峰值为 32.5 mm，误差为 3.70%，表明模型能够准确模拟试件的整体变形响应。综合来看，所建立有限元模型能够较好地反映试件在冲击作用下的动力响应过程，相关建模方法可用于后续超高墩模型不同冲击速度下的参数分析。

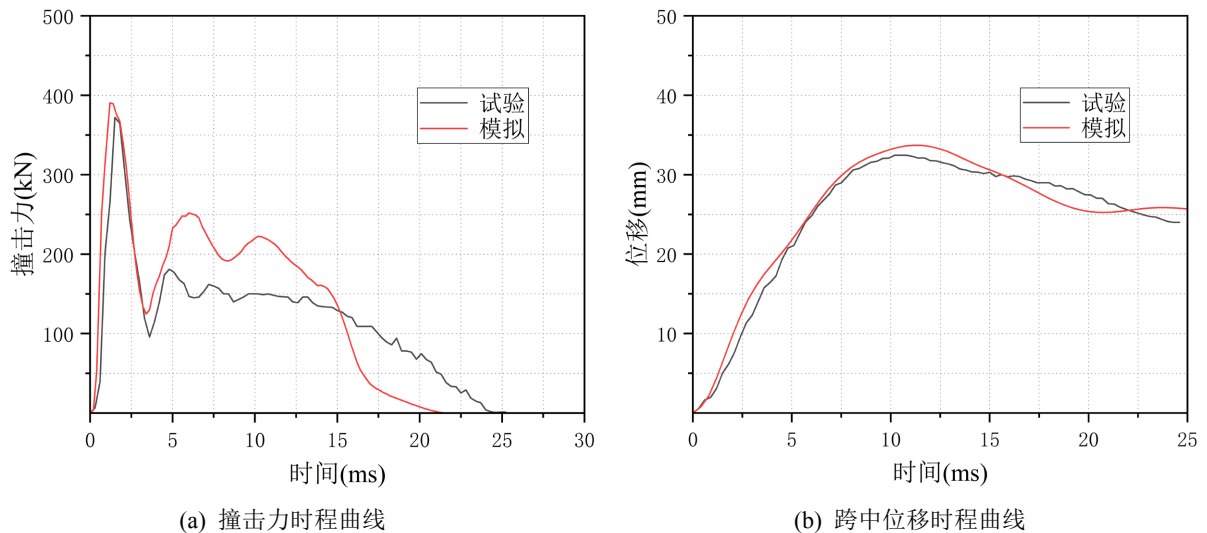


Figure 5. Comparison of simulation results and experimental results

图 5. 模拟结果与试验结果对比图

4. 数值仿真结果分析

本文采用 1:20 缩尺模型进行数值分析，冲击速度的选取需同时满足动力相似关系和工程代表性要求。根据相似理论，模型与原型的速度相似系数为 0.5；同时参考既有空心薄壁超高墩冲击试验与相关研究中的速度取值范围，结合本文参数分析需求，选取模型冲击速度为 2、3、4、5 m/s，分别对应原型落石速度 4、6、8、10 m/s，以考察中低速落石横向冲击作用下双幅式空心薄壁超高墩的动力响应规律。其余计算参数设置如下：落石质量取为 1 t，撞击高度为 2.50 m，混凝土强度等级为 C40，墩身纵筋配筋率为 2.44%。

4.1. 试件损伤情况

图 6 给出了模型桥在受到不同速度落石撞击后的塑性损伤云图。由图 6 可知，损伤首先在撞击点处以受撞面为核心向四周扩展，撞击高度附近表现为局部压剪耦合导致的高损伤区，随后，冲击效应沿墩身传播并通过横系梁传递给相邻桥墩，导致相邻桥墩也出现不同程度的损伤响应，表明双幅式桥墩存在显著的整体受力和联动变形。随着冲击速度由 2 m/s 增大至 5 m/s，落石输入动能水平持续提高，试件塑性损伤程度持续加重，损伤范围逐步扩大，表明冲击速度增大将显著增强桥墩的局部破坏与整体动力响应。

4.2. 撞击力

图 7 给出了模型桥在受到不同速度落石撞击后的撞击力时程曲线。由图 7 所示，不同速度工况下(2 m/s、3 m/s、4 m/s、5 m/s)的撞击力峰值分别为 354.05 kN、460.34 kN、518.91 kN 和 565.17 kN，相对于

2 m/s 工况, 3 m/s、4 m/s、5 m/s 工况下的撞击力峰值分别提高了 29.86%、46.39%和 59.44%。由此可见, 随着落石速度的增大, 落石与桥墩之间的撞击力峰值逐渐提高, 对应的峰值出现时刻呈现提前趋势, 撞击力持续时间整体有所延长。

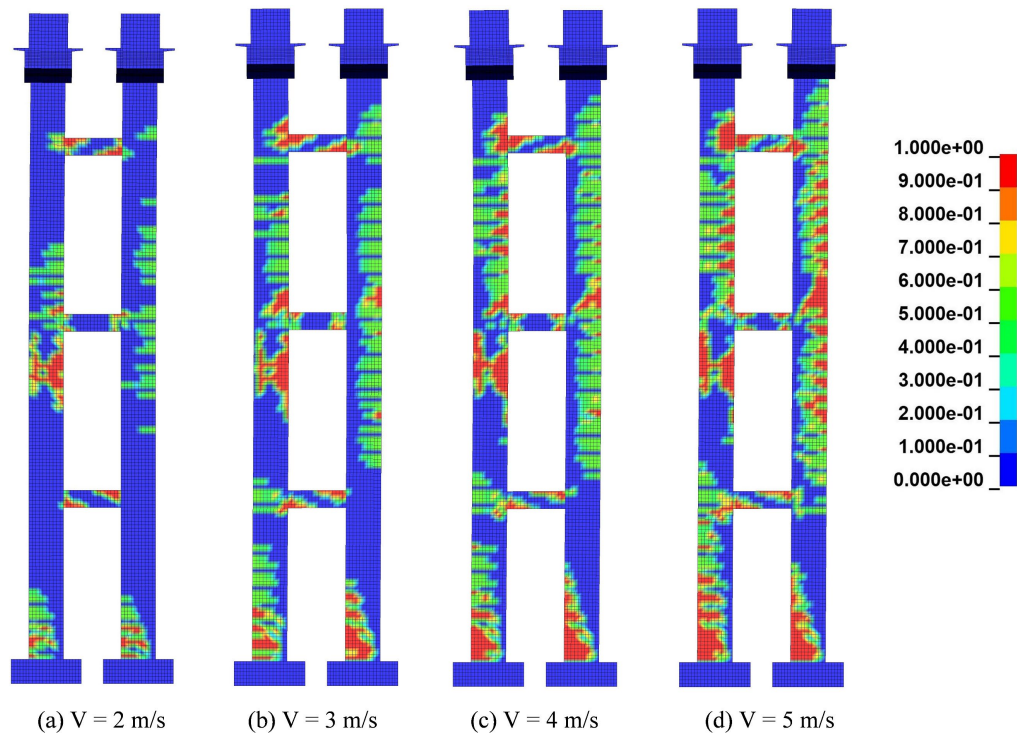


Figure 6. Plastic damage cloud diagram under different impact velocities
图 6. 不同冲击速度下的塑性损伤云图

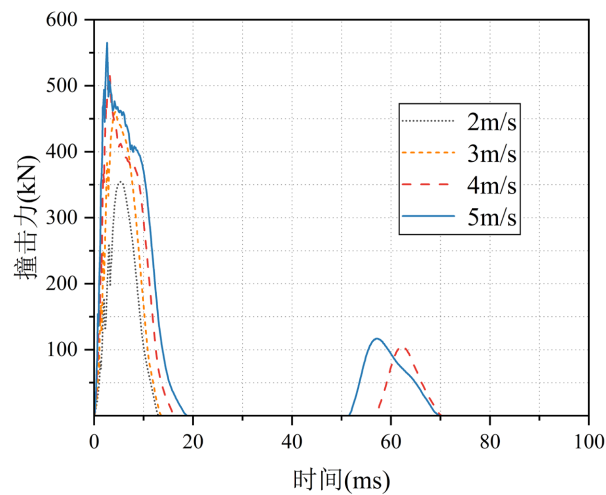


Figure 7. Impact force time history curves at different impact velocities
图 7. 不同冲击速度下的撞击力时程曲线

4.3. 位移响应

试件在不同速度工况下的横向位移时程曲线整体形态较为一致, 以冲击速度为 4 m/s 的工况为例, 图

8 给出了受撞桥墩 A 墩从低到高共 7 个位置处的位移时程曲线。由图 8 可知, 试件受到撞击后, 各测点位移在短时间内迅速上升并达到正向峰值, 随后进入往复振动阶段, 振动幅值随时间逐步衰减并最终趋于稳定。基于上述曲线特征, 本文选取撞击点处与受撞桥墩的墩顶处作为典型位置, 对不同冲击速度下桥墩的横向位移响应进行对比分析, 撞击点与墩顶处位移时程曲线见图 9, 相应的位移峰值对比情况见表 2。

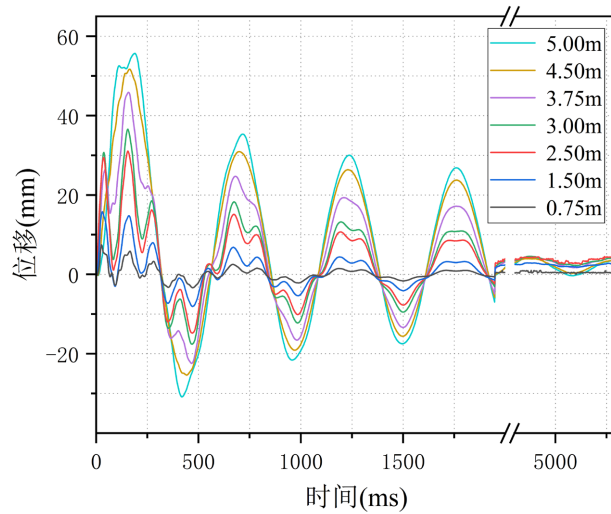


Figure 8. The time history curve of pier displacement at impact velocity of 4 m/s
图 8. 冲击速度 4 m/s 时桥墩位移时程曲线

由图 9 和表 2 所示, 桥墩在各速度工况下的撞击点处和墩顶位移均快速达到正向峰值, 随后发生正负交替的往复振动并逐步稳定。随着撞击速度由 2 m/s 提高至 5 m/s, 两类试件撞击点与墩顶处位移的正向峰值均整体增大, 分别从 12.01 mm 增加到 31.06 mm 和从 16.97 mm 增加到 55.12 mm。此外, 曲线在高速工况下的振动周期较低速工况更大, 反映出随着撞击速度的提升以及墩身损伤的发展, 桥墩的等效侧向刚度降低, 进而使体系振动频率降低、振荡周期增大。

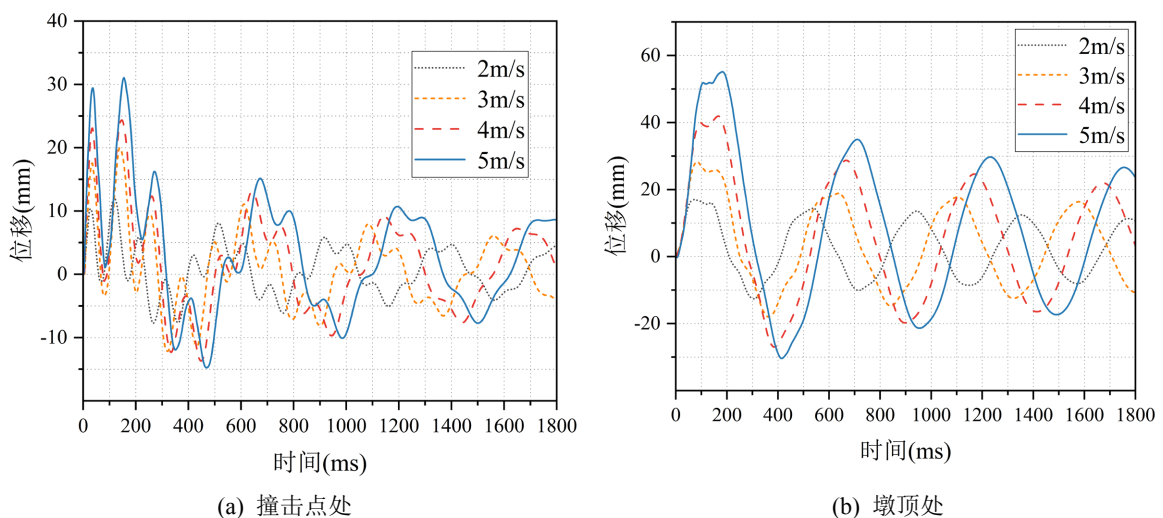


Figure 9. Pier displacement time history curve comparison diagram
图 9. 桥墩位移时程曲线对比图

Table 2. Impact point and pier top displacement data summary**表 2.** 撞击点与墩顶位移数据汇总

落石速度(m/s)	撞击点峰值位移(mm)	墩顶峰值位移(mm)	振动周期(ms)
2	12.01	16.97	0.42
3	19.95	28.34	0.48
4	24.35	41.90	0.50
5	31.06	55.12	0.52

5. 总结

本文以我国西南山区某双幅式空心薄壁超高墩连续刚构桥为工程背景，基于相似理论建立了 1:20 缩尺有限元模型，并通过钢筋混凝土梁落锤冲击试验结果对建模方法进行了验证。在此基础上，围绕落石冲击速度这一关键因素，系统分析了不同速度工况下双幅式空心薄壁超高墩的塑性损伤特征、撞击力时程响应及横向位移变化规律。主要研究结论如下：

(1) 随着落石冲击速度增大，双幅式空心薄壁超高墩的塑性损伤持续加剧，损伤范围逐步扩大。损伤首先集中于受撞墩撞击区，并进一步向系梁 - 墩身连接区及墩底扩展；同时，冲击效应可通过横系梁传递至相邻桥墩，使双幅桥墩体系表现出明显的整体受力与联动损伤特征。

(2) 不同速度工况下，撞击力均主要集中于接触初始阶段，且随着冲击速度的提高，撞击力峰值逐渐增大，峰值出现时刻提前，作用持续时间整体延长。

(3) 随着冲击速度由 2 m/s 增至 5 m/s，桥墩横向位移响应显著增强，振动周期增大，残余位移更为明显，其中墩顶残余位移由 2.56 mm 增至 6.72 mm (增大了 162.50%)。这表明随着落石冲击速度的增大，桥墩更易进入不可恢复塑性变形阶段。

(4) 超高墩受水平冲击问题是一项复杂的动力分析问题，本文仅考虑了落石速度的变化，且桥墩受冲击位置单一，因此本研究仍存在不足之处。后续可进一步结合山区桥位地形、边坡条件及落石运动轨迹，建立桥墩 - 落石 - 地形耦合作用分析模型，并考虑落石质量、冲击角度和冲击高度等参数的变化，加强对撞后剩余承载能力、损伤演化及安全评估方法的研究。

基金项目

北京建工集团有限责任公司科技计划项目(RZCA500620220001)，云教科教便[2021]91 号。

参考文献

- [1] 闫维明, 罗振源, 许维炳, 等. 近断层脉冲型地震动作用下高墩连续刚构桥振动台试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(8): 868-878.
- [2] 王菲, 田山坡, 糕一. 高墩大跨连续刚构桥的稳定性分析[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(10): 57-62.
- [3] 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.
- [4] 曾浩楠, 何沛建, 冯侠, 等. 泥石流冲击桥梁结构研究综述[J]. 公路交通技术, 2024, 40(6): 30-41.
- [5] 王瑾, 许维炳, 杜修力, 等. 现浇及装配式超高墩连续刚构桥碰撞响应及其影响试验[J]. 中国公路学报, 2024, 37(9): 68-82.
- [6] Malek, M.A.A., Rashid, R.S.M., Shukri, A.A., et al. (2021) Experimental Study of Impact Loading Effect on Bridge Substructures Including Piles. *Structures*, 31, 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.010>
- [7] Heng, K., Chen, T., Li, R., et al. (2023) Dynamic Behaviors and Equivalent Static Force of Double-Column Pier under Horizontal Impact. *Structures*, 49, 1093-1111. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.016>

- [8] 吴昊, 肖方胜, 李瑞文. 落石撞击下双柱式 RC 梁桥的倒塌破坏分析[J]. 中国公路学报, 2024, 37(5): 94-107.
- [9] 张雨琼. 空心薄壁高墩抗落石冲击性能及损伤评估准则[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [10] 刘昭昭, 陈彦江, 许维炳, 等. 落石冲击高度对混凝土空心薄壁超高墩桥梁结构体系动力响应影响研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1046-1055.
- [11] Wang, J., Xu, W., Wang, J., *et al.* (2025) Experimental and Numerical Investigation on the Dynamic Performance of Cast-in-Place and Precast Hollow Ultra-High Piers under Longitudinal Impact. *Thin-Walled Structures*, **208**, Article 112850. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112850>
- [12] Fujikake, K., Li, B. and Soeun, S. (2009) Impact Response of Reinforced Concrete Beam and Its Analytical Evaluation. *Journal of Structural Engineering*, **135**, 938-950. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000039)