

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

刘昭昭¹, 陈彦江¹, 陈作银², 刘少华², 彭光达², 张玉彬³, 江维洪⁴, 段文红⁴, 许维炳¹

¹北京工业大学建筑工程学院, 北京

²北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京

³中国铁路北京局集团有限公司北京工务段, 北京

⁴大理大南高速公路有限公司, 云南 大理

收稿日期: 2025年4月14日; 录用日期: 2025年5月6日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

空心薄壁超高墩在山区、河谷桥梁中十分常见, 但有关其抗撞性能的研究成果相对匮乏。因此, 本文以某山区现浇式超高墩连续刚构桥为原型桥, 基于Ls-dyna有限元软件建立了落石冲击条件下1:20缩尺两联钢筋混凝土空心薄壁超高墩分析模型, 并基于既有试验成果验证, 进而探究了落石冲击高度对空心薄壁超高墩的撞击响应和损伤失效模式的影响。结果表明: 空心薄壁超高墩受落石冲击的局部损伤模式与中矮墩相似。撞击高度对撞击力影响较小, 但对结构位移响应影响较大。

关键词

超高墩, 落石冲击, 抗撞性能, 损伤模式, 数值模拟

Study on Dynamic Response of Rockfall Impact Height to Concrete Hollow Thin Wall Ultra-High Pier Bridge Structure System

Zhaozhao Liu¹, Yanjiang Chen¹, Zuoyin Chen², Shaohua Liu², Guangda Peng², Yubin Zhang³, Weihong Jiang⁴, Wenhong Duan⁴, Weibing Xu¹

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

²Beijing National Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing

文章引用: 刘昭昭, 陈彦江, 陈作银, 刘少华, 彭光达, 张玉彬, 江维洪, 段文红, 许维炳. 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. DOI: 10.12677/hjce.2025.145112

³Beijing Construction Section of China Railway Beijing Bureau Group Co., Ltd., Beijing⁴Dali Da Nan Highway Co., Ltd., Dali YunnanReceived: Apr. 14th, 2025; accepted: May 6th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

Hollow thin-walled ultra-high piers are very common in bridges in mountainous areas and river valleys, but the research results on their collision resistance are relatively scarce. Therefore, in this paper, a continuous rigid frame bridge with cast-in-place ultra-high piers in a mountain area is taken as the prototype bridge. Based on Ls-dyna finite element software, an analysis model of the impact of rock fall on two reinforced concrete hollow thin-wall ultra-high piers with a scale ratio of 1:20 is established, and verified by the existing test results. The effect of rockfall impact height on the impact response and damage failure mode of the hollow thin-walled ultra-high pier is investigated by using the verification model. The results show that the local damage mode of the hollow thin-walled ultra-high pier under rockfall impact is similar to that of the medium-low pier. The impact height has little effect on the impact force, but a great effect on the displacement response of the structure.

Keywords

Ultra-High Pier, Rockfall Impact, Crashworthiness, Damage Model, Numerical Simulation

Copyright © 2025 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

混凝土空心薄壁超高墩是山区、河谷桥梁中常见的墩柱型式。而山区地形较为复杂，山体滑坡、崩塌、落石等自然地质灾害频繁[1]，这给混凝土空心薄壁超高墩安全带来了重大安全隐患。混凝土空心薄壁超高墩的抗撞性能研究意义重大。

现有阶段已有很多学者通过试验研究和数值仿真对桥梁墩柱的撞击动力响应和破坏模式进行了系列研究。Wu 等[2]利用 Ls-dyna 探究了落石直径、冲击速度、冲击位置等参数对空心桥墩动力响应和损伤模式的影响，结果表明空心桥墩在落石冲击下容易发生严重的局部破坏。类似地，张雨琼[3]基于 Ls-dyna 有限元软件研究了空心薄壁高墩在落石撞击下的抗撞性能，并以此建立了基于落石初始冲击速度和落石直径的桥墩快速损伤评估方法。Xie 等[4]研究了不同截面形式的桥墩在落石冲击作用下的动力响应和易损性，结果表明圆形柱的抗撞性能明显优于方形柱。Zhang 等[5]研究了落石与铁路桥桥墩碰撞造成的冲击力、桥梁响应和轨道结构变形规律，指出落石撞击引起的额外轨道不平顺会显著影响列车运行安全指标。

现有研究成果表明，桥墩抗撞击性能和撞击响应规律是目前学者们研究的热点，但现有的研究主要针对中小跨径桥梁的中矮墩(墩高 < 40 m)，且目前的研究成果多集中于单墩构件，针对山区、河谷等区域的高墩、超高墩桥梁结构体系撞击响应规律及损伤失效模式研究成果十分匮乏。

基于此，本文以某山区现浇式超高墩连续刚构桥为原型桥，基于 Ls-dyna 有限元软件建立了缩尺比为 1:20 的两联钢筋混凝土空心薄壁超高墩桥梁结构体系受落石冲击分析模型，探究了落石撞击高度对混凝土空心薄壁超高墩桥梁结构体系撞击响应和损伤失效模式的影响规律。

2. 有限元模型建立与验证

2.1. 模型参数及验证

2.1.1. 材料本构模型

连续盖帽模型(CSCM)的可靠性已经在许多论文[2] [6] [7]中得到验证。因此，混凝土采用连续盖帽混凝土模型 MAT_CSCM_CONCRETE，使用双线性本构模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模拟钢筋；梁上配重不参与受力使用弹性材料模型 MAT_ELASTIC 模拟。各个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

类型	本构模型	参数	数值
混凝土	MAT_CSCM_CONCRETE	Mass density	8865 kg/m ³
		Compression strength	33 MPa
		Aggregate size	15 mm
		Rate effects	1
		ERODE	1.075
钢筋	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	Mass density	7800 kg/m ³
		Yield stress	548 MPa
		Tangent modulus	1500 MPa
		C (strain rate parameter)	40
		P (strain rate parameter)	5
		Failure strain	0.12

2.1.2. 接触设置

落石与桥墩间的接触使用关键字 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 定义，其中静摩擦系数设置为 0.6，动摩擦系数设置为 0.5 [7] [8]；主从面刚度的比例因子 SFM 和 SFS 都设置为 0.5。墩身混凝土破坏后落石与钢筋间的接触关系、相邻联主梁间接触均使用关键字 CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE 定义。

2.1.3. 参数验证

为验证材料本构模型和接触设置的有效性，选用 Jacobus Marius Louw [9]等进行的落锤冲击试验进行模型验证，如图 1 所示。

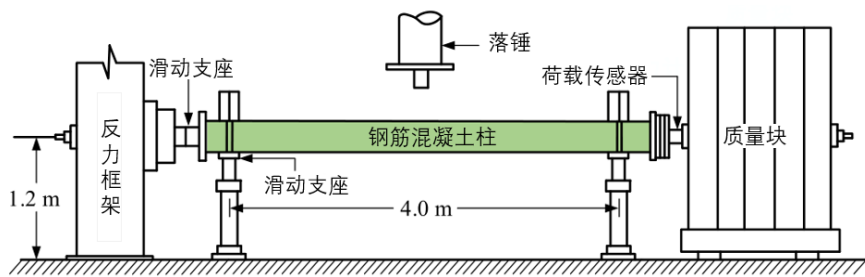


Figure 1. Drop hammer impact test diagram
图 1. 落锤冲击试验图

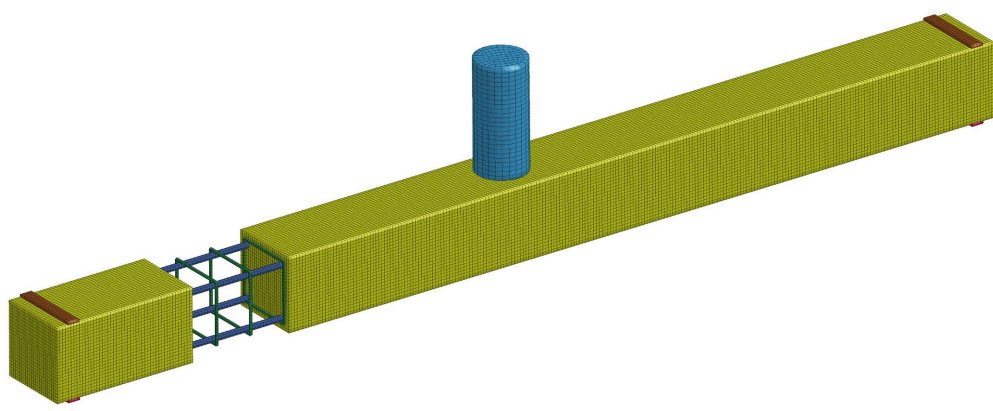


Figure 2. Finite element model of rockfall impact test
图 2. 落石冲击试验有限元模型图

根据模型参数，使用 Ls-dyna 有限元软件建立模型，图 2 为落锤冲击试验有限元模型。数值模拟的撞击力时程与位移时程如图 3、图 4 所示。由图 3、图 4 可知，模拟所得峰值撞击力为 701 kN，与试验值基本一致(706 kN)；模拟所得的柱中峰值位移和残余位移分别为 30 mm 和 5.5 mm，与试验值也基本一致(31 mm 和 6 mm)。图 5 为试验裂缝扩展图，图 6 为数值模拟的有效塑性应变云图。由图 5、图 6 可知，数值模型能够很好地表征试验模型的损伤状态，试件裂缝等损伤分布与数值模拟结果基本一致。综上，相关数值建模和参数选取方法可用于后续超高墩撞击性能参数影响分析中。

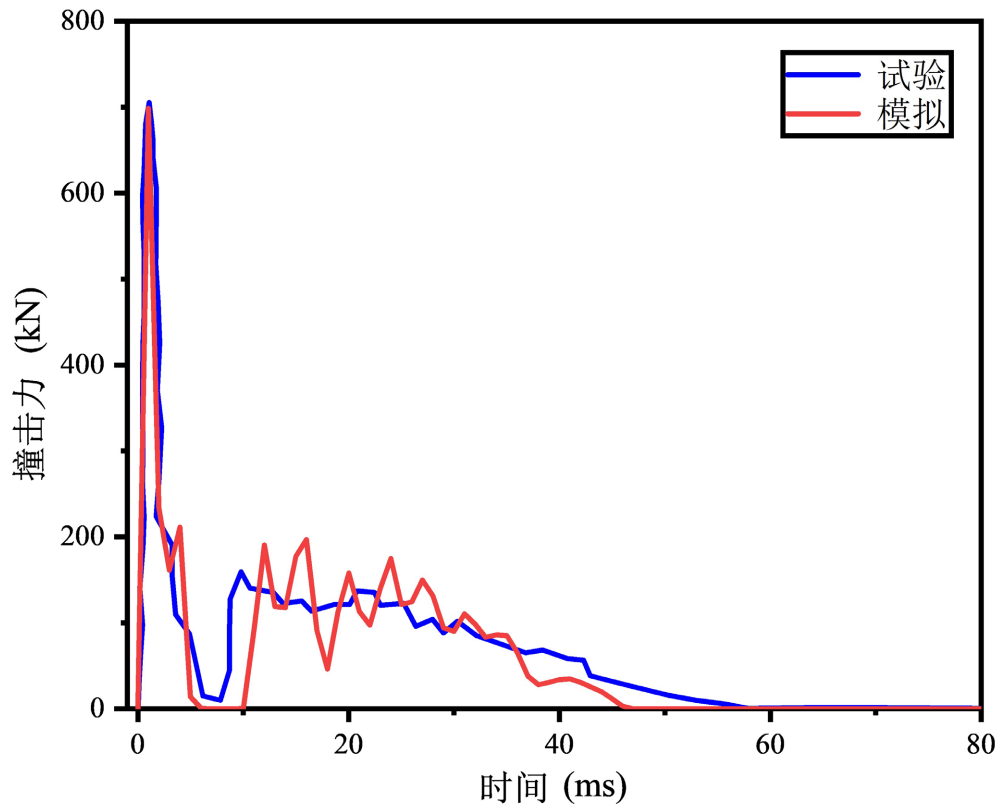


Figure 3. Comparison of impact force
图 3. 撞击力比较

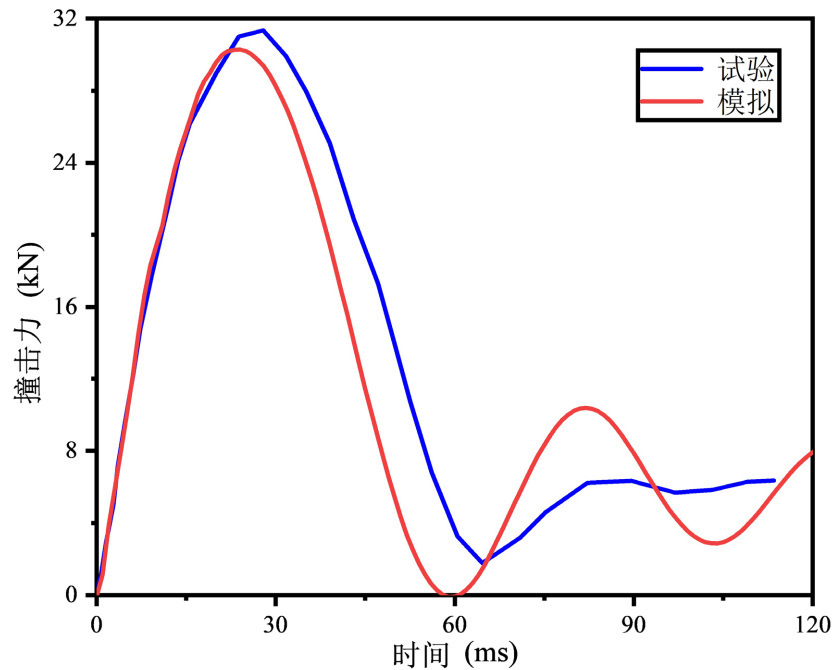


Figure 4. Mid-span displacement comparison
图 4. 跨中位移比较

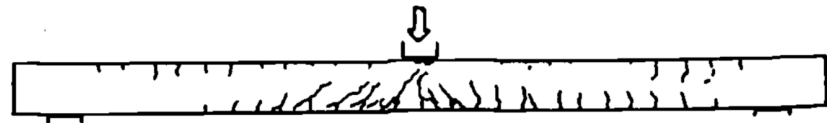


Figure 5. Test fracture propagation diagram
图 5. 试验裂缝扩展图

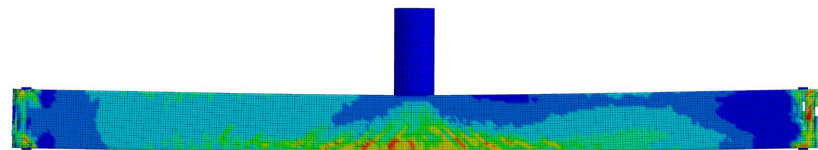


Figure 6. Numerical simulation of effective plastic strain cloud image
图 6. 数值模拟有效塑性应变云图

2.2. 桥墩 - 落石模型

本文研究落石 - 桥墩刚性撞击，不考虑落石的变形，因此落石采用刚体本构模型(SOLID164)进行模拟。桥墩原型是位于中国西南山区某座现浇式超高墩连续刚构桥及其引桥。考虑到数值仿真分析的效率以及后续缩尺试验规模、场地和经费限制，确定模型的几何缩尺比例 1:20，基于相似原理通过量纲分析得到模型桥关键参数的相似系数。模型使用 Ls-dyna 有限元软件建立。

图 7 给出了原型桥整体示意图、桥墩混凝土的有限元模型图和钢筋笼有限元模型示意图。混凝土采用实体单元模拟，钢筋采用梁单元模拟，模型中的材料本构模型和接触设置与 2.1 节一致，桥墩底部完全固接，单元尺寸为 20 mm，两联之间的伸缩缝用 7 mm 间隔来模拟。整个模型的单元总数为 140,924 个，实体单元有 120,860 个，梁单元有 20,064 个。

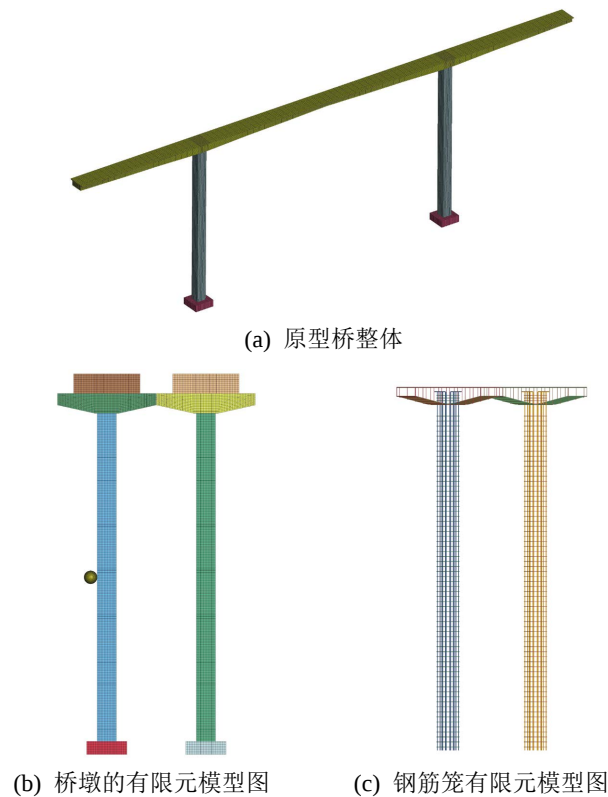


Figure 7. Bridge model drawing

图 7. 桥梁模型图

3. 数值模拟分析结果

根据前人的研究,桥墩的落石撞击一般发生在桥墩的中下部[10],为全面了解不同撞击位置对超高墩桥梁结构体系撞击响应和损伤失效模式的影响,确定了 6 组撞击高度。不同撞击高度时落石的直径为 $d = 100 \text{ mm}$,撞击速度为 $v = 2 \text{ m/s}$,撞击能量 $E = 2199.36 \text{ J}$ (相当于原型桥遭受质量为 33 t ,撞击能量为 $65,345 \text{ J}$ 的落石撞击[11])撞击位置距墩底距离在 $1/8 h \sim 6/8 h$ 范围内(h 为墩高)。

3.1. 有效塑性应变云图

图 8 给出了不同撞击高度条件下模型桥的有效塑性损伤云图。由图 8 可知,被撞联受到落石冲击时,撞击点和墩底部位出现斜裂缝和横向裂缝,发生弯剪破坏,随着撞击高度的增加,破坏程度慢慢增大。不同撞击高度条件下,被撞联的易损部位包括受冲击侧墩底、撞击部位及其临近区域对侧、受冲击侧墩顶或墩梁固结区域。相邻联的易损部位则是受冲击对侧墩顶区域和受冲击侧墩底区域。随着撞击高度的上移,被撞联受冲击对侧的有效塑性应变区域也上移。且墩底三角损伤区域和撞击部位对侧临近损伤区域间始终存在损伤反转区域(反弯点),反弯点的位置大约在撞击位置与桥墩墩底之间的中间位置[12][13],反弯点的下部为悬臂柱受力模式,反弯点的上部为简支柱受力模式。这一结论与空心墩中矮墩受落石冲击时的损伤模式相一致[2]。

需要指出的是当撞击高度超出了 $5/8 h$ 时,上部主梁也开始出现塑性应变。当撞击高度超出了 $1/5 h$ 时相邻联出现塑性应变,且相邻联的损伤程度随着撞击高度的增大而增大。此外,本文分析工况下被撞联和相邻联的有效塑性应变发展规律和模式基本相同,因此后续章节中不再分析有效塑性应变云图的发展规律及模式。

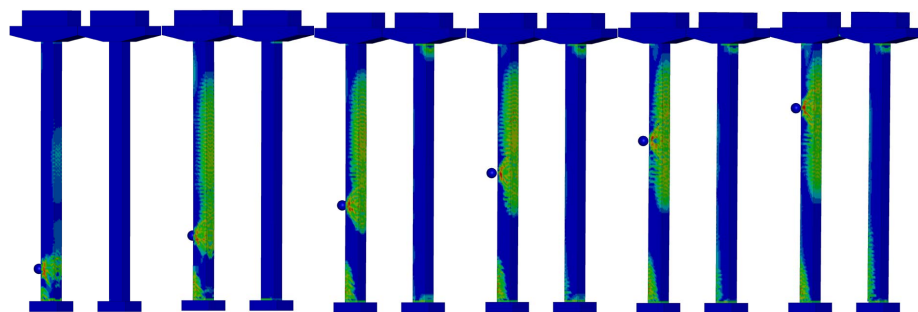


Figure 8. Model effective plastic strain cloud image at different impact heights

图 8. 不同撞击高度时模型有效塑性应变云图

3.2. 撞击力

图 9 给出了不同撞击高度时落石与桥墩间以及两联间的撞击力时程曲线。如图 9 所示，当桥墩受到撞击时，撞击力迅速增大，从 0 增至最大值只需 5 ms，随着撞击高度的增加，撞击力的最大值并没有发生很大变化，始终保持在 103 kN~109 kN 之间，即峰值撞击力受撞击高度的影响很小，这是因为撞击能量相同时撞击力主要受局部接触刚度影响。随着撞击高度的增加整个撞击的持续时间(40 ms 增加到 80 ms)和撞击力峰值个数也在增加(1 个增加到 3 个)，这是因为随着撞击高度的增加桥墩的等效刚度变小，落石与桥墩发生分离再接触的情况增多。

此外，可将两联的撞击划分为三个级别，级别一：低响应冲击，当撞击高度低于 $1/4 h$ 时，被撞联与相邻联发生多次碰撞但撞击对相邻联的冲击作用很小，相邻联的变形很小；级别二：中响应冲击，撞击高度超过 $1/4 h$ 低于 $1/2 h$ 时，被撞联与相邻联之间仅发生一次碰撞，相邻联受到的冲击作用增大，相邻联变形增大；级别三：高响应冲击，撞击高度超过 $1/2 h$ 时，被撞联与相邻联之间的碰撞次数再一次增加，相邻联受到的冲击作用显著增大。且当撞击高度超过 $3/8 h$ 时，两联间的撞击力开始大于落石与被撞联之间的撞击力。这是因为随着撞击高度的增加，桥墩的侧向刚度变小，有更多的撞击能量转变为被撞联的动能。

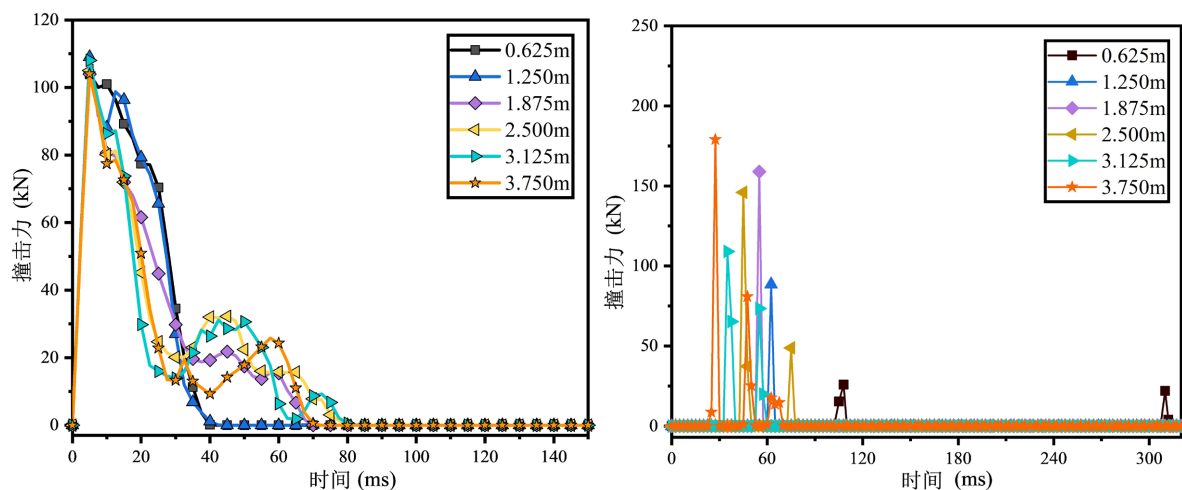


Figure 9. Impact force between falling rock and pier and between two spans

图 9. 落石与桥墩间以及两联间的撞击力

3.3. 位移

图 10 给出了不同撞击高度时被撞联与相邻联的位移响应，由图 10(a)、图 10(b)可知，随着撞击高度

的增加, 撞击点的最大位移从 2.5 mm 增加到 35.8 mm, 残余位移从 2 mm 增加到 26.1 mm。且位移响应持时也随之增大。被撞联墩顶的最大位移从 7.5 mm 增加到 43.5 mm, 残余位移从 2 mm 增加到 28 mm。造成这种现象的原因是撞击点较低时, 被撞联的损伤主要为冲击位置的局部损伤, 此阶段随着撞击高度增大 P-delta 效应有减小趋势; 而随着撞击高度的进一步增大, 桥墩除发生撞击点损伤外, 墩顶墩底也会发生伴随性损伤, 且桥墩的侧向刚度越来越小, 所以墩顶位移越来越大。由图 10(c)可知, 相邻联的横向位移从墩顶至墩底依次减小。由图 10(d)可知, 随着撞击高度的增加, 相邻联墩顶的最大位移和残余位移依次增加, 最大位移从 4.5 mm 增至 59 mm, 残余位移从 0 mm 增至 47.5 mm。这也主要由于随着撞击高度的增加, 相邻联碰撞加剧, 相邻联动力响应和损伤增加。

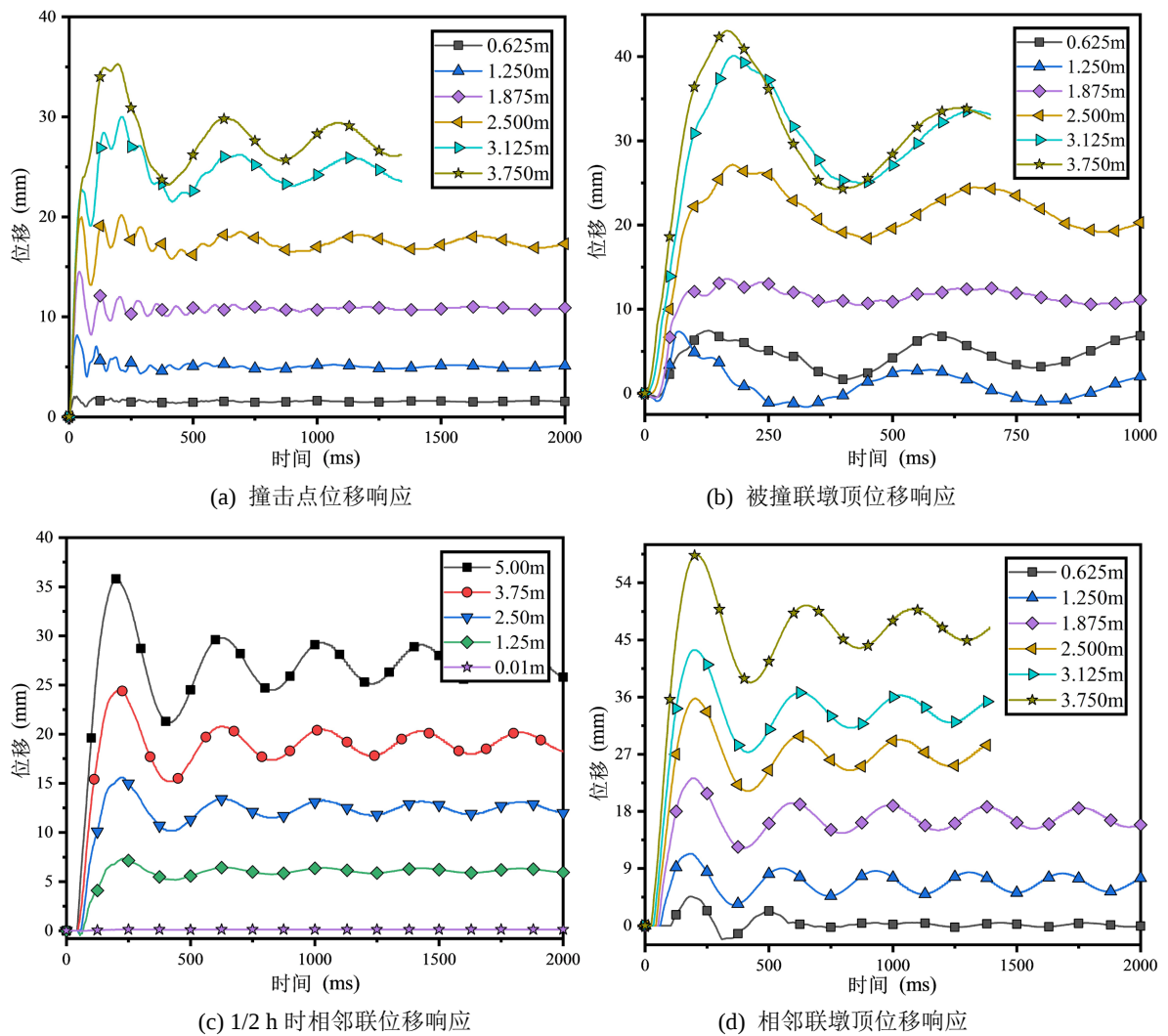


Figure 10. Displacement response of the hit link and the adjacent link at different impact heights

图 10. 不同撞击高度时被撞联与相邻联的位移响应

图 11 给出了不同撞击高度时被撞联和相邻联关键时刻沿墩高的横向位移。由图 11 可知, 随着撞击高度的增加, 桥墩受冲击的损伤模式一致, 但其最终状态会随着撞击高度变化。撞击高度为 $1/8h$ 时, 撞击瞬间撞击点出现局部变形, 随后应力波沿着桥墩纵向传播, 桥墩的最大位移点向墩顶方向转移, 随后桥墩振动耗能直至最终状态。而试件的最终状态从开始的一阶形态变为二阶形态, 最终又变为一阶形态。

其原因是撞击高度较低时, 损伤主要集中在下部, 而撞击高度在 $1/4h \sim 3/8h$ 时, 损伤主要由撞击点控制, 墩顶和墩底损伤均较严重, 而当撞击高度进一步增加时, 损伤则主要集中于桥墩上部。

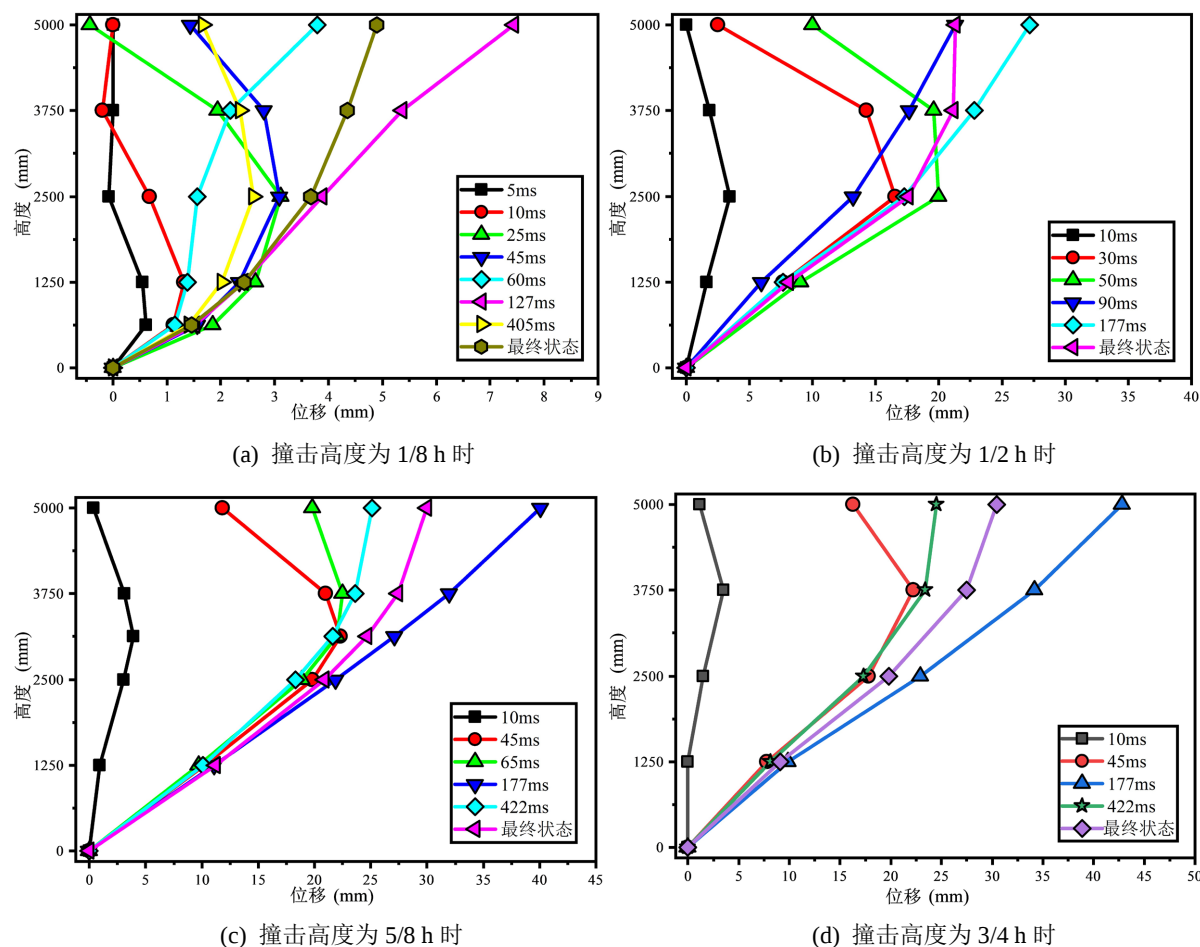


Figure 11. Displacement distribution along pier height at the critical moment of impact pier

图 11. 被撞墩关键时刻沿墩高的横向位移分布

4. 结论

本文基于某既有 RC 梁落锤撞击性能试验, 验证了 Ls-dyna 有限元软件建立的落锤-RC 梁冲击性能数值仿真模型, 进而系统分析了不同撞击高度条件下, 落石冲击对连续桥梁结构的动力响应和损伤特性, 重点探讨了被撞墩及相邻墩的有效塑性应变分布规律、撞击力时程演化特征、位移响应变化趋势及桥墩损伤形态的演进机制。主要研究成果如下:

(1) 落石撞击点及其邻近区域、桥墩底部和墩梁固结部位是主要的易损部位。随着撞击高度的升高, 损伤程度逐步增强, 且撞击点和墩底间形成了反弯点, 在撞击荷载作用下反弯点下方墩身呈悬臂柱受力模式; 反弯点上方墩身呈简支柱受力模式。

(2) 撞击高度的变化对撞击力峰值影响不大, 但导致碰撞过程延长, 力峰数量增多, 说明撞击力主要受局部刚度控制, 与高度关联度较低; 桥墩位移响应呈现显著非线性增长, 尤其是墩顶和撞击点的最大位移及残余位移均随撞击高度显著增大, 相邻墩的横向响应也明显增强, 表现出高度相关的传递耦合效应; 最后根据撞击高度的变化将落石撞击分为三个级别(低响应冲击、中响应冲击和高响应冲击)。

(3) 尽管本研究较为系统地揭示了撞击高度对桥墩及桥联体系响应的影响规律,但仍存在可进一步深化的研究方向,未来研究可考虑撞击速度、质量、角度等因素的耦合效应,从多维参数空间探索落石撞击行为的复合作用机理。

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] 宋东旭. 落石冲击隧道洞口结构砂垫层的缓冲效果研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(8): 136-139.
- [2] Zhao, W., Feng, H., Ye, J. and Qian, J. (2023) Dynamic Responses and Damage Behavior of Hollow RC Piers against Rockfall Impact. *Thin-Walled Structures*, **187**, Article ID: 110771. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110771>
- [3] 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.
- [4] Xie, R., Fan, W., Liu, B. and Shen, D. (2020) Dynamic Behavior and Vulnerability Analysis of Bridge Columns with Different Cross-Sectional Shapes under Rockfall Impacts. *Structures*, **26**, 471-486. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.042>
- [5] Zhang, X., Wang, X., Chen, W., Wen, Z. and Li, X. (2020) Numerical Study of Rockfall Impact on Bridge Piers and Its Effect on the Safe Operation of High-Speed Trains. *Structure and Infrastructure Engineering*, **17**, 1-19. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1730406>
- [6] Gholipour, G. and Billah, A.M. (2022) Numerical Investigation of Shape-Memory Alloy-Reinforced Bridge Columns Subjected to Lateral Impact Loads. *Journal of Bridge Engineering*, **27**, Article ID: 04022063. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001898](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001898)
- [7] Zhao, W. and Ye, J. (2022) Dynamic Behavior and Damage Assessment of RC Columns Subjected to Lateral Soft Impact. *Engineering Structures*, **251**, Article ID: 113476. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113476>
- [8] Thilakarathna, H.M.I., Thambiratnam, D.P., Dhanasekar, M. and Perera, N. (2010) Numerical Simulation of Axially Loaded Concrete Columns under Transverse Impact and Vulnerability Assessment. *International Journal of Impact Engineering*, **37**, 1100-1112. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.06.003>
- [9] Louw, J.M., Maritz, G. and Loedolff, M.J. (1992) The Behaviour of RC Columns under Impact Loading. *Civil Engineering*, **11**, 371-378.
- [10] 顾乡, 余志祥, 赵雷, 等. 落石冲击能量对山区桥梁损伤的影响[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1131-1137.
- [11] 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.
- [12] Sharma, H., Gardoni, P. and Hurlbaas, S. (2014) Probabilistic Demand Model and Performance-Based Fragility Estimates for RC Column Subject to Vehicle Collision. *Engineering Structures*, **74**, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.017>
- [13] Tsang, H. and Lam, N.T.K. (2008) Collapse of Reinforced Concrete Column by Vehicle Impact. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **23**, 427-436. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00549.x>