

引用本文:韩万水,王 睿,张景峰,等.落物竖向冲击下 PC 装配式简支箱梁桥动力响应及损伤分析[J].建筑科学与工程学报,2021,38(2):26-37.

HAN Wan-shui, WANG Rui, ZHANG Jing-feng, et al. Dynamic Response and Damage Analysis of Simply Supported PC Prefabricated Box Girder Bridge Under Vertical Impact of Dropped Cargo[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 26-37.

DOI:10.19815/j.jace.2020.04067

落物竖向冲击下 PC 装配式简支箱梁桥动力响应及损伤分析

韩万水,王 睿,张景峰,孔令云

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为评估落物(重型货物、落石)竖向冲击下的桥梁工作性能,以跨径 30 m 的预应力混凝土装配式箱梁桥为对象,建立精细化结构模型并与足尺模型试验结果进行对比验证;采用显式动力分析方法对落物冲击多片式箱梁的动力响应和损伤发展过程进行分析,探讨了不同坠落冲击位置、冲击能量以及冲击角度等因素下桥梁的损伤特征和发展规律。结果表明:落物冲击作用可导致箱梁同时出现整体和局部型损伤,损伤过程可分为初始碰撞、损伤扩展和最终稳定 3 个阶段;横向冲击位置由中梁转至边梁,受冲击梁体的损伤逐渐严重,梁体的位移和支反力显著增长;落物冲击位置由跨中移动至支点处,破坏模式逐渐由弯曲型转变为剪切型,冲击梁体的位移和支反力逐渐减小;随着冲击能量的增加,受冲击的主梁损伤明显加重,对未受冲击的主梁损伤影响较小,钢筋应力、碰撞力、受冲击主梁支反力和位移呈增长趋势,当冲击能量超过 391.9 kJ 时,纵向钢筋屈服;落物角度变化会影响碰撞接触面积,接触面积减小,被冲击梁体的损伤分布区域、支反力和位移也会明显减小,但是局部接触区域的损伤更为严重;落物冲击参数对于桥梁的损伤影响明显,加固维护时需要根据其特定的损伤分布特征采取相应措施。

关键词:预应力混凝土装配式箱梁;落物冲击;动力响应;损伤分布;仿真分析

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)02-0026-12

Dynamic Response and Damage Analysis of Simply Supported PC Prefabricated Box Girder Bridge Under Vertical Impact of Dropped Cargo

HAN Wan-shui, WANG Rui, ZHANG Jing-feng, KONG Ling-yun

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The 30 m span prestressed concrete prefabricated box girder bridge was taken as study example to evaluate the working performance of bridge under vertical impact (heavy dropped cargo, rockfall). The refined finite element (FE) model of bridge structure was established and also verified by full-scale model test results. The dynamic response and damage evolution of multi

收稿日期: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808048, 51908049); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2018JQ5093, 2019JQ-677);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD300102219218)

作者简介: 韩万水(1977-), 男, 河南开封人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: hws_freedom@163.com。

通信作者: 张景峰(1989-), 男, 陕西西安人, 副教授, 工学博士, E-mail: jfzhang@chd.edu.cn。

box girder bridge was investigated by explicit dynamic analysis under dropped cargo impact. The damage feature and mechanism of the bridge were analyzed under different impact positions, energies angles of dropped cargo. The results show that the impact load will lead to both overall and local damage, and the damage process can be classified into three stages, including initial impact stage, damage progress stage and final stable stage. The impacted girder suffers more severe damage, and the displacement and reaction force increase significantly as that the impact position moves from middle girder to side ones. As the impact position transfers from mid-span to support end, the damage pattern of the impacted beam varies from flexural failure to shear failure, and the displacement and support reaction decrease as well. As the impact energy increases, the impacted girder exhibits more severe damage while the non-impacted girder is less influenced, and the rebar stress, impact force, reaction force and displacement of the impacted girder also significantly increase. The longitudinal rebar yields when the impact energy exceeds 391.9 kJ. The impact contact area varies with the cargo falling angle. The damage range, reaction force and vertical displacement reduce significantly if the cargo contact area decreases, whereas the local damage is more severe. The impact parameters of dropped cargo have great influence on the bridge damage, and the corresponding reinforced maintenance measures should be adopted according to the specific damage characters.

Key words: prestressed concrete prefabricated box girder; dropped cargo impact; dynamic response; damage distribution; simulation analysis

0 引言

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分,除承受正常行车和行人等荷载作用外,在偶然极端情况下也会受到落物和重型汽车倾覆等剧烈的竖向冲击荷载,对桥梁结构造成严重的损伤。2009年7月25日,国道213线汶川段彻底关大桥被200 t巨石砸毁,造成百米桥面坍塌;2016年8月13日,西汉高速一失控货车上坠落20 t钢卷,撞击高速公路桥面,导致桥梁发生严重损伤,最终导致4片箱梁更换,严重影响正常交通运行。

针对落石重物冲击作用下桥梁结构的毁伤机理,相关学者开展了大量研究。顾乡等^[1]建立了落石-桥梁动力分析模型,根据落石冲击能量对桥梁损伤破坏程度进行分级;余志祥等^[2]研究了落石冲击高度、冲击速度、冲击角度和落石尺寸等因素对墩柱损伤体积和位移的影响;叶欣等^[3]根据结构材料破坏和能量转换效率提出了防滚石撞击物的设计准则;周晓宇等^[4]基于滚石的运动特征,获得了冲击力峰值与滚石速度和直径的关系;Tachibana等^[5]基于冲击能量和钢筋混凝土梁的静态极限抗弯承载力,提出了冲击荷载作用下结构防护设计方法。针对钢筋混凝土梁式构件的抗冲击性能,相关学者已经取得了丰富的研究成果。Fujikake等^[6]进行了普

通钢筋混凝土矩形简支梁的落锤冲击试验,提出了预测竖向冲击作用下梁体动力响应的两自由度简化模型;曾翔等^[7]对无腹筋梁冲击损伤破坏行为进行了试验和数值模拟研究,发现配置一定数量的箍筋和梁顶纵筋对于提高混凝土梁抗冲击性能作用明显;赵德博^[8]基于试验和理论,提出了可考虑剪切及弯曲变形的简支梁受冲击三自由度简化模型;刘飞等^[9]对钢筋混凝土简支梁进行试验和数值模拟,分析了其破坏机理和耗能机制;许斌等^[10]对钢筋混凝土简支深梁进行了冲击性能试验研究并考虑了二次冲击的影响;赵武超等^[11]研究了箍筋间距、边界条件和冲头形状等因素对钢筋混凝土梁动力响应和损伤情况的影响,并采用截面损伤因子评定构件损伤;窦国钦等^[12]研究了高强钢筋混凝土梁的抗冲击性能。除此之外,相关学者针对钢筋混凝土桥面板的冲击性能亦进行了深入研究,Xiong等^[13]模拟了钢板卷侵入钢筋混凝土桥面的过程,分析了冲击过程构件裂缝发展和失效机理;周晓宇等^[14]提出了针对落物冲击混凝土桥面板的失效概率和可靠度指标的评价方法;Delhomme等^[15]模拟了山区落石对钢筋混凝土桥面板的冲击作用,并提出了两自由度的质量-弹簧-阻尼器简化模型;Majeed等^[16]提出了预测巨石等极端荷载撞击混凝土结构接触力的计算方法;Yong等^[17]根据能量守恒定律和动量守恒定律,

分析了落石撞击结构产生的滑动位移;Kishi 等^[18]开展了落石冲击作用下钢筋混凝土结构试验研究,分析了结构的冲击损伤过程和安全性能。

从以上研究可以看到,目前针对钢筋混凝土桥梁的抗冲击性能研究仍集中于具有简单截面的构件层面,从工程实际和结构整体出发,研究落物、落石剧烈冲击作用下桥梁结构整体和局部的损伤破坏行为目前还涉及较少。因此,本文以公路桥梁中常见的预应力混凝土装配式箱梁桥为例,基于试验验证和数值仿真,采用显式动力有限元方法,研究重物坠落冲击桥梁的致损机理,探讨不同坠落冲击位置、冲击能量以及落物冲击角度等因素对于装配式箱梁桥的损伤影响。

1 RC 梁落锤冲击试验

为了验证数值模拟方法的精准性和可靠性,本文对文献[19]的钢筋混凝土(RC)梁落锤冲击试验进行数值模拟(图1)。梁体全长为1700 mm,净跨径为1400 mm,截面高度和宽度分别为250 mm和150 mm。截面顶面和底面对称布置2根截面面积为397 mm²的纵向钢筋,屈服强度为426 MPa;箍筋直径为10 mm,屈服强度为295 MPa,纵向布置间距为75 mm。混凝土立方体抗压强度为42 MPa,最大骨料粒径为10 mm。

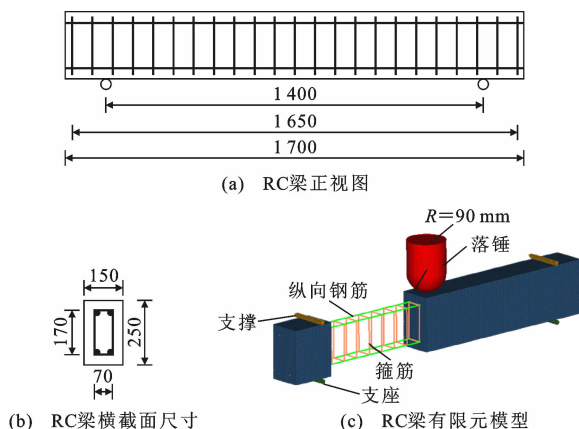


图1 落锤冲击试验有限元模型(单位:mm)

Fig. 1 Finite Element Model of Impact Test (Unit:mm)

采用竖向落锤试验机对RC梁跨中进行冲击试验,落锤冲头形状为半径90 mm的半球面,质量为400 kg,落锤自由落体高度为1.2 m。刚性落锤上设置有力传感器来测量梁体与冲击体间的碰撞力。梁底跨中设置激光位移传感器来获得跨中挠度,冲击力和位移传感器对碰撞力和跨中位移数据采集频率为100 kHz。

建立图1中RC梁三维非线性有限元模型。混凝土和支座采用实体单元模拟,钢筋采用基于高斯积分算法的3节点梁单元模拟,网格尺寸为10 mm。混凝土材料模型采用连续帽盖模型(*MAT_CSCM_CONCRETE),为合理模拟混凝土的开裂行为,设置CSCM模型的侵蚀参数为1.1,表示当最大主应变超过0.1时,该单元将被删除;钢筋采用双线性弹塑性材料模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC),弹性模量为200 GPa,泊松比为0.3,应变率参数分别为40.4和5.0,失效应变设为0.12^[11,20]。通过引入Cowper-Symonds公式^[21]考虑应变率效应对钢材屈服强度的提高。由于冲击加载过程持续时间较短,钢筋与混凝土无法发生明显的相对滑动^[22],故采用*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID命令模拟其理想黏结关系^[23]。

落锤采用刚体材料(*MAT_RIGID)模拟,网格最小尺寸为5 mm。支座采用弹性本构材料模拟,并约束支座底部平动自由度。为了防止RC梁在受到冲击载荷后发生抬升,梁的顶部模拟2个支撑。有限元模型中共包含64632个实体单元和1784个梁单元。力和位移输出频率与试验相同。

基于罚函数算法的自动面面接触(ASTS)被学者广泛应用,并得到了真实可靠的结果^[24],故支座、落锤与梁体之间的接触采用自动面面接触方式模拟。当接触参数SOFT=0时,实体单元接触刚度 k 不受时间步长的影响^[25],计算公式如式(1)所示

$$k = \frac{f_s K A^2}{V} \quad (1)$$

式中: f_s 为界面刚度的比例因子; K 为接触材料的体积模量; A 、 V 分别为接触面积和接触体积。

图2给出了试验与数值模拟的结果对比,可以看出,碰撞力和位移时程曲线与试验曲线吻合较好,最大相对误差均在5%以内。

图3给出了RC梁的试验裂缝分布与数值模拟得到的塑性损伤分布对比,可以发现RC梁跨中冲击位置处均出现严重的弯曲型损伤,故本文采用的数值模拟方法可以真实准确地反映冲击过程中RC梁动态响应特性。

2 PC 装配式箱梁数值模拟

2.1 有限元模型

建立文献[26]中跨径30 m的预应力混凝土(PC)装配式箱梁有限元模型,并采用显式有限元软件LS-DYNA进行分析,梁体高1.8 m,支点处截面

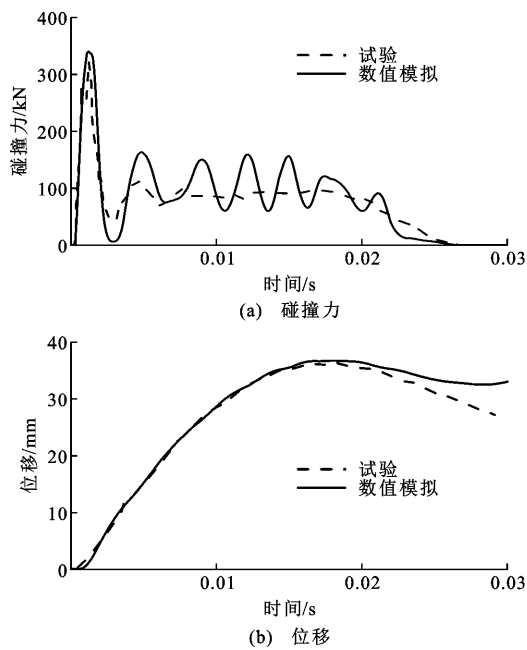


图 2 试验与数值模拟对比

Fig. 2 Comparison Between Experiment and Numerical Simulation

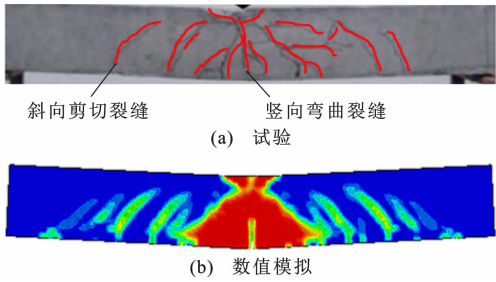


图 3 RC 梁损伤分布

Fig. 3 Damage Distribution of RC Beam

腹板和底板厚度为 250 mm,其余尺寸与图 4 跨中截面相同。箱梁混凝土立方体抗压强度为 65 MPa,换算为轴心抗压强度为 50 MPa。纵向钢筋为直径 16 mm 的 HRB335 钢筋和直径 10 mm 的 R235 钢筋,箍筋采用直径为 10 mm 的 R235 钢筋,箍筋间距为 200 mm;预应力筋采用公称直径为 15.2 mm 的高强低松弛钢绞线,张拉控制应力为 1 395 MPa,单根箱梁预应力钢筋的面积为 4 480 mm²。

预应力钢筋材料采用 * MAT_ELASTIC_PLASTIC_THERMAL,通过设定材料降温,实现预应力的施加。根据式(2)计算温度变化引起的钢筋应变 ϵ_T

$$\epsilon_T = \Delta T \alpha$$

(2)

式中: ΔT 为温度差值; α 为预应力钢筋的温度线膨胀系数,取为 1.2×10^{-5} [27-28]。

预应力筋的预加力和降温幅度之间的关系如公

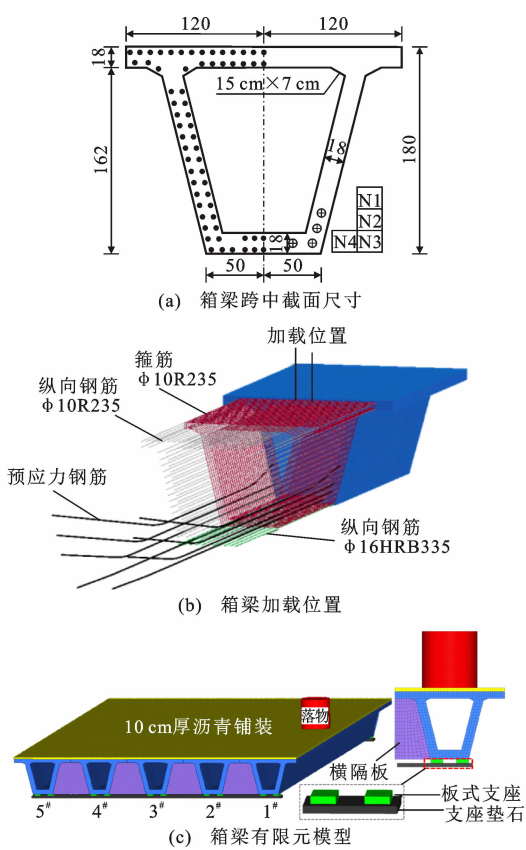


图 4 箱梁跨中截面尺寸及配筋(单位:cm)

Fig. 4 Mid-span Section Dimension and Reinforcement of Box Girder (Unit:cm)

式(3)所示

$$\Delta T = \frac{N}{\alpha EA}$$

(3)

式中: N 为预加力; E 为预应力钢筋的弹性模量; A 为预应力钢筋的面积。

支座类型为板式支座,支座垫石底部约束其平动自由度。混凝土、支座和普通钢筋材料本构模型与第 1 节相同,材料详细参数见表 1。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material Parameters

材料	密度/ (10 ³ kg · m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa
普通钢筋	7.85	210.0	0.30	235,335
预应力钢筋	7.85	195.0	0.30	1 860
混凝土	2.54	34.5	0.27	
支座	2.34	30.0	0.27	
沥青铺装	2.46	2.5	0.25	

为了降低计算中出现的较大沙漏能,采用 * CONTROL_HOURLGLASS 关键字,基于刚性的沙漏控制理论来控制计算过程,其中沙漏系数取为 0.05 [23]。

2.2 模型验证

在跨中施加随时间线性变化的竖向均布荷载(图 4),均布荷载最大合力为 1.872 MN。对建立的箱梁数值模型进行加载并得到其跨中底板荷载-挠度曲线(图 5),通过与文献[26]的足尺模型试验结果对比可以发现,数值计算得到的挠度与试验结果最大相对误差在 10% 以内,说明采用的有限元模拟方法和参数取值能够真实反映预制装配式箱梁的力学性能,可用于后续的计算分析。

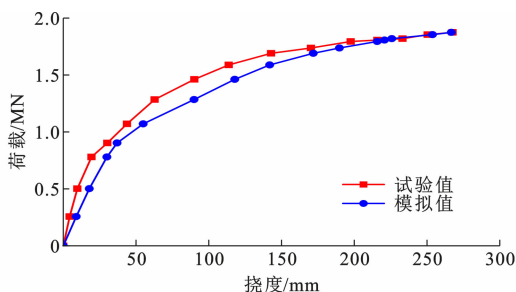


图 5 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection Curves at Mid-span

3 损伤过程分析

建立 5 片箱梁组成的装配式预应力混凝土简支梁桥[图 4(c)],桥面宽度为 14.7 m,沥青混凝土铺装层厚 10 cm,跨中和支点分别设置厚度为 200 mm 的横隔梁。为提高计算精度和效率,落物碰撞区域混凝土实体单元尺寸为 50 mm,除碰撞区域外混凝土单元尺寸为 150 mm;钢筋单元尺寸为 200~300 mm。全桥模型单元共 626 658 个。

沥青铺装层材料^[29-30]本构采用连续帽盖模型,材料参数见表 1。箱梁间接缝作为主梁翼缘的一部分,材料本构及参数与主梁一致。落物假设为 20 t 的圆柱体钢卷,高度和直径分别为 1.5 m 和 1.47 m,材料采用刚体本构模型(*MAT_RIGID)。通过设置自动面面接触(ASTS)实现钢卷与主梁间的撞击接触,接触摩擦系数为 0.5^[31]。为节约计算时间,不同工况下钢卷与主梁的初始间距均设置为 1 mm。本文仅研究落物与箱梁第 1 次冲击过程,并通过改变落物初始速度来实现不同坠落高度下的冲击效应。

图 6 给出了落物冲击 1[#] 边梁的位移、碰撞力和支反力时程曲线。在接触碰撞开始的极短时间内,碰撞力即达到峰值,随后迅速下降至极低水平;总支反力和梁体跨中位移峰值出现相对滞后,几乎同时达到峰值且基本同相位发生变化。在碰撞的初始阶

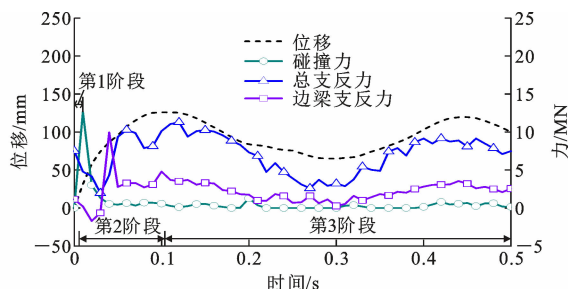


图 6 落物冲击 1[#] 边梁响应时程

Fig. 6 Response Time History of 1[#] Beam Impacted by Dropped Cargo

段,由于应力波传播时间差,碰撞力基本由主梁加速产生的惯性力承担,梁体的整体变形较小,冲击作用使得箱梁发生局部变形和损伤;随着冲击过程的持续进行,碰撞荷载下降至较低水平,冲击作用所产生的应力波在梁体内部已经传播完成并处于平衡状态,这时梁体的整体变形主要由自身运动所产生的惯性力引起。

图 7 给出了落物冲击 1[#] 边梁跨中时的梁体损伤扩展过程。根据碰撞力的发展阶段及梁体的损伤特征可以将冲击过程分为 3 个阶段,即初始碰撞阶段、损伤扩展阶段和应力传播稳定状态。

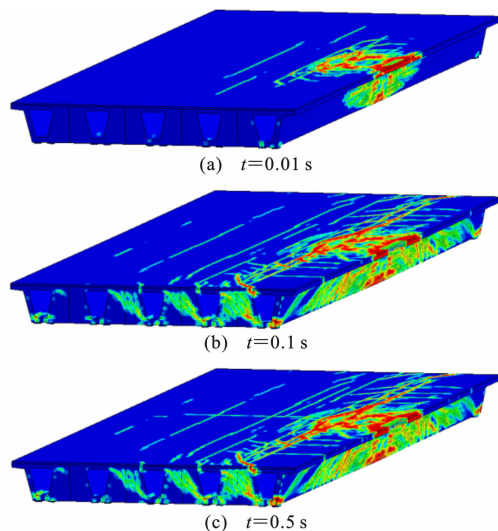


图 7 箱梁损伤扩展过程

Fig. 7 Damage Evolution Process of Box Girder

(1) 初始碰撞阶段($t=0\sim 0.01$ s)

初始碰撞阶段持时极短,冲击作用引起的应力波在梁体高度方向上传播,冲击位置中心产生环向损伤带,冲击位置处的腹板和底板产生微小损伤,但此时应力波在纵向尚未大范围传播,重物的冲击力基本由惯性力平衡,此时主梁的支反力处于较低水平,梁体的整体变形较小[图 7(a)]。

(2)损伤扩展阶段($t=0.01\sim0.1\text{ s}$)

在这一阶段,应力波沿纵横两方向传播,并引起桥梁的整体变形和运动,梁体的变形相较于应力波的传播较为滞后,因此位移峰值的出现晚于受冲击梁体支反力出现的时间。在应力波传播的过程中,碰撞接触区域的损伤继续加重,冲击导致的塑性损伤逐渐向两支点方向扩展,邻近的梁体也发生一定的塑性损伤[图 7(b)]。

(3)稳定阶段($t>0.1\text{ s}$)

由冲击作用引起的应力波在桥梁纵横向传播趋于稳定后,梁体的塑性损伤也基本完全形成,在这一阶段,重物冲击梁体后的剩余动能使得桥梁与重物发生自由振动,并且由于阻尼的耗散作用,梁体的振动最终停止[图 7(c)]。

图 8 给出了冲击过程中主梁跨中底板纵向钢筋和预应力钢筋的应力时程,钢筋应力在初始碰撞阶段即达到峰值,随后在应力波传播的损伤扩展阶段发生剧烈波动,随着应力波传播完成,钢筋的应力也逐渐减小并趋于稳定。

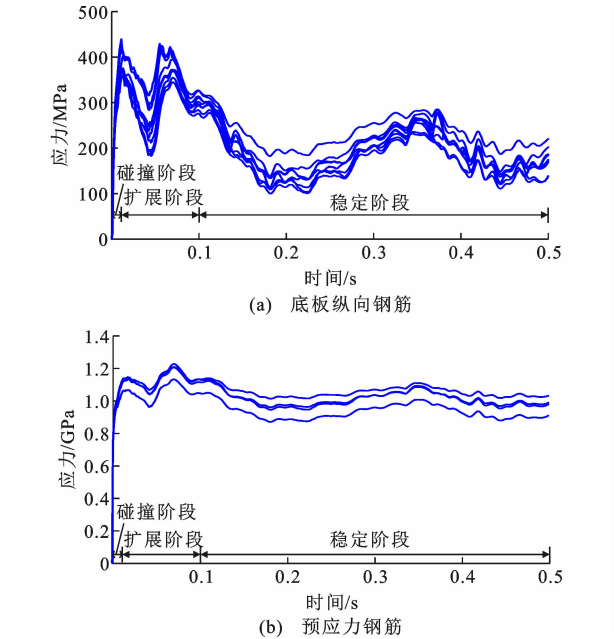


图 8 钢筋应力时程

Fig. 8 Stress Histories of Reinforcement

为分析冲击荷载作用下梁体沿纵向的损伤分布情况,采用如式(4)所定义的截面损伤因子 d_s 作为评价指标^[11],其中 d 为单元的损伤因子, n 为截面的单元数。轻度损伤时 $d_s=0.0\sim0.3$,中度损伤时 $d_s=0.3\sim0.6$,重度损伤时 $d_s=0.6\sim0.9$,构件失效时 $d_s=0.9\sim1.0$ 。

$$d_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d \quad (4)$$

图 9 给出了主梁的纵向损伤因子分布。梁体的损伤程度从支点到跨中整体上呈增长趋势,即冲击位置处的损伤较为严重,远离冲击点的损伤逐渐减小,跨中截面的损伤因子达到 0.65,截面的承载力和刚度发生较大比例削弱。支点处的剪力较大,致使主梁发生一定程度损伤,截面损伤因子因此也在邻近支点处存在突变。

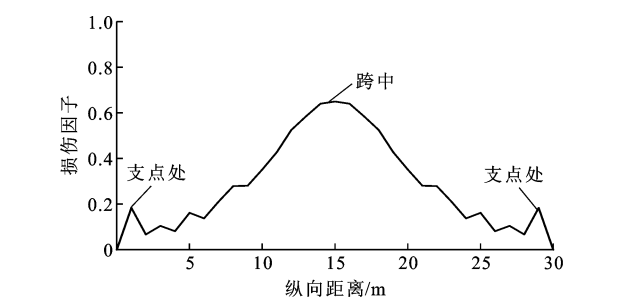


图 9 截面损伤因子

Fig. 9 Section Damage Factor

4 参数分析与冲击损伤机理

4.1 冲击位置

由于车辆行车线路的变化及重物坠落后发生弹跳滚动,可能在纵向和横向不同位置对多片预应力混凝土箱梁造成损伤,因此讨论不同纵横向冲击位置对于梁体损伤及动力响应的影响。

4.1.1 横向冲击位置

重物坠落冲击桥梁跨中不同横向位置时的梁体竖向位移、碰撞力和支反力峰值响应结果见表 2,冲击位置从 3[#]中梁转移至 1[#]边梁,梁体竖向位移峰值逐渐增大,最大竖向位移增加约 54.6%,冲击后的残余位移增加约 38.2%。不同横向冲击位置产生梁体竖向位移差异主要是因为中梁和边梁受到邻近梁体的约束程度不同:3[#]中梁处于中部,受到两侧梁体的约束效应最强,因此其冲击位移最小,随着冲击位置由中梁转移至边梁,冲击位置处受到周围梁体的约束作用逐渐减小,受冲击梁体的竖向位移逐渐提高。

表 2 不同横向冲击位置响应结果			
Tab. 2 Response Results in Different Transverse Impact Positions			
横向冲击位置	3 [#] 梁	2 [#] 梁	1 [#] 梁
位移峰值/mm	81.5	89.0	126.0
残余位移/mm	72.3	75.6	99.9
碰撞力峰值/MN	14.6	14.4	12.6
总支反力峰值/MN	12.3	10.7	11.4
冲击主梁支反力峰值/MN	3.9	4.4	9.9

碰撞力峰值主要受到碰撞物冲击参数(质量和速度)、碰撞接触刚度及接触面积等因素影响,横向冲击位置对碰撞力峰值影响有限。梁体支反力由于扣除了惯性力影响,相较于碰撞力数值较小且可更好反映构件抗力变化特征^[32],横向冲击位置对于多片装配式箱梁总的支反力峰值影响较小,但是随着冲击位置从 3[#] 中梁转移至 1[#] 边梁,支反力峰值显著增大,梁体自身抗力承担冲击荷载的比例亦增大。

落物冲击预制装配式箱梁的损伤模式可分为局部型和整体型 2 类,图 10 给出了落物冲击 3[#]、2[#] 和 1[#] 主梁的损伤分布情况。在落物冲击桥梁跨中不同横向位置时,接触局部区域形成较为严重的环形塑性损伤,部分单元失效,落物冲击位置从 3[#] 中梁[图 10(a)]转移至 1[#] 边梁[图 10(c)]时,由于邻近主梁对于被冲击主梁的约束效应减弱,致使落物冲击区域桥面板的损伤趋于严重。

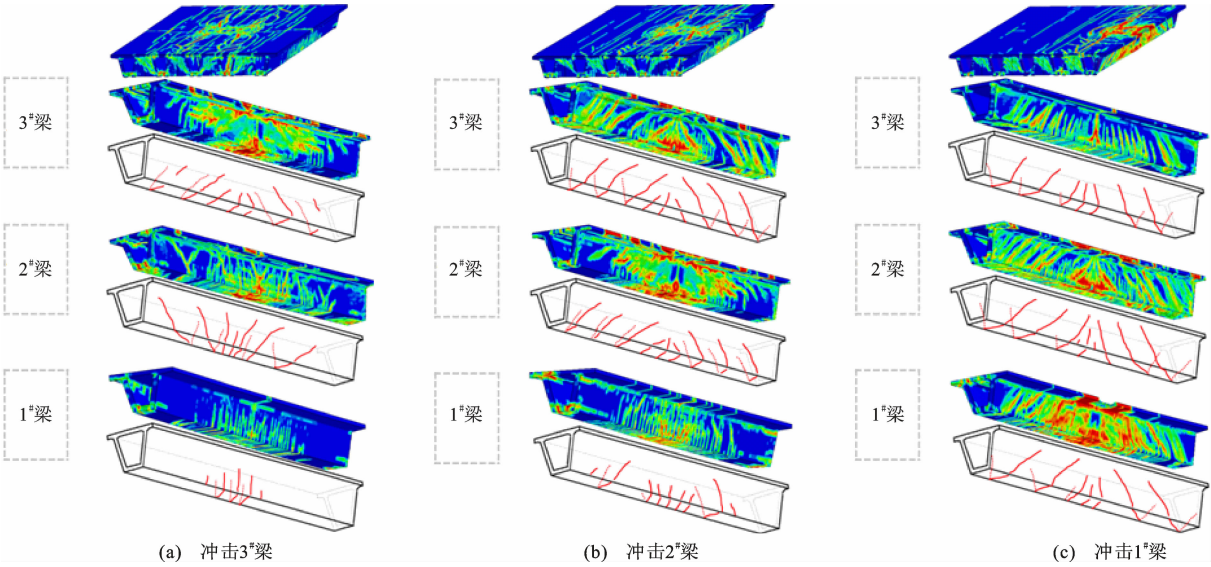


图 10 不同冲击位置时的箱梁损伤分布

Fig. 10 Damage Distribution of Box Girder in Different Impact Positions

落物的瞬时动力加载对于受冲击主梁和未受冲击主梁的整体损伤分布呈现出不同的影响规律。图 11 给出了落物在跨中冲击 3[#] 中梁的受力示意图,其中 F 为竖向力, T 为冲击加载所形成的等效扭矩,当落物在跨中冲击 3[#] 中梁时,中梁跨中区域的腹板和底板分别出现竖向和横向分布的损伤,整体呈现出明显的弯曲型损伤特征。对于其他未受冲击的主梁,落物的冲击作用对邻近梁体形成了明显的弯扭组合作用,形成了以冲击位置处为中心的放射性斜向损伤分布。

应的影响,对落物撞击 1[#] 边梁跨中、1/4 跨以及邻近支座处(距支座 1.8 m)时的响应进行分析,并在表 3 中给出主梁的碰撞响应结果。随着冲击位置从跨中变化至支座附近处,冲击峰值位移逐渐减小,与落物撞击在跨中时的最大位移相比,撞击位置在 1/4 跨和邻近支座处的最大位移分别降低了约 10.5% 和 50.4%,冲击后梁体的残余位移分别降低了约 13.7% 和 42.8%。

表 3 不同纵向冲击位置响应结果

Tab. 3 Response Results in Different Longitudinal Impact Positions

纵向冲击位置	跨中	1/4 跨	支座处
位移峰值/mm	126.0	112.8	62.5
残余位移/mm	99.9	86.2	57.1
碰撞力峰值/MN	12.6	12.4	11.5
总支反力峰值/MN	11.4	11.3	11.8
冲击主梁支反力峰值/MN	9.9	5.6	5.1

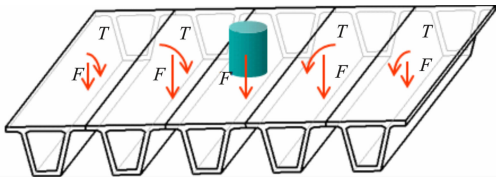


图 11 落物冲击箱梁受力示意

Fig. 11 Schematic of Force for Dropped Cargo Impacting with Box Girder

4.1.2 纵向冲击位置

为考察不同纵向冲击位置对主梁损伤和动力响

应的影响,对落物撞击 1[#] 边梁跨中、1/4 跨以及邻近支座处(距支座 1.8 m)时的响应进行分析,并在表 3 中给出主梁的碰撞响应结果。随着冲击位置从跨中变化至支座附近处,冲击峰值位移逐渐减小,与落物撞击在跨中时的最大位移相比,撞击位置在 1/4 跨和邻近支座处的最大位移分别降低了约 10.5% 和 50.4%,冲击后梁体的残余位移分别降低了约 13.7% 和 42.8%。

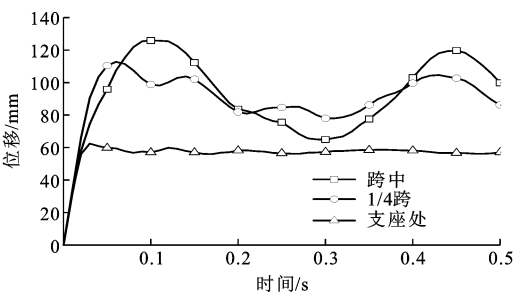


图 12 不同纵向冲击位置时的主梁位移时程

Fig. 12 Displacement Time History of Main Girder in Different Longitudinal Impact Positions

支座附近受到冲击时梁体可能发生脆性剪切破坏,梁体在很短时间内发生破坏并达到位移峰值。

不同纵向冲击位置对碰撞力和总支反力峰值的影响同样有限,但对冲击的梁体支反力影响较大。从图 13 可以看出,冲击位置从跨中移动至支点处,受冲击主梁支反力峰值呈下降趋势,与冲击在跨中时相比,在 1/4 跨和支座处的支反力峰值分别降低了约 43.4% 和 48.5%,且梁体自身的支反力峰值出现逐渐提前。这主要是由于冲击位置从跨中移动至支点处的过程中,梁体的惯性力效应逐渐减弱,冲击效应由梁体自身抗力承担,造成支反力与碰撞力无论是在数值还是在出现的时间点上逐渐接近。

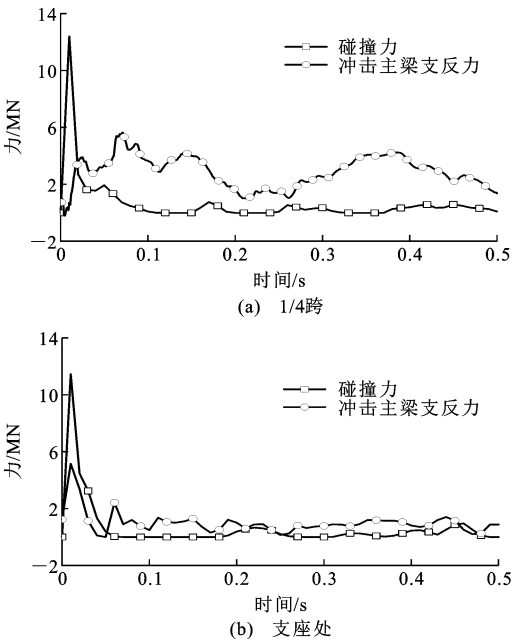


图 13 不同纵向冲击位置时的箱梁碰撞力和支反力

Fig. 13 Impact Force and Reaction Force of Box Girder in Different Longitudinal Impact Positions

图 14 给出了落物冲击 1# 边梁支点损伤分布情况,与冲击位置在跨中时梁体的损伤[图 10(c)]相比,随着冲击位置向支点处转移,落物冲击梁体的局

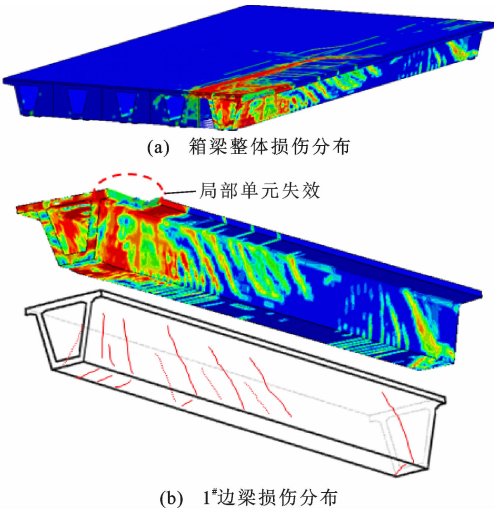


图 14 1# 边梁支点损伤分布

Fig. 14 Damage Distribution at Support End of 1# Girder

部区域损伤程度趋于严重,但是损伤分布范围逐渐缩小。特别是当冲击位置在支点附近时,塑性损伤局限于受冲击梁体自身及梁体之间的连接处,支点附近截面由于较大剪力发生严重的破坏,其他未受冲击梁体未出现由于弯曲或弯扭联合作用导致的整体分布型损伤。

4.2 冲击能量

根据《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》第五十四条,重型、中型载货汽车、半挂车货物高度从地面起不得超过 4 m,因此在分析中假设落物坠落高度为 1,2,3,4 m,同时通过调整落物密度获得不同的冲击质量,以考察冲击能量变化对于梁体冲击响应的影响,表 4 给出了不同冲击能量下的计算参数。

表 4 不同冲击能量下的计算参数

Tab. 4 Calculation Parameters at Different Impact Energies			
工况编号	质量/t	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	冲击能量/kJ
1	5	4.43	49.0
2	15	4.43	147.2
3	20	4.43	196.2
4	20	6.26	391.9
5	20	7.67	588.3
6	20	8.85	783.2

对落物冲击主梁的碰撞力时程进行积分得到荷载冲量并在图 15(a)中给出,随着冲击能量的增加,荷载冲量持续增加,当冲击能量到达 391.9 kJ 时,荷载冲量增幅变缓。

图 15(b)给出了不同冲击能量下的钢筋最大应力和考虑冲击加载应变率效应后的钢筋屈服应力。

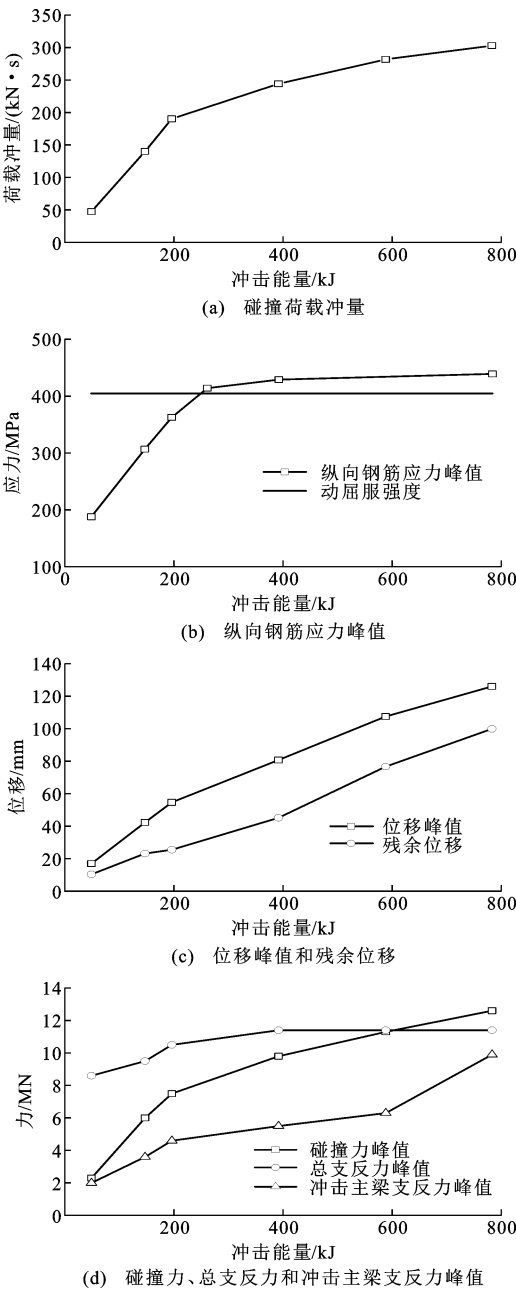


图 15 不同冲击能量下的箱梁响应

Fig. 15 Responses of Box Girder with Different Impact Energies

随着冲击能量增加,受冲击梁体的纵向钢筋应力持续增加,当冲击能量超过 391.9 kJ 时,纵向主要受力钢筋已经进入屈服状态,钢筋应力基本不随落物冲击能量提高而增加。

梁体的位移峰值和冲击后的残余位移随着冲击能量的增大而上升[图 15(c)],且基本呈线性增长关系。

随着冲击能量的提高,碰撞力峰值和受冲击梁体的支反力也明显增大,但装配式多片箱梁的整体支反力峰值变化幅度相对较小,由于未受冲击梁体

的支反力可认为等于总支反力扣除受冲击梁体的支反力,因此从图 15(d)可以发现:未受冲击的其他主梁支反力随着冲击能量的增加反而趋于减小,说明冲击能量的增大虽然会使受冲击主梁的损伤加重,但是其他未受冲击主梁的损伤不会因冲击能量的增大而发生更为严重的损伤。

4.3 冲击角度

落物的冲击角度会显著影响冲击初始阶段的加载范围,并对后续的动力响应产生影响,分别设定落物以 0°,30°,90°冲击主梁(图 16),响应结果在表 5 中给出。与 0°冲击角度相比,30°和 90°位移峰值分别减小了约 37.4%和 38.8%,残余位移分别减小了 72.3%和 69.7%,落物与梁体的接触面积越大,对梁体造成的损伤越严重。

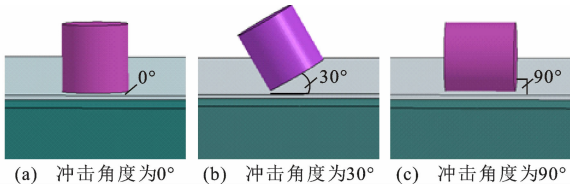


图 16 落物不同角度冲击箱梁示意

Fig. 16 Schematic of Box Girder with Different Impact Angles by Dropped Cargo

表 5 不同冲击角度下的箱梁响应结果

Tab. 5 Response Results of Box Girder with Different Impact Angles

冲击角度/(°)	0	30	90
位移峰值/mm	126.0	78.9	77.1
残余位移/mm	99.9	27.7	30.3
碰撞力峰值/MN	12.6	4.0	4.8
碰撞荷载冲量/(kN·s)	205.9	195.3	197.5
总支反力峰值/MN	11.4	11.3	11.6
冲击主梁支反力峰值/MN	9.9	3.9	5.1

不同冲击角度对总支反力的峰值影响同样有限,但碰撞力峰值和受冲击梁体支反力峰值产生较大差异。与 0°冲击角度相比,30°和 90°碰撞力峰值分别减小了约 68.3%和 61.9%,受冲击梁体支反力峰值分别减小了约 60.6%和 48.5%。冲击角度为 0°时,碰撞力峰值较大且持时短;冲击角度为 30°和 90°时,碰撞力峰值小但持时较长,因此碰撞荷载冲量相差较小。

当冲击角度为 30°和 90°(碰撞接触面积减小)冲击梁体时,损伤主要集中于跨中冲击区域,由于落物棱边局部的接触作用,致使顶板部分混凝土失效破碎,部分钢筋外露,与图 10(c)相比,图 17 邻近受冲击位置梁体的损伤影响较小。

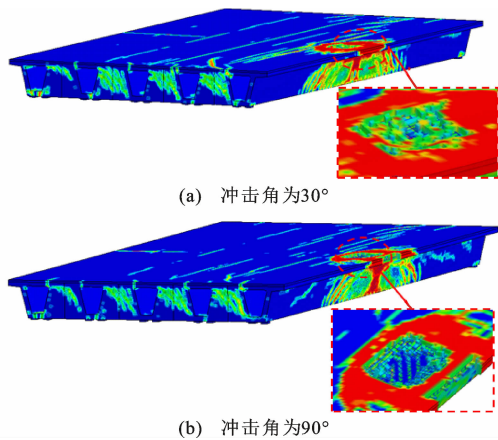


图17 不同冲击角度下的箱梁塑性损伤分布

Fig. 17 Plastic Damage Distribution of Box Girder with Different Impact Angles

5 结 语

(1)根据碰撞力和梁体损伤发展特征,落物冲击装配式箱梁可分为初始碰撞、损伤扩展和最终稳定3个阶段;箱梁损伤主要表现为局部和整体2种类型,落物冲击位置处箱梁截面损伤程度最大,支点处次之;在冲击荷载作用下,受冲击的主梁发生弯曲型损伤,而其他主梁则形成弯扭组合损伤。

(2)横向冲击位置从中梁转移至边梁,被冲击梁体受约束效应逐渐减小,梁体的位移和支反力显著增长,冲击区域梁体损伤也更严重,但是碰撞力和总支反力峰值变化幅度较小。

(3)纵向冲击位置从跨中移动至邻近支座处,受冲击梁体的位移和支反力逐渐减小,碰撞力和多片梁总支反力变化较小,破坏模式逐渐由弯曲型转变为剪切型;当冲击位置在支座附近时,由于梁体的惯性力效应减弱,受冲击梁体竖向位移和支反力较早达到峰值。

(4)随着冲击能量的增加,碰撞荷载、纵向钢筋应力峰值、位移、碰撞力和受冲击主梁支反力呈增长趋势,整体支反力增长有限,受冲击主梁损伤明显加重,但未受冲击的主梁损伤不会持续增加。冲击能量超过391.9 kJ时,纵向钢筋进入屈服状态。

(5)落物以30°和90°冲击梁体时,初始碰撞接触面积减小,总体支反力未明显变化,碰撞力峰值、被冲击梁体的支反力以及位移明显减小,梁体的局部损伤趋于严重,但是损伤范围减小。

参考文献:

References:

[1] 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.

GU Xiang, YU Zhi-xiang, ZHAO Lei, et al. Influence of Rockfall Impact Energy on Mountain Bridge Damage[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(6): 1131-1137.

[2] 余志祥,许 浒,吕 蕾,等.落石冲击对山区桥梁墩柱破坏的影响[J].四川大学学报:工程科学版,2012,44(6):86-91,132.

YU Zhi-xiang, XU Hu, LU Lei, et al. Influence on Damage of Bridge Pier in Mountain Area Under Impact Load of Rockfall[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(6): 86-91, 132.

[3] 叶 欣,熊 文,张娟秀.滚石-桥墩防撞物刚性碰撞精细化分析及设计方法[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(2):117-122.

YE Xin, XIONG Wen, ZHANG Juan-xiu. Collision Simulation and Rigid Design Between Rolling Stone and Anti-collision Structure for Bridge Piers[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(2): 117-122.

[4] 周晓宇,陈艾荣,马如进.滚石柔性防护网耗能规律数值模拟[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(6):59-66.

ZHOU Xiao-yu, CHEN Ai-rong, MA Ru-jin. Numerical Simulation of Energy Dissipation Mechanism on Falling Rocks Protection Nets [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 59-66.

[5] TACHIBANA S, MASUYA H, NAKAMURA S. Performance Based Design of Reinforced Concrete Beams Under Impact[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(6): 1069-1078.

[6] FUJIKAKA 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.

[7] 曾 翔,许 斌.考虑箍筋约束效应的快速轴压加载下钢筋混凝土短柱性能数值分析[J].工程力学,2014,31(9):190-197.

ZENG Xiang, XU Bin. Numerical Simulation on the Dynamic Behavior of Short RC Columns Subjected to Concentric Rapid Loading Considering Confinement Effect of Stirrups[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 190-197.

[8] 赵德博.冲击荷载作用下钢筋混凝土梁响应特征及设计方法研究[D].长沙:湖南大学,2017.

- ZHAO De-bo. Response Characteristics and Design Method of Reinforced Concrete Beams Under Impacting Load[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [9] 刘 飞, 罗旗帜, 蒋志刚. 低速冲击下 RC 梁的动态响应和破坏机理研究[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 155-161.
- LIU Fei, LUO Qi-zhi, JIANG Zhi-gang. Dynamic Responses and Failure Mechanism of RC Beams to Low Velocity Impact[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(5): 155-161.
- [10] 许 斌, 曾 翔. 冲击作用下钢筋混凝土深梁动力性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 6-13, 39.
- XU Bin, ZENG Xiang. Tests for Dynamic Behaviors of Deep RC Beams Under Impact Loadings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(4): 6-13, 39.
- [11] 赵武超, 钱 江, 张文娜. 冲击荷载下钢筋混凝土梁的性能及损伤评估[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(1): 1-12.
- ZHAO Wu-chao, QIAN Jiang, ZHANG Wen-na. Performance and Damage Evaluation of RC Beams Under Impact Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(1): 1-12.
- [12] 窦国钦, 杜修力, 李 亮. 冲击荷载作用下高强钢筋混凝土梁性能试验[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2014, 47(12): 1072-1080.
- DOU Guo-qin, DU Xiu-li, LI Liang. Experimental Study on the Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beams Under Impact Load [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2014, 47(12): 1072-1080.
- [13] XIONG R, SHI J F, AN Q H, et al. Numerical Analysis on Collision Process of Rigid Body and Box Girder [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 330: 331-337.
- [14] 周晓宇, 马如进, 陈艾荣. 行车落物冲击下钢筋混凝土桥面板的安全性能[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2018, 46(4): 137-145.
- ZHOU Xiao-yu, MA Ru-jin, CHEN Ai-rong. Safety Performance of a Bridge Deck Under Impact of a Massive Falling Cargo from Passing Truck[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 46(4): 137-145.
- [15] DELHOMME F, MOMMESSIN M, MOUGIN J P, et al. Simulation of a Block Impacting a Reinforced Concrete Slab with a Finite Element Model and a Mass-spring System [J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 2844-2852.
- [16] MAJEED Z Z A, LAM N T K, LAM C, et al. Contact Force Generated by Impact of Boulder on Concrete Surface[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 132: 103324.
- [17] YONG A C Y, LAM C, LAM N T K, et al. Analytical Solution for Estimating Sliding Displacement of Rigid Barriers Subjected to Boulder Impact[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2019, 145(3): 04019006.
- [18] KISHI N, OKADA S Y, KON-NO H. Numerical Impact Response Analysis of Rockfall Protection Galleries[J]. Structural Engineering International, 2009, 19(3): 313-320.
- [19] 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.
- [20] JONES N. Structural Impact[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [21] COWPER G R, SYMONDS P S. Strain-hardening and Strain-rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams[R]. Providence: Brown University, 1957.
- [22] ADHIKARY S D. Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Beams Under Varying Rates of Concentrated and Impact Loadings[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2014.
- [23] HALLQUIST J O. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [24] DOGAN F, HADAVINIA H, DONCHEV T, et al. Delamination of Impacted Composite Structures by Cohesive Zone Interface Elements and Tiebreak Contact[J]. Central European Journal of Engineering, 2012, 2(4): 612-626.
- [25] PHAM T M, HAO Y F, HAO H. Sensitivity of Impact Behaviour of RC Beams to Contact Stiffness[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 112: 155-164.
- [26] 方 志, 汪建群, 何 鑫, 等. 预应力混凝土简支箱梁受力性能足尺模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 49-56.
- FANG Zhi, WANG Jian-qun, HE Xin, et al. Full-scale Model Test of Loading Behavior of Prestressed Concrete Simply Supported Box Girders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 49-56.
- [27] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts[S].
- [28] JIANG H, CHORZEPA M G. An Effective Numerical

Simulation Methodology to Predict the Impact Response of Pre-stressed Concrete Members[J]. Engineering Failure Analysis,2015,55:63-78.

[29] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S]. JTG D50—2017, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement[S].

[30] 苏 凯,孙立军,王永新,等. 行车荷载及路面结构对车辙影响的有限元分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(2):187-192. SU Kai, SUN Li-jun, WANG Yong-xin, et al. Mechanics Analysis of Loads and Pavement Structure Type to Asphalt Pavement Rutting by 3D Finite Element Method[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2007,35(2):187-192.

[31] WRIGGERS P. Computational Contact Mechanics [M]. Berlin; Springer-Verlag,2006.

[32] KISHI N,NAKANO O,MATSUOKA K G,et al. Experimental Study on Ultimate Strength of Flexural-failure-type RC Beams Under Impact Loading [C]// VAN GOETHEM G,ZURITA A,BERMEJO J M, et al. Transactions of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Washington DC;NC State University,2001:1-7.