

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.064

大质量落物冲击下 PC 箱梁桥破坏效应分析

陈显涛,徐 丰

(武汉工程大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:为研究大质量落物对桥梁的破坏效应,以某公路跨铁路桥施工过程中公路桥梁体跌落事故为依托,使用显示动力分析软件 LS_DYNA 进行数值模拟,以跨径 32 m 铁路箱梁为研究对象,建立精细化模型,通过试算给出了详细的仿真相关参数,如材料类型、钢筋混凝土耦合方式、单元尺寸等;较为详细地还原了整个事故发生的过程,分析了箱梁的损伤状态和跨中位移,以及钢筋应力状态数据。结果表明,相较于货物抛洒等小质量冲击,箱梁在大质量落物冲击下除了接触区域的混凝土脱落等局部损伤外,还出现了顺桥向裂缝、翼缘板网状裂缝等整体损伤,少部分普通钢筋达到屈服应力,预应力束都未屈服。

关键词:装配式预应力混凝土箱梁;数值仿真;冲击荷载;损伤分布

中图分类号:U441+.5

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)07-0266-05

0 引 言

作为重要交通设施的桥梁,除了承担正常行车荷载和行人荷载外,也要面临落物、滚石、汽车倾覆、货车货物抛洒等特殊情况下的竖向冲击作用。这种作用在桥梁上的冲击荷载虽是偶然事件,但是一旦发生,就会造成严重的后果,特别是大质量落物冲击作用的极端情况,不仅会造成桥梁结构损伤,影响正常交通,甚至还会造成人员伤亡。

对于桥梁结构低速冲击行为的研究主要集中在理想化矩形梁,Kishi 等^[1]进行了以截面尺寸、钢筋数量和冲击速度作为变量的矩形截面梁落锤冲击试验,来得到梁的极限强度。霍静思等^[2]通过落锤试验进行矩形截面梁冲击作用下的破坏机制研究。梅福林等^[3]为研究钢筋混凝土梁在冲击荷载作用下的破坏形式,进行了以冲击速度、配筋率为变量的落锤冲击试验,总结破坏特征。刘飞等^[4]使用有限元软件对简单截面 RC 横梁的低速冲击进行模拟,从冲击能量的转化和损伤扩展状态进行研究。然而,现实情况下发生的桥梁遭受冲击作用的过程与理想试验显著不同,并且从工程实际出发,研究大质量落物冲击下桥梁整体和局部损伤破坏行为目前较少。因此,本文以某工程案例为背景,使用显式动力有限元方法,还

原事故过程,研究其破坏机制。

1 装配式预应力混凝土箱梁数值模拟

1.1 事故基本情况

2010 年 6 月,某跨铁路公路桥施工时发生架桥机侧翻事故,公路箱梁翻落在下方预应力混凝土装配式铁路箱梁桥上,导致铁路箱梁意外受损。该箱梁截面类型为单箱单室等高度简支箱梁,梁端顶板、底板及腹板局部向内侧加厚箱梁,梁长 32 m,跨度为 31.5 m,梁高 3.05 m。图 1 为箱梁跨中左侧横断面,右侧同左侧。

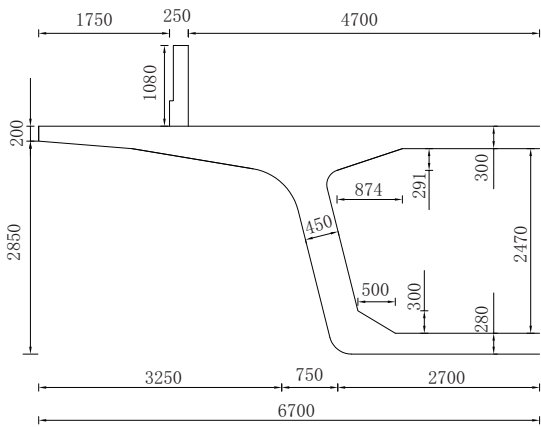


图 1 箱梁跨中横断面(单位:mm)

梁体使用 C50 混凝土,纵向钢筋和箍筋使用直径 12 mm 的 HRB335 钢筋,底板和腹板预应力筋都采用公称直径 15.2 mm 的高强低松弛钢绞线,张拉控制应力为 1 395 MPa,单根预应力筋面积为 1 270 mm²。

收稿日期:2023-08-21

作者简介:陈显涛(1999—),男,硕士在读,从事桥梁工程研究工作。

1.2 有限元模型

使用显式有限元软件 LS_DYNA 建立上述预应力混凝土装配式箱梁,如图 2 所示。其中,混凝土材料采用连续盖帽梁模型(*MAT_CSCM_CONCRETE),普通钢筋采用双线性随动模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC),预应力束采用温度相关材料(*MAT_ELASTIC_PLASTIC_THERMAL),并配合关键字 *LOAD_THERMAL_VARIABLET 通过降温来实现预应力的施加,落物和支座使用刚体材料模型(*MAT_RIGID)。具体材料重要参数见表 1。

表 1 材料参数

材料	材料模型	密度 / (10 ³ kN·m ⁻³)	弹性模型 / GPa	泊松比	屈服强度 / MPa
混凝土	MAT159	2.54	37.6	0.2	—
预应力钢筋	MAT4	7.85	196	0.3	1 860
普通钢筋	MAT3	7.85	190	0.3	335
支座垫板	MAT20	—	—	—	—

混凝土与钢筋之间黏结使用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID,梁体与落物、支座垫板之间使用自动面接触(*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE),混凝土与钢筋各自设置自动点面接触(*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE)。

整个过程不考虑对下部结构的影响,四个支座设置为刚体,约束其所有自由度,跌落的公路小箱梁(下称“落梁”)与研究对象铁路箱梁设置同样材料属性,长度 30 m 重量约为 95.72 t,将地面简化为刚性墙。为了减少计算时间,将跌高度换算成跌落速度 5 m/s,初始跌落高度设置为 1 mm。由于是倾斜跌落,落梁与箱梁发生多次接触,为了便于区分,将第一个接触区域命名为 A,第二个接触区域命名为 B,如图 2 所示。整个系统从碰撞到稳定下来需要较长时间,设置求解时长为 2 s。其中,混凝土、落物和支座垫板使用 solid 单元,钢筋使用 beam 单元。

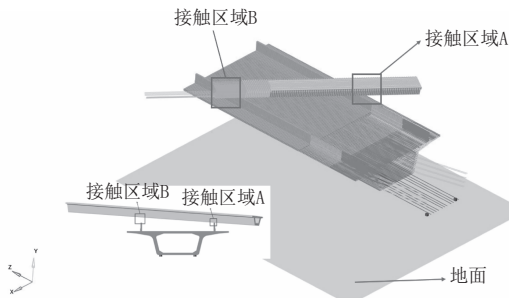


图 2 箱梁模型及加载位置

2 碰撞宏观时程分析

图 3 为碰撞过程中特殊时间点箱梁及落梁的应力状态(Von-mises 应力),整个事故发生了两次碰撞,分为三个阶段。

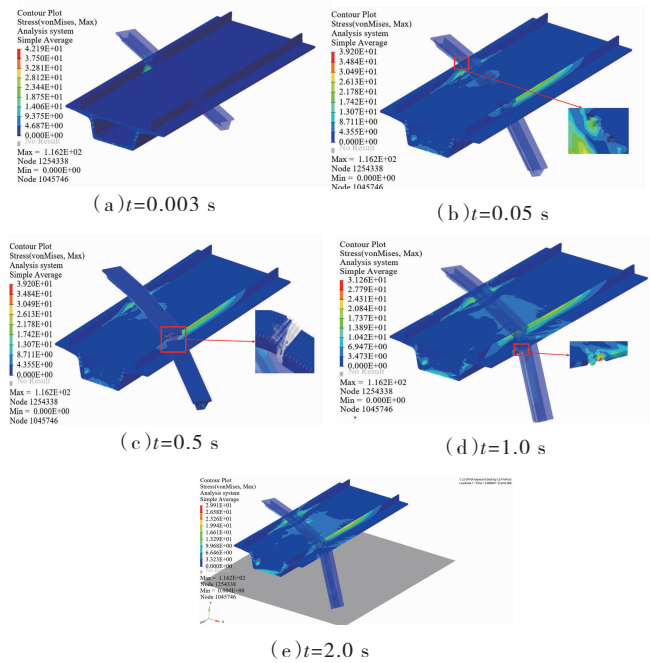


图 3 结构应力状态

(1)第一次碰撞阶段。在 $t=3\text{ ms}$ 时刻,落物接触到箱梁左侧护栏,由于跌落角度并非平行于箱梁顶板,落物与箱梁护栏棱边接触,产生应力集中,应力达到最大值。随后应力波向四周扩散至整两侧护栏和箱梁顶板,区域 A 接触点的应力迅速下降,落梁绕碰撞点 A 旋转,同时落梁应力也从接触位置扩散,并在 A 点产生转角。

(2)第二次碰撞阶段。在 $t=0.155\text{ s}$ 时刻,落梁接触到箱梁右侧护栏,右侧护栏应力开始显著增加,在第二个接触点 B 位置产生转角,并绕该接触点继续旋转。在 $t=0.168\text{ s}$ 时刻,箱梁左侧护栏开始有单元应力超过允许应力,陆续出现单元失效,裸露出护栏的钢筋。在 $t=0.362\text{ s}$ 时刻,落梁在 B 点附近出现大幅度转角,混凝土单元迅速失效,暴露出钢筋网,部分纵筋失效断裂,落梁从 B 点断裂,落梁远离端绕 B 点继续下落。

(3)稳定阶段。在 $t=0.527\text{ s}$ 时刻,落梁与箱梁右侧翼缘板边缘接触,翼缘板受到落梁挤压。在 $t=0.578\text{ s}$ 时刻,翼缘板开始出现单元失效,混凝土剥落。在 $t=1.159\text{ s}$ 时刻,落梁断裂段落至地面,停止运动,箱梁和落梁趋于稳定。

3 损伤结果分析

落梁对箱梁冲击的损伤结果如图 4 所示。

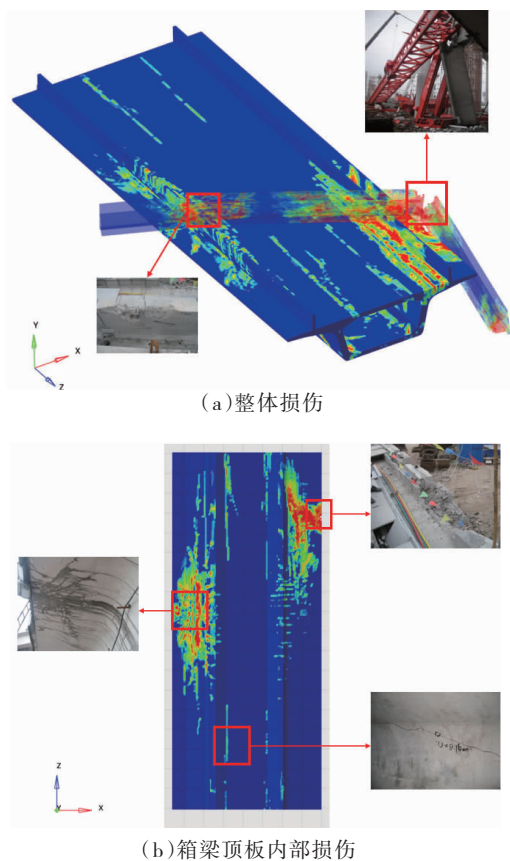


图 4 损伤结果

为了便于分析箱梁的损伤结果,取箱梁整体损伤图和顶板内侧损伤结果(XOZ 平面),损伤情况如下:

接触点 A 侧护栏混凝土剥落,暴露钢筋网;A 点附近翼缘板出现网状裂缝;碰撞位置 B 点翼缘板边缘出现混凝土剥落,暴露钢筋网;箱梁顶板内部出现顺桥向裂缝。仿真的损伤位置和损伤程度与实际情况基本一致,验证了仿真的可靠性。

从图 4 中可知,相较于传统货物抛洒^[5]、滚石冲击等小质量冲击,该事故落梁质量较大,速度较慢,而局部损伤吸收的能量十分有限^[6],接触区域的混凝土损伤不足以吸收如此巨大的能量,除了接触区附近的局部损伤外,还出现了更严重的顺桥向裂缝和翼缘板网状裂缝等整体损伤。由于落物形状和跌落角度复杂,与相关的箱梁冲击试验^[7]相比,损伤更加不规则,也较复杂。

4 损伤过程分析

4.1 箱梁动态响应分析

由于落物倾斜跌落,因此会产生两次碰撞。如图 5 所示,冲击力时程曲线会有两个突变,接触区域 A

先遭受冲击,产生一个冲击力峰值,约为 4.2 MN。之后发生接触区域 B 的碰撞,产生第二个冲击力峰值,约为 3.0 MN。随后冲击力下降并趋于平稳。过程中梁体的动态平衡满足式(1)^[8]:

$$\int_0^l \bar{m} \ddot{u}(x, t) dx + R_n(t) + R_s(t) - I(t) = 0 \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为冲击力; $\ddot{u}(x, t)$ 为构件的加速度; $\bar{m}$ 为单位长度梁体的质量; $R_n(t)$ 和 $R_s(t)$ 分别为两侧支座的支反力。

碰撞初期,冲击力的增量大于支反力,支反力的突变相对于冲击力有所滞后,表明在冲击作用初期,冲击力并非由支座承担,而是作用在梁体上,由梁体加速度产生的惯性力承担,满足式(1)。图 5 还给出了跨中位置的加速度时程曲线,碰撞初期加速度剧增,且最初的突变时间要早于支反力的突变时间。这一结果验证了王银辉等^[9]的惯性力理论。大约在 $t=1.16$ s 时,落梁断裂端接触地面,地面与落梁出现接触力,由于外力变化,箱梁再次出现加速度。

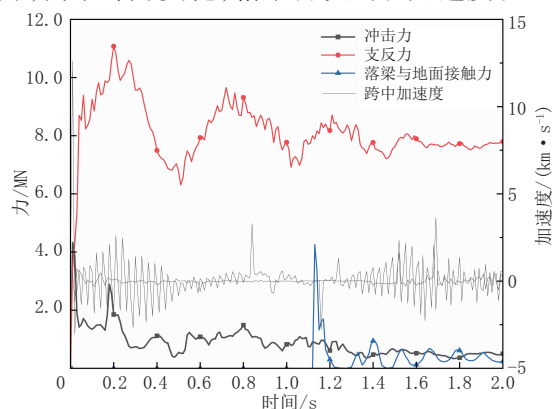


图 5 箱梁响应时程

4.2 冲击作用下梁体的变形和扭转

在落物的冲击作用下,梁体会发生大幅度的下挠和扭转。为了更好地研究其变形状态,取跨中位置截面,提取截面的特征点竖向位移曲线,编号如图 6 所示。其中,2、3 为护栏顶部,1、4 为翼缘板边缘,5 为底板中点。

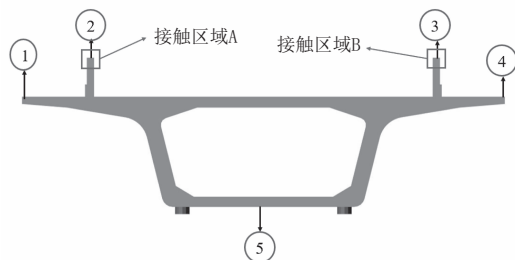


图 6 数据提取点特征

图 7 为跨中截面变形图。整个过程跨中截面各点位移变化趋势一致,初始碰撞阶段,A 区域同侧的 1、2 点最先产生竖向位移。虽然 1 点距碰撞区域相较

于 2 更点远,但由于翼缘板刚度较小,产生的位移更大,很快变形传递至整个截面。点 3、5、4 也陆续出现竖向位移。第二次碰撞发生的时间为 $t=0.155\text{ s}$,由图 5 可知落梁与箱梁之间的冲击力从 $t=0.2\text{ s}$ 开始骤减,但在 $t=0.2\text{ s}$ 后,五个点的竖向位移仍持续增加。这也说明冲击最初由梁体吸收,与惯性力平衡;冲击力峰值结束后,梁体继续在惯性力的作用下发生下挠。此后上下震荡,大约在 $t=1.8\text{ s}$ 时趋于稳定。整个过程最大位移出现在 1 点,约为 160 mm ,大于对侧 4 点,与图 5 中第一接触区域 A 的冲击力大于 B 处一致。稳定后跨中底板存在约 80 mm 的残余位移,在 $t=2\text{ s}$ 时,左右翼缘板位移差为 40 mm ,箱梁跨中出现了小幅度扭转。

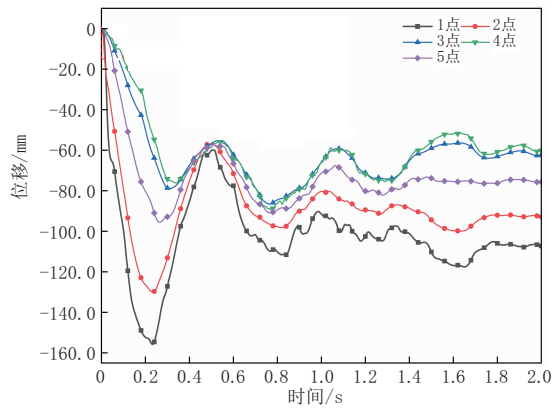


图 7 跨中截面变形

4.3 钢筋和钢束

碰撞过程中,箱梁的箍筋和纵筋最大轴力为 42.66 kN 。钢筋采用的是 Q335,直径 12 mm ,换算成应力为 377 MPa ,超过屈服强度。图 8 给出了屈服部分普通钢筋,红色部分为受拉屈服,蓝色部分为受压屈服。屈服的钢筋主要分布在两个接触区域,以及护栏与顶板相交位置,与图 4 中的顺桥向裂缝一致。

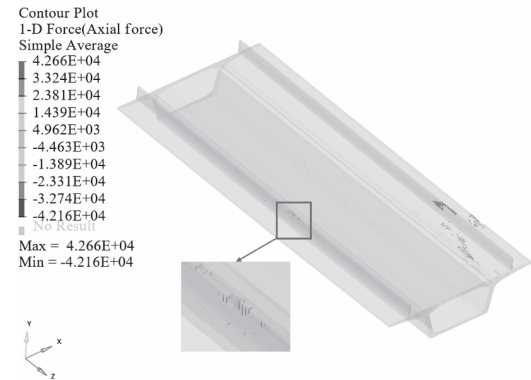


图 8 钢筋轴力

图 9 给出了预应力筋的轴力图 and 底板束与腹板束的跨中单元应力时程曲线,可知钢束应力状态变化趋势基本一致,在温降作用下达到张拉控制应

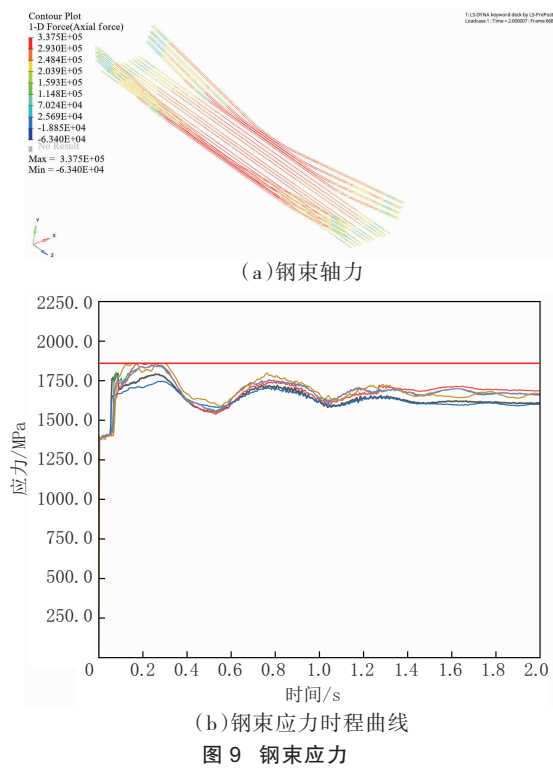


图 9 钢束应力

力 $1\,377.7\text{ MPa}$ 。碰撞发生后,应力激增,但未突破其屈服强度 $1\,860\text{ MPa}$ 。之后上下波动,最终趋于平稳。

4.4 全局能量

在 LS_DYNA 中,能量变化需要满足式(2),

$$\underbrace{E_{\text{kin}} + E_{\text{in}} + E_{\text{sl}} + E_{\text{rw}} + E_{\text{damp}} + E_{\text{hg}}}_{\text{total energy } E_{\text{total}}} = E_{\text{kin}}^0 + E_{\text{in}}^0 + W_{\text{ext}} \quad (2)$$

式中: E_{kin} 表示动能; E_{in} 表示内能; E_{sl} 表示滑移能,主要由接触面之间的摩擦产生; E_{rw} 表示刚性墙能,刚性平面与物体接触吸收的能量总和; E_{damp} 表示阻尼能,此案例未涉及; E_{hg} 表示沙漏能,沙漏能并不是物理意义上的能量,是由于单元积分点不足导致的不合理变形产生的能量,是有限元软件为了减少计算时间而做出的计算精度上的牺牲,因此沙漏能不宜过大; E_{kin}^0 表示初始动能; E_{in}^0 表示初始内能; W_{ext} 表示外力做功,这里外力只有重力。

能量守恒意味着在任意时刻,总能量(包括当前动能、内能、沙漏能、滑移能和刚性墙能)应该等于重力做功、初始内能和动能的和。初始的内能和动能是常量,因此总能量与重力做功的差值是检验能量是否守恒的指标。图 10 是整个系统(包括箱梁、落梁、支座及地面)的能量曲线,整个过程总能量与重力做功的差值只有小幅度变化,在能够接受的范围之内。另外,沙漏能和滑移能始终处于一个较小的状态,远小于总能量,说明仿真的结果具有可靠性。从图中可知,内能在碰撞还未发生时是负值。这是由于预应力

束使用温度材料,通过温降来模拟预应力导致的。整个过程系统动能减小,主要转化为内能,出现内能和动能的曲线交叉。由于重力做正功,总能量也随之上升,直到落梁断裂端落至地面,停止运动,重力不再做功,总能量停止增长,落梁接触地面,动能骤减,内能和刚性墙能突增。

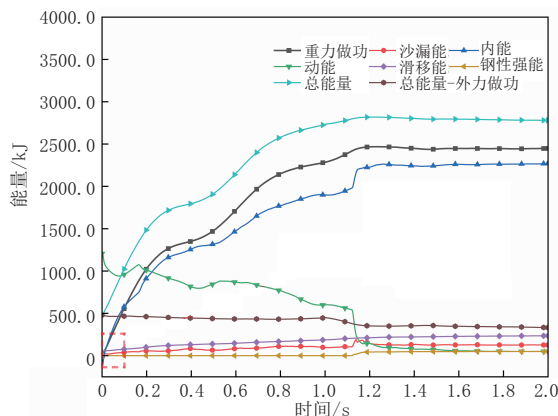


图 10 能量曲线

5 结 语

本文使用有限元软件 LS_DYNA 还原某落梁撞击铁路箱梁的事故过程,通过分析箱梁的损伤、跨中截面竖向位移、钢筋应力等结果,得到以下结论:

(1)针对本次跌落事故,碰撞的最大冲击力达到 4.2 MN,出现在第一次碰撞,同侧出现最大竖向位移 160 mm,护栏出现了混凝土剥落。第一次碰撞吸收了能量后对侧护栏损伤较小,但由于翼缘板刚度很小,受到断裂的落梁挤压后出现严重的破损。由于跌落物质量较大,除了局部破损,也出现了整体损伤。箱

梁内部产生顺桥向裂缝,翼缘板产生网状裂缝。由于工况较特殊,损伤结果相对复杂。

(2)整个碰撞过程,跨中大竖向位移超过 120 mm,跨中底板在稳定后仍存在 80 mm 竖向位移,左右两侧翼缘板高差 40 mm,横桥向出现轻微倾斜。

(3)普通钢筋极少部分出现屈服,主要集中在接触区域附近的护栏顶、护栏与箱梁顶板交界区域,以及受到挤压的翼缘板,预应力束都未达到屈服强度。

参考文献:

- [1] N. KISHI, O. NAKANO, K. G. MATSUOKA, et al. Experimental Study on Ultimate Strength of Flexural-Failure-Type RC Beams under Impact Loading [C]//16th International conference on structural mechanics in reactor technology. Omnipress, 2001:1-7.
- [2] 霍静思,胡开赢. RC 梁冲击破坏机理试验研究与残余变形预测方法探讨[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(1):112-117.
- [3] 梅福林,董新龙,俞鑫炉. 不同落锤速度冲击下混凝土和 RC 梁破坏研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(5):83-88.
- [4] 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.
- [5] 据利平,王银辉,陆晓宏,等. 行车落物作用下钢筋混凝土箱梁破坏形态分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(1):72-78.
- [6] 赵德博,易伟建. 钢筋混凝土梁抗冲击性能和设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 139-145.
- [7] 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.
- [8] BENTUR A, MINDESS S, BANTHIA N. The behaviour of concrete under impact loading: Experimental procedures and method of analysis[J]. Materials and Structures, 1986, 19(5): 371-378.
- [9] 王银辉,陆晓宏. 钢筋混凝土梁在冲击作用初期的惯性力分布[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6):2457-2463.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com