

文章编号:1673-2049(2019)04-0063-08

列车侧向撞击作用下 U 型梁碰撞荷载及损伤演化分析

张景峰¹, 景媛¹, 张楠², 李小珍³, 张岗¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为研究脱轨列车撞击 U 型梁碰撞荷载变化规律及 U 型梁损伤演化过程,采用显式动力分析方法对列车以不同质量、速度和角度撞击 U 型梁进行仿真计算,对比分析列车碰撞荷载时程、峰值力、平均力以及荷载冲量,基于非线性时程分析对 U 型梁在碰撞荷载下的损伤特征和演化进行了研究。结果表明:列车碰撞荷载时程呈现两阶段特征,第一阶段碰撞荷载达到峰值但持时较短,第二阶段持时较长但碰撞荷载处于较低水平,荷载总持时为 35~60 ms;列车碰撞质量对碰撞荷载影响不显著,随着碰撞速度和碰撞角度增大,碰撞荷载峰值力及冲量上升明显且呈线性增长趋势,随着碰撞速度的增大,平均碰撞力上升较为有限,但随碰撞角度增大而增大,碰撞荷载峰值力与平均碰撞力的比值基本都超过 2.5,最大达到 3.4;U 型梁碰撞损伤首先发生于腹板和底板,而后逐渐发展至翼缘与腹板过渡处,最终腹板上部发生严重损伤,损伤区域主要集中于腹板及腹板和底板连接处,U 型梁的腹板翼缘在碰撞后发生明显的塑性侧向变形;对受损伤的薄弱区域,在设计时应重点关注。

关键词:列车脱轨;U 型梁;碰撞分析;碰撞荷载;损伤演化

中图分类号:U24 **文献标志码:**A

Analysis on Impact Load and Damage Evolution of U-type Girder Under Train Lateral Collision

ZHANG Jing-feng¹, JING Yuan¹, ZHANG Nan², LI Xiao-zhen³, ZHANG Gang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: For the purpose of investigating the impact load characteristic and damage evolution process of U-type girder under derailed train collision, the numerical simulation was conducted under various impact masses, velocities and angles of vehicle through explicit dynamic analysis. The impact load time histories, as well as the peak values, mean values and impulses of impact loads were compared and analyzed. The damage characteristic and evolution of U-type girder were also studied and discussed under impact loads through nonlinear transient analysis. The analysis results demonstrate that the impact load presents a two-phase character. In the 1st phase, the impact load reaches its peak value instantly and the load duration is relatively short. Whereas the

收稿日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51808048,51878057);陕西省自然科学基金研究计划项目(2018JM5018,2018JQ5093);
中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD300102219218)

作者简介:张景峰(1989-),男,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:jfzhang@chd.edu.cn。

impact load is at a lower level and has a longer duration in the 2nd phase. The overall duration of impact loads ranges from 35 ms to 60 ms. The impact loads are less influenced by the vehicle impact mass, while the peak values and impact impulses of impact loads go up significantly and linearly with the increases of impact velocity and angle. The impact angle affects the mean value of impact load with a more prominent way than the impact velocity. The peak impact loads almost for all cases are 2.5 times larger than the mean impact loads with respect to time, and a maximum ratio of 3.5 can be obtained. The damage of U-type girder occurs at the web and bottom plate firstly, and then extends to transition zone of web and flange. The upper part of web suffers severe damage finally. The damage of U-type girder under impact load mainly occurs at the web, as well as the connection of web and bottom plate. The flange of U-type girder shows significant plastic lateral deformation under impact load. The weak region that suffers damage should be paid significant attention to the structure design.

Key words: train derailment; U-type girder; collision analysis; impact load; damage evolution

0 引言

U 型梁作为一种适用于轻轨列车运行的新型桥梁结构形式,在近些年来的城市轨道交通中应用日益广泛,其薄壁腹板作为结构的主要受力构件,可以防止列车脱轨后倾覆坠落,保障行车安全^[1-3]。然而,在极端情况下(例如地震列车脱轨)^[4],U 型梁腹板在侧向撞击荷载作用下可能会发生损伤破坏^[5],甚至会导致车辆坠落倾覆,将造成严重的人员伤亡、经济损失和不良社会影响。为保证 U 型梁在列车脱轨撞击作用下的绝对安全,有必要针对 U 型梁的侧向防撞性能进行相关理论和试验研究。

国内外相关学者针对列车脱轨撞击轨道邻近结构进行了一系列的理论分析和数值仿真。向俊等^[6]基于理论推导,计算得到了列车脱轨撞击高速铁路桥梁防撞墙的碰撞力,并对高铁防撞墙的安全性进行了分析评估。晏启祥等^[7-8]对列车撞击盾构隧道的荷载及对隧道管片衬砌的动力响应和损伤进行了深入分析。赵雅娜等^[9]研究了铁路站房在列车脱轨作用下的动力响应。文献^[10]建立了离散的弹簧质量模型模拟脱轨列车,并得到了不同速度下的列车撞击力函数。国际铁路联盟 UIC 和欧洲规范都对不同分类结构在列车脱轨作用下的设计荷载和构造措施进行了规定和建议^[11-12]。美国混凝土委员会(ACI)在其报告中建议了列车脱轨撞击结构的荷载作用模式^[13]。虽然目前规范和研究对列车撞击荷载和邻近结构防撞设计进行了建议和规定,但是由于 U 型梁防撞抗撞的特殊性,针对该类结构的侧向防撞性能及损伤破坏模式分析,国内外尚未开展系统深入的研究。

因此,本文以列车脱轨撞击 U 型梁这一极端事件为研究背景,基于动力分析计算得到列车在不同质量、速度及碰撞角度下的碰撞荷载,并对碰撞荷载的变化规律进行分析,研究了 U 型梁在碰撞荷载作用下的损伤特征及其演化过程。

1 脱轨列车碰撞数值模型

列车运行脱轨机理复杂,完整地模拟列车脱轨到撞击邻近结构全过程非常困难^[6,14-15],本文对列车脱轨机理和完整过程不作深入讨论,而重点研究列车脱轨碰撞荷载规律及结构损伤发展过程。

为研究列车碰撞参数(速度、质量、角度)与碰撞荷载及 U 型梁损伤演化规律的关系,提高计算分析效率,首先进行不同计算参数下列车撞击刚性材料 U 型梁的碰撞动力分析并得到碰撞荷载时程,然后将计算得到的碰撞荷载施加于精细化 U 型梁有限元模型并进行非线性时程动力分析,从而得到 U 型梁的碰撞动力响应及结构损伤^[16]。

列车模型基于城际轨道交通 CRH6 车型,列车编组为 6 动 2 拖,中间车体长、宽、高分别为 22, 3.3, 3.89 m。车体内部骨架均为铝合金型材,采用考虑应变速率的双线性等向强化弹塑性本构模型^[17],首节车头罩外皮为玻璃钢材质,采用复合材料损伤本构模型模拟^[18],列车材料参数见表 1。为了兼顾计算效率和精度,首节车体单元边长小于 100 mm,中间车体单元边长为 200~300 mm。

城际轨道交通 30 m 简支 U 型梁截面如图 1 所示。在碰撞荷载计算中,为提高分析效率,U 型梁混凝土及钢筋均采用刚性材料模型,将多跨 30 m 简支梁按一次全长 80 m 建立,并将简支边界条件

表 1 材料基本参数
Tab. 1 Basic Parameters of Materials

| 材料类型 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 拉伸强度/MPa | 塑性模量/GPa |
|-------|----------|------|--|----------|----------|
| 玻璃钢 | 28.7 | 0.17 | 2 300 | 667 | |
| 铝合金型材 | 70.0 | 0.33 | 2 530 | 240 | 0.14 |
| 混凝土 | 31.5 | 0.20 | 2 340 | 30 | |
| 钢材 | 210.0 | 0.27 | 7 860 | 400 | |

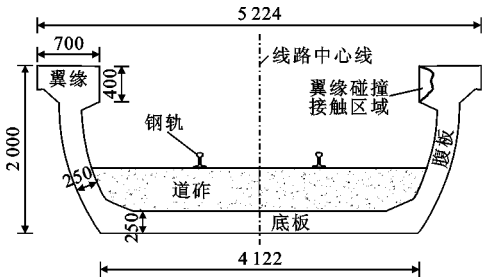
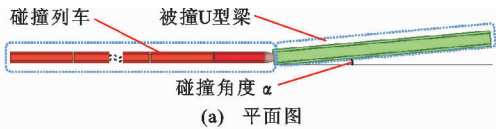


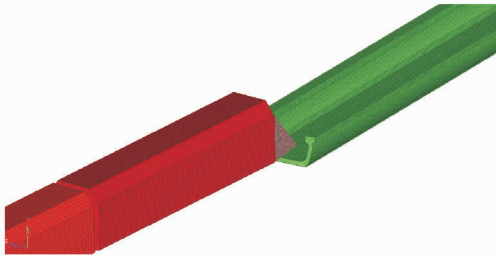
图 1 U 型梁截面(单位:mm)

Fig. 1 Cross-section of U-type Girder (Unit:mm)

改为约束 U 型梁底板节点平动自由度,U 型梁与列车之间的动摩擦和静摩擦因数均设置为 0.3^[19-20],列车-U 型梁碰撞动力分析模型如图 2 所示。通过计算分析对比,采用此种简化处理方式对列车-U 型梁碰撞荷载计算无显著影响^[21]。



(a) 平面图



(b) 局部视图

图 2 列车-U 型梁碰撞模型

Fig. 2 Train-U-type Girder Collision Model

基于碰撞荷载输入的时程动力分析目的是为了获得碰撞荷载作用下结构损伤状态,U 型梁的材料本构和边界条件模拟需更为精细。时程动力分析中,U 型梁混凝土采用适用于低速冲击分析的连续光滑帽盖模型,纵筋及箍筋采用双线性等向强化弹塑性本构模型^[22]。采用实体单元建立简支梁的固定支座、单向活动支座和双向活动支座,模拟实际边界条件^[23]。在碰撞过程中,桥梁结构与车体碰撞接触的部位主要集中于 U 型梁翼缘侧面(图 1),因此

碰撞荷载以面荷载形式施加于 U 型梁跨中翼缘侧面 2 m 长范围内,并同时考虑结构的重力、二期恒载和列车活载。时程动力分析中的 U 型梁有限元模型如图 3 所示。

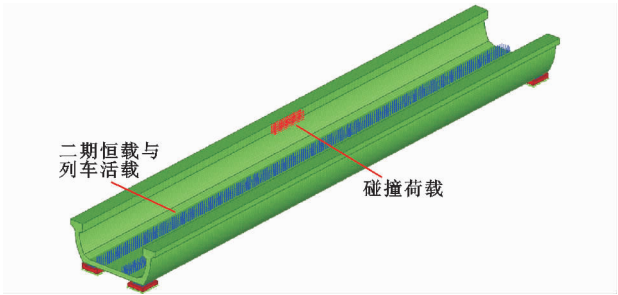


图 3 U 型梁有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of U-type Girder

2 列车碰撞荷载分析

碰撞荷载计算中,列车分为空载(AW0,单节列车 32 t)和满载(AW2,单节列车 44 t)2 种载重状态,并考虑不同碰撞角度和碰撞速度,空载状态下 5 个计算工况,满载状况下 25 个计算工况,计算工况参数列于表 2。最大计算分析时长为 0.8 s,时间步长为 0.001 s。需要说明的是,列车脱轨侧向撞击 U 型梁的碰撞接触区域不固定,碰撞荷载在时间和空间上都不连续,因此,在后续的荷载时程对比中,统一选取持时较长且峰值力较大的初始阶段碰撞荷载进行对比讨论。

表 2 碰撞荷载计算工况

Tab. 2 Calculation Cases of Impact Loads

| 碰撞角度/(°) | 碰撞速度 $V/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ | | | | |
|----------|--|-----|-----|-----|-----|
| | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| 0.5 | | | | | AW0 |
| | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 |
| 1.0 | | | | AW0 | |
| | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 |
| 1.5 | | | AW0 | | |
| | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 |
| 3.0 | | AW0 | | | |
| | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 |
| 5.0 | AW0 | | | | |
| | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 | AW2 |

2.1 碰撞质量(载重状态)影响

图 4 给出了不同碰撞速度和碰撞角度下列车空载状态(AW0)和满载状态(AW2)侧向碰撞 U 型梁的碰撞荷载时程。由图 4 可以看出,满载状态的列车由于碰撞质量较大,其荷载峰值比相同速度和碰

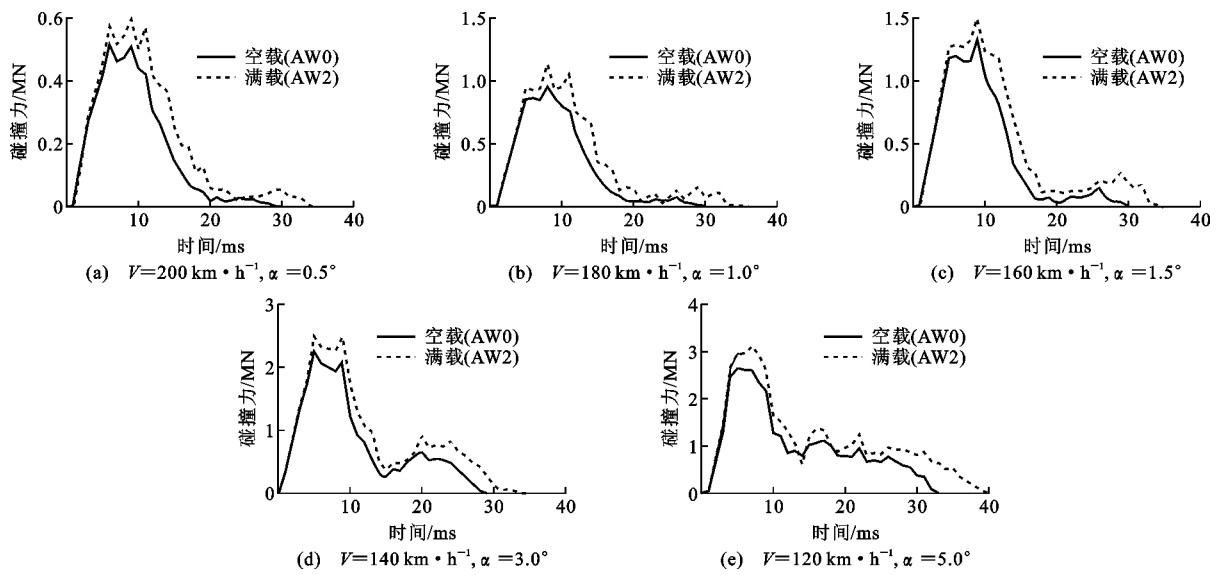


图 4 不同载重状态下碰撞荷载对比

Fig. 4 Comparison of Impact Loads Under Various Loading Conditions of Vehicle

撞角度下的空载列车大,碰撞荷载持时也稍长,但是碰撞荷载的关键参数(峰值、持时和冲量)相差较小,荷载时程变化规律比较接近。以图 4(e)为例,空载状态下列车碰撞荷载峰值力、持时和冲量分别为 2.61 MN,34 ms 和 35.16 kN·s,而满载状态下分别为 3.11 MN,41 ms 和 45.88 kN·s。因此,在后续的荷载分析和 U 型梁碰撞损伤分析中,统一以列车满载状态的荷载作为代表工况。

2.2 碰撞速度与碰撞角度影响

列车满载状态下不同碰撞速度和碰撞角度的荷载时程对比在图 5 中给出。由图 5 可以看到,不同

碰撞参数下的列车荷载时程均呈现两阶段特征:在第一阶段(碰撞接触初期),碰撞荷载快速达到峰值,随后车体碰撞区域进入塑性状态,接触刚度减小,碰撞力迅速下降,这一阶段持时相对较短;在第二阶段,进入塑性状态的列车车体碰撞荷载处于相对较低水平,并且随着碰撞过程发展,列车逐渐开始脱离被撞结构,接触刚度持续减小,直至最终卸载完成,这一阶段荷载持时相对较长。总体来看,碰撞荷载持时较为短暂,为 35~60 ms。

在同一碰撞角度下,列车对 U 型梁翼缘的横向碰撞峰值力 P_{max} 与碰撞速度 V 关系显著,随着碰撞

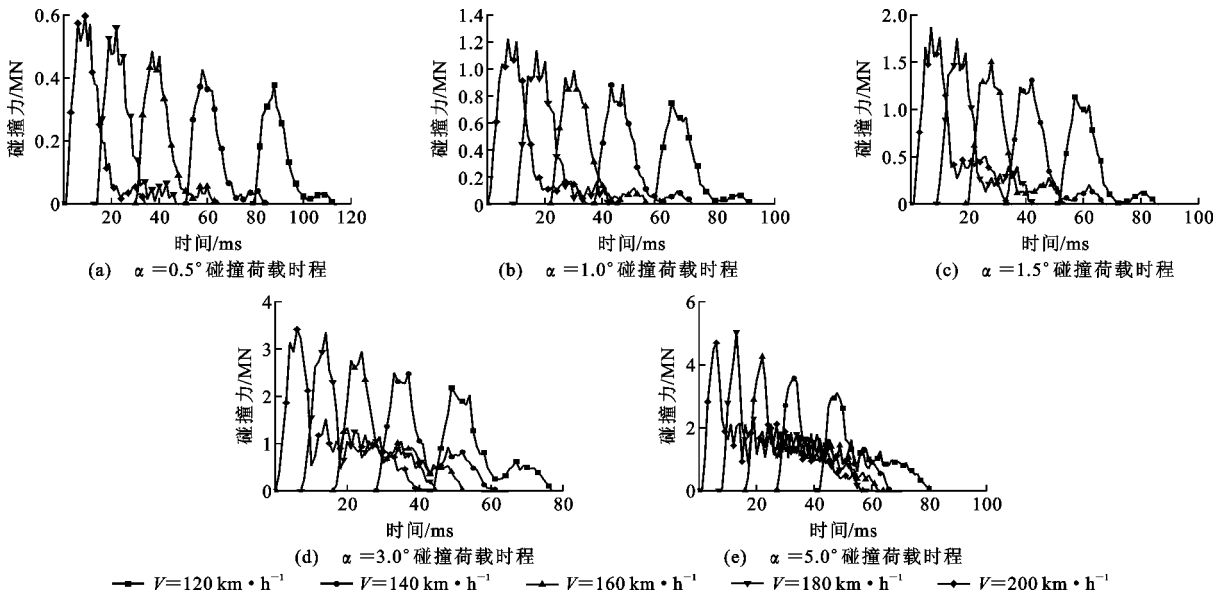


图 5 不同碰撞速度和碰撞角度下碰撞荷载对比

Fig. 5 Comparison of Impact Loads Under Various Impact Velocities and Impact Angles

速度增大,列车碰撞峰值力呈上升趋势;随着碰撞角度 α 增大,同一碰撞速度下列车的 P_{\max} 也明显增大,以 $V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时发生碰撞为例, P_{\max} 从 $\alpha=0.5^\circ$ 时的 0.60 MN 逐渐增加到 $\alpha=5.0^\circ$ 时的 5.03 MN 。为便于对比,图 6 给出了满载状态下各工况得到的碰撞荷载峰值力。由图 6 可以发现:随着列车碰撞速度的不断提高, P_{\max} 也在不断增加且呈线性增长趋势;随着碰撞角度 α 的增加,在同一碰撞速度下碰撞峰值力同样会有明显增大,而且由于 α 增大, P_{\max} 随碰撞速度增大的趋势更加显著。

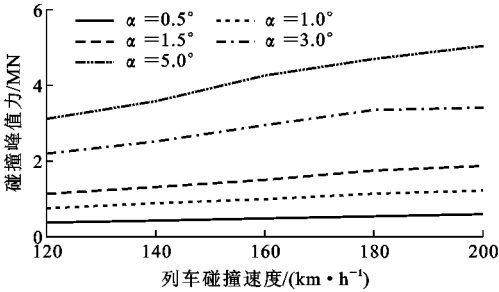


图 6 列车碰撞峰值力
Fig. 6 Peak Impact Load of Vehicle

在结构碰撞分析中,荷载冲量是衡量碰撞冲击效应的一个重要指标。对图 5 中荷载时程在时域内积分可得到列车碰撞荷载的冲量(图 7)。与碰撞荷载峰值力变化规律类似,碰撞荷载冲量与列车碰撞速度 V 呈线性增长关系,随着碰撞角度 α 增加,荷载冲量也会明显增大。在所有计算工况中,碰撞荷载冲量最小为 $4.3\text{ kN}\cdot\text{s}$ (工况 $V=120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $\alpha=0.5^\circ$),碰撞荷载冲量最大为 $84.86\text{ kN}\cdot\text{s}$ (工况 $V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $\alpha=5.0^\circ$)。

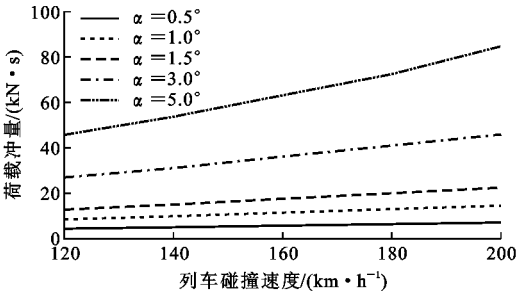


图 7 列车碰撞荷载冲量
Fig. 7 Impact Load Impulse of Vehicle

列车碰撞荷载处于较高水平的持时较短,因此除对碰撞荷载峰值力和冲量进行对比讨论外,图 8 给出了列车碰撞荷载的平均碰撞力 $\bar{P}(t)$ 。由图 8 可以发现:在同一碰撞角度的情况下, $\bar{P}(t)$ 随碰撞速度的上升较为有限;在任何一个碰撞速度等级下,平均碰撞力 $\bar{P}(t)$ 随碰撞角度的增大而显著增加。

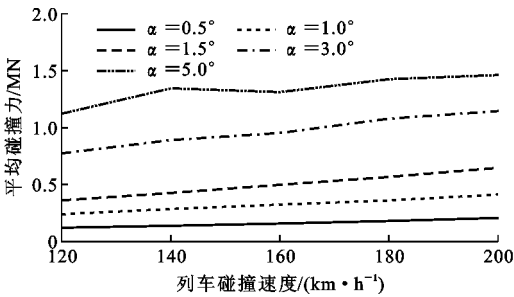


图 8 列车平均碰撞力
Fig. 8 Mean Impact Load of Vehicle

最小的平均碰撞力为 0.12 MN ($V=120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $\alpha=0.5^\circ$),最大为 1.46 MN ($V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $\alpha=5.0^\circ$)。由于不同计算条件下碰撞荷载持时并不表现出显著的线性变化规律,部分碰撞角度下列车平均碰撞力不随碰撞速度单调变化。

图 9 给出了各工况下碰撞峰值力与平均碰撞力的比值,在所有工况下,峰值力与平均碰撞力的比值都超过 2.5,在碰撞角度 $\alpha=5.0^\circ$ 时,比值最大达到 3.4,说明列车碰撞荷载的峰值脉冲相对于整个完整碰撞荷载时程,其峰值较高且持时较短。

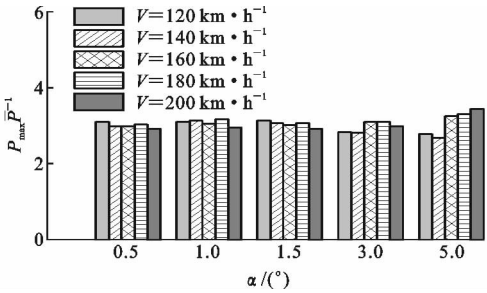


图 9 碰撞峰值力与平均碰撞力比值
Fig. 9 Ratio of Peak Impact Load to Mean Impact Load

3 U 型梁碰撞损伤分析

3.1 U 型梁碰撞损伤对比

基于第 2 节计算得到的碰撞荷载时程,采用非线性时程动力分析方法对 U 型梁在碰撞荷载作用下的损伤演化规律进行分析,计算工况参数在表 3 中列出。

表 3 时程动力分析计算工况

| 碰撞速度 $V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$ | 碰撞角度 $\alpha(^{\circ})$ 的工况 | | | | |
|--|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 3.0 | 5.0 |
| 120 | | | ✓ | ✓ | ✓ * |
| 160 | | | ✓ | ✓ * | ✓ * |
| 200 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ * | ✓ * |

注:✓表示进行时程动力分析的工况; *表示该工况实际发生严重塑性损伤。

考虑到各计算工况下进入塑性状态的钢筋数量较少,而混凝土均发生了不同程度的损伤,因此在判别 U 型梁整体损伤及防护性能时,主要以混凝土的塑性损伤程度和范围作为判别指标。限于篇幅,本文只给出了 2 个代表性工况($V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1},\alpha=0.5^\circ$ 和 $V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1},\alpha=5.0^\circ$)的 U 型梁塑性损伤分布云图。需要说明的是,图 10 中图例为 CSCM 材料本构模型损伤因子,混凝土未发生损伤时为 0,完全损伤时为 1^[24]。

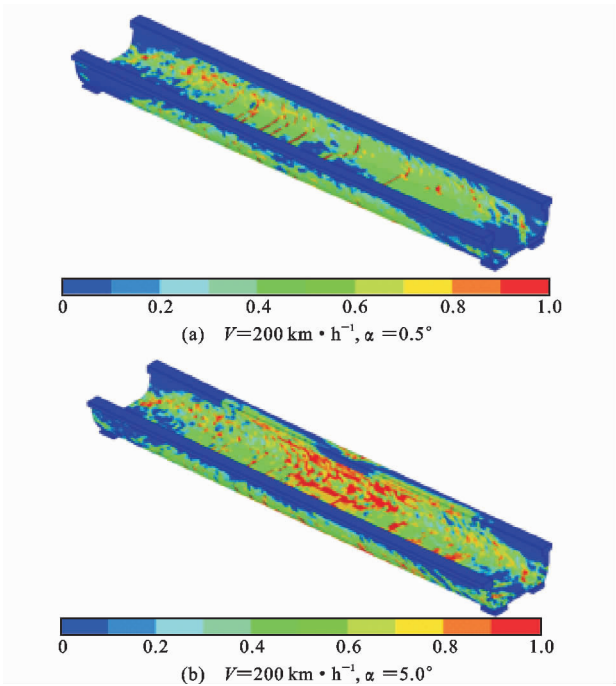


图 10 不同工况下 U 型梁损伤对比

Fig. 10 Damage Comparison of U-type Girder Under Various Cases

从图 10 可以看出,在碰撞荷载作用下各工况的 U 型梁腹板和底板均发生了不同程度的塑性损伤,特别是加载侧的 U 型梁腹板损伤最为严重。其中 $V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1},\alpha=0.5^\circ$ 工况虽然腹板和底板混凝土发生了一定程度的塑性损伤,但是大部分范围内损伤因子小于 1,损伤程度相对较小。然而在 $V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1},\alpha=5.0^\circ$ 工况, U 型梁的腹板或者底板的部分区域损伤因子达到 1,表明这些区域的混凝土已经退出工作, U 型梁的承载力会受到较大影响。

通过对表 3 所列计算工况进行对比分析,发现当碰撞角度 $\alpha=3.0^\circ$ 时,碰撞速度 $V=160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的工况,以及碰撞角度 $\alpha>3.0^\circ$ 的所有工况(表 3 中带 * 工况), U 型梁腹板和底板均发生了较为严重的塑性损伤。

3.2 U 型梁碰撞损伤演化过程

以 U 型梁在 $V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1},\alpha=5.0^\circ$ 时的时程动力分析为例,图 11 给出了在各时刻 t 时的 U 型梁跨中截面损伤演化过程。由图 11 可以发现,随着碰撞荷载时程作用于 U 型梁翼缘, U 型梁腹板和底板首先发生较为严重的塑性损伤,而后损伤逐渐发展至翼缘与腹板过渡处外侧,随着碰撞荷载的逐渐施加,最终 U 型梁腹板上部发生严重的塑性损伤。由此可知, U 型梁腹板和底板连接处及 U 型梁腹板是整个结构在碰撞荷载作用下的薄弱处,应在设计时予以重点关注。

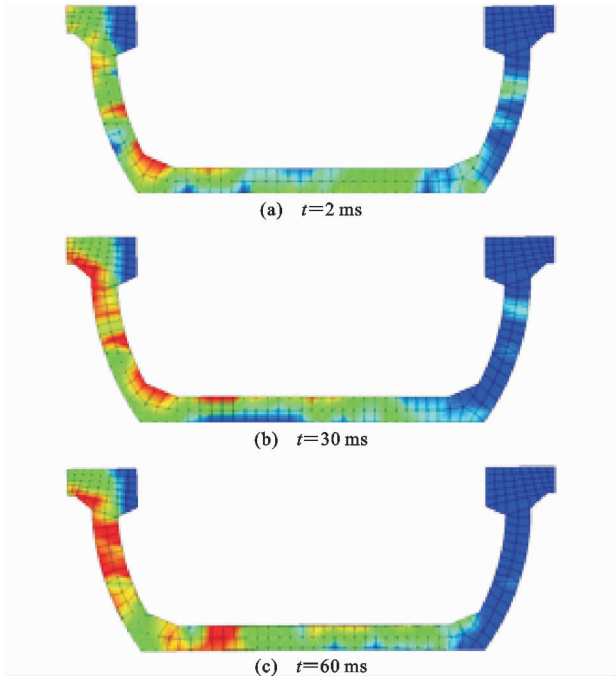


图 11 U 型梁跨中截面损伤演化
($V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1},\alpha=5.0^\circ$)

Fig. 11 Damage Evolution of U-type Girder at Mid-span Cross-section ($V=200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1},\alpha=5.0^\circ$)

图 12 给出了 U 型梁在碰撞荷载作用下跨中翼缘的侧向位移变化过程。由图 12 可以看到,在碰撞荷载施加后, U 型梁跨中位移迅速增大,在 60 ms 左右,碰撞位移超过 80 mm,随着后续碰撞荷载下降至 0,一部分弹性位移恢复,但由于腹板部分区域混凝土发生严重损伤且 U 型梁产生的塑性不可恢复,变形稳定在 60 mm 左右。

本文采用非线性时程动力分析方法进行 U 型梁动力响应分析,在荷载作用于翼缘的区域内忽略了列车碰撞的摩擦作用,因此荷载作用域上的翼缘内侧混凝土未发生破坏。实际情况下, U 型梁内侧翼缘可能会由于列车的碰撞摩擦作用造成部分混

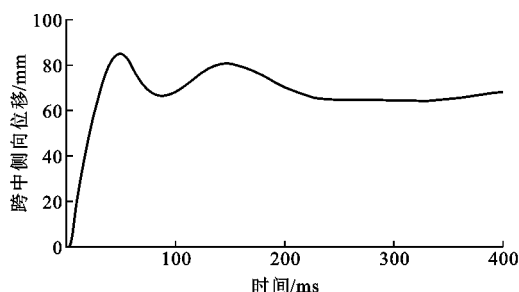


图12 U型梁跨中侧向位移时程

Fig. 12 Lateral Displacement Time History of U-type Girder at Mid-span Cross-section

凝土剥落。

4 结 语

(1)列车侧向与结构碰撞呈现两阶段特征:第一阶段碰撞荷载峰值较大,但持时较短;第二阶段碰撞荷载处于相对较低水平,随着接触刚度降低,碰撞荷载逐渐减小直至发生脱离,这一阶段荷载持时相对较长,碰撞荷载持时为35~60 ms。

(2)列车碰撞质量(载重状态)对于碰撞荷载的影响较为有限,在相同碰撞角度和碰撞速度下,计算得到的不同载重状态列车碰撞荷载时程变化规律比较接近。

(3)碰撞荷载冲量及峰值力与碰撞速度之间呈线性增长关系,随着碰撞角度增大,荷载冲量及峰值力亦逐渐增大。随着碰撞速度的增大,平均碰撞力上升较为有限,相比之下平均碰撞力随碰撞角度增大而明显增大。所有工况下,峰值力与平均碰撞力的比值都超过2.5,最大达到3.4。

(4)列车碰撞荷载作用下,U型梁塑性损伤开始发生在腹板和底板,随后逐渐发展至翼缘与腹板过渡处外侧,并最终导致腹板上部发生严重塑性破坏。损伤区域主要集中于U型梁腹板及腹板和底板连接处,在设计时对此薄弱处应重点关注,U型梁翼缘在碰撞后由于结构塑性损伤会发生明显的侧向位移。

参考文献:

References:

[1] 李小珍,杨得旺,郑 净,等.轨道交通桥梁减振降噪研究进展[J].中国公路学报,2018,31(7):55-75,136.
LI Xiao-zhen, YANG De-wang, ZHENG Jing, et al. Review on Vibration and Noise Reduction of Rail Transit Bridges[J]. China Journal of Highway and

Transport, 2018, 31(7): 55-75, 136.

- [2] 周顺华.城市轨道交通结构与施工[M].2版.北京:人民交通出版社,2017.
ZHOU Shun-hua. Structural Design and Construction in Urban Mass Transit[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [3] 王彬力.城市轨道交通U型梁系统结构受力行为研究[D].成都:西南交通大学,2012.
WANG Bin-li. Research on U-girder System Structure Subjected to Force in Urban Rail Transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [4] 雷虎军,李小珍.非一致地震激励下列车-轨道-桥梁耦合振动及行车安全性研究[J].中国铁道科学,2014,35(6):138-140.
LEI Hu-jun, LI Xiao-zhen. Coupling Vibration and Running Safety of Train-track-bridge System Under Non-uniform Seismic Excitations[J]. China Railway Science, 2014, 35(6): 138-140.
- [5] 张景峰,韩万水,景 媛,等.列车脱轨撞击U型梁动力仿真模拟及损伤分析[J].铁道工程学报,2019,36(1):48-53.
ZHANG Jing-feng, HAN Wan-shui, JING Yuan, et al. Dynamic Simulation and Damage Investigation on the U-type Girder Subjected to Derailed Train Collision[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(1): 48-53.
- [6] 向 俊,龚 凯,毛建红,等.高速列车运行安全性与桥梁防撞墙受力分析[J].铁道学报,2011,33(12):83-87.
XIANG Jun, GONG Kai, MAO Jian-hong, et al. Analysis on the Running Safety of High-speed Train and the Force of Bridge Collision-proof Wall[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(12): 83-87.
- [7] 晏启祥,李 彬,张 蒙,等.200 km·h⁻¹列车脱轨撞击作用下盾构隧道二次衬砌对管片衬砌的防护效果[J].中国铁道科学,2014,35(6):70-78.
YAN Qi-xiang, LI Bin, ZHANG Meng, et al. Protective Effect of Secondary Lining of Shield Tunnel on Segment Lining Under Derailment Impact at the Speed of 200 km·h⁻¹[J]. China Railway Science, 2014, 35(6): 70-78.
- [8] 晏启祥,李 彬,张 蒙,等.列车撞击荷载的有限元数值分析[J].西南交通大学学报,2016,51(1):1-7.
YAN Qi-xiang, LI Bin, ZHANG Meng, et al. Numerical Analysis of Train Impact Load with Finite Element Method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(1): 1-7.
- [9] 赵雅娜,刘艳辉,赵世春.高速脱轨列车作用下铁路客

- 站结构反应分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(增 1): 242-245.
- ZHAO Ya-na, LIU Yan-hui, ZHAO Shi-chun. Reactions of Railway-station Under the Impact of Derailed High-speed Train [J]. Building Structure, 2012, 42 (S1): 242-245.
- [10] GROB J, HAJDIN N. Train Derailment and Its Impact on Structures[J]. Structural Engineering International, 1993, 3(2): 88-94.
- [11] UIC777-2R, Structures Built over Railway Lines — Construction Requirements in the Track Zone[S].
- [12] EN 1991-1-7: 2003, Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1-7: General Actions — Accidental Actions [S].
- [13] ACI 358. 1R-92, Analysis and Design of Reinforced and Prestressed-concrete Guideway Structures[S].
- [14] 朱翔, 陆新征, 杜永峰, 等. 列车脱轨后运行姿态模拟[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 145-149.
- ZHU Xiang, LU Xin-zheng, DU Yong-feng, et al. Simulation for Running Attitude of a Train After Derailment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33 (23): 145-149.
- [15] ZENG Q, DIMITRAKOPOULOS E G. Vehicle-bridge Interaction Analysis Modeling Derailment During Earthquakes[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93(4): 2315-2337.
- [16] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [17] 高祥. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的铁道车辆单车碰撞问题建模与仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- GAO Xiang. Study on Modeling and Simulation of Crash Problems of Single Railway Vehicle Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [18] 宁飞, 剡建建, 刘贺. 基于 LS-DYNA 的玻璃钢复合板抗侵彻能力分析[J]. 兵器装备工程学报, 2013, 34(11): 45-47.
- NING Fei, YAN Jian-jian, LIU He. Anti-penetration Performance Analysis of Glass Fiber Reinforced Plastics Composite Board Based on LS-DYNA[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2013, 34(11): 45-47.
- [19] WRIGGERS P. Computational Contact Mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [20] FAN W, YUAN W C, CHEN B S. Steel Fender Limitations and Improvements for Bridge Protection in Ship Collisions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(12): 06015004.
- [21] 张景峰. 轻轨列车撞击 U 型梁碰撞动力仿真分析 [R]. 西安: 长安大学, 2018.
- ZHANG Jing-feng. Dynamic Simulation and Analysis of Light Rail Train-U-type Girder Lateral Collision [R]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [22] MURRAY Y D, ABUODEH A Y, BLIGH R P. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159 [R]. College Station: Texas A & M Transportation Institute, 2007.
- [23] JIANG H, WANG J J, CHORZEPA M G, et al. Numerical Investigation of Progressive Collapse of a Multispan Continuous Bridge Subjected to Vessel Collision[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22 (5): 04017008.
- [24] 张景峰, 詹刚毅, 景媛, 等. 船舶撞击双柱式桥墩破坏模式分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2018, 38 (6): 146-154.
- ZHANG Jing-feng, ZHAN Gang-yi, JING Yuan, et al. Analysis of Failure Patterns of Double-column Bridge Piers Subjected to Vessel Collision[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38(6): 146-154.