

引用格式:周德源,刘长勋.车辆撞击作用下 RC 桥墩动力响应[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):11-19.

ZHOU De-yuan, LIU Chang-xun. Dynamic Response of RC Bridge Pier Under Vehicle Impact Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 11-19.

DOI:10.19815/j.jace.2019.04028

车辆撞击作用下 RC 桥墩动力响应

周德源,刘长勋

(同济大学 结构防灾减灾工程系,上海 200092)

摘要:采用 LS-DYNA 建立了钢筋混凝土(RC)桥墩水平撞击有限元模型,简要介绍了有限元建模技术及相关参数的取值,并通过与水平撞击试验结果进行对比,验证了目前较为常用的 2 种混凝土本构模型和钢筋本构模型的有效性,进而验证了有限元结果的有效性,并进一步研究了桥墩在等代车辆撞击作用下的破坏机理,分析了与桥墩动力响应和损伤程度有关的影响参数。结果表明:对于水平撞击试验而言,采用 MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL(145[#])混凝土和 MAT_PLASTIC_KINEMATIC(3[#])钢筋材料模型构建的有限元模型能够更加准确地反映 RC 桥墩在等效车辆撞击作用下的动力特性、剪切破坏模式和损伤分布;在等代车辆撞击作用下,混凝土的损伤累积主要集中于墩底剪切带处,而桥墩其他部位的混凝土未出现明显损伤累积;参数分析结果表明,增大撞击质量能够显著增大撞击荷载峰值、桥墩变形和损伤程度;提高撞击位置会使桥墩破坏模式由局部剪切破坏转变为整体弯曲(或弯剪)破坏;在相同撞击冲量下,撞击荷载峰值、桥墩变形和耗能会随撞击速度增加而增大。

关键词:混凝土桥墩;车辆撞击;动力响应;损伤;参数分析

中图分类号:TU311

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0011-09

Dynamic Response of RC Bridge Pier Under Vehicle Impact Load

ZHOU De-yuan, LIU Chang-xun

(Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Through LS-DYNA, the finite element model of reinforced concrete (RC) pier under horizontal impact was established, and the finite element modeling technology and the value of relevant parameters were briefly introduced. By comparing with the results of horizontal impact test, two kinds of commonly used constitutive models of concrete and reinforcement were verified, so the validity of the finite element results was verified. The failure mechanism of the bridge pier under the impact of equivalent vehicles was further studied, and the influence parameters related to the dynamic response and damage degree of the bridge pier were analyzed. The results show that for the horizontal impact test, the finite element model established by MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL(145[#]) concrete and MAT_PLASTIC_KINEMATIC(3[#]) reinforced material model can more accurately reflect the dynamic characteristics, shear failure mode and damage distribution of RC piers under the impact of equivalent vehicles. Under

收稿日期:2019-04-13

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51438010)

作者简介:周德源(1960-),男,上海市人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:concrete@126.com。

the impact of equivalent vehicles, the damage accumulation of concrete is mainly concentrated in the shear zone at the pier bottom, while no obvious damage accumulation occurs in other parts of the pier. Parameter analysis shows that increasing the impact mass can significantly increase the peak value of impact load, pier deformation and damage degree. Increasing the impact position will change the failure mode of pier from local shear failure to global bending (or bending shear) failure. Under the same impact impulse, the peak value of impact load, pier deformation and energy consumption will increase with the increase of impact velocity.

Key words: concrete bridge pier; vehicle impact; dynamic response; damage; parameter analysis

0 引言

统计分析表明,车辆撞击桥墩事故已成为全球范围内城市桥梁发生破坏的主要原因。桥墩作为桥梁主要的竖向承重构件,在车辆撞击作用下,一旦发生破坏极有可能引起桥梁上部结构倒塌,因次对其在车辆撞击作用下的损伤状态和破坏机理进行研究具有重要意义。在现有条件下,大量开展结构在爆炸和撞击荷载作用下的试验研究十分困难且成本较高。基于部分试验结果并采用有限元方法对车-结构撞击事故进行模拟分析成为较为可行的方法。

在爆炸和撞击荷载作用下,LS-DYNA 是分析结构动力响应应用最为广泛的有限元软件之一。该软件能够对各种碰撞、接触问题(例如变形体接触、刚性体接触、边缘接触或侵蚀接触等)进行较为合理的模拟。目前国内外学者已采用 LS-DYNA 软件对钢筋混凝土构件抗撞性能开展了部分研究。Pham 等^[1]对钢筋混凝土(RC)梁在撞击荷载作用下的塑性铰和惯性力开展了数值分析。研究表明:在撞击荷载作用下,塑性铰并没有出现在梁的两端,而仅出现在撞击部位附近。孟一^[2]对 RC 梁的抗撞性能开展了数值分析,主要为铰支约束的梁抗力模型提供理论依据。曾翔等^[3-4]对 RC 梁的抗撞性能开展了相关研究,主要分析了 RC 梁和 RC 深梁的动力特性。

Kishi 等^[5]对不同配筋率 RC 梁的抗剪承载力开展数值分析,主要研究了等效静力抗剪荷载的计算方法。陈林^[6]建立了 RC 梁的落锤有限元模型,并验证了等代车-桥撞击(CMCD)简化模型用于数值分析的合理性。Fujikake 等^[7]通过建立 RC 梁的落锤有限元模型,验证了梁在撞击作用下的荷载和位移理论计算公式。可以看出,上述研究主要是针对 RC 梁的动力响应开展研究,而针对 RC 桥墩的抗撞性能和破坏机理研究较少。

鉴于此,本文采用 LS-DYNA 软件建立 RC 桥墩水平撞击有限元模型,验证了模型、数值算法和本

构参数的可靠性,并且深入分析了桥墩在撞击荷载作用下的破坏机理和受力状态,并通过参数分析进一步研究桥墩在撞击荷载作用下动力响应与损伤程度的影响参数。

1 数值模拟

1.1 模型简介

运用 LS-DYNA 建立了试验车辆-桥墩钢筋混凝土柱的三维分离式模型(图 1),其中钢筋与混凝土之间的连接按黏结滑移进行考虑。



图 1 RC 桥墩撞击试验

Fig. 1 Impact Test of RC Bridge Pier

该模型主要分为 2 个部分:桥墩和撞击车辆。在桥墩模型中,混凝土采用实体单元模拟,钢筋采用梁单元模拟。在撞击车辆模型中,撞击头与车厢均采用实体单元模拟。

在南京工业大学撞击实验室开展了 6 根桥墩试件的车辆水平撞击试验,限于篇幅,本文给出其中一种工况的试验结果进行数值模拟,有限元模型如图 2 所示,模型相关参数如表 1 所示。

1.2 材料模型

LS-DYNA 有限元软件材料库提供了大量的混凝土和钢筋材料模型,可用于 RC 结构在爆破和撞击荷载作用下的工作机理和动力响应分析。

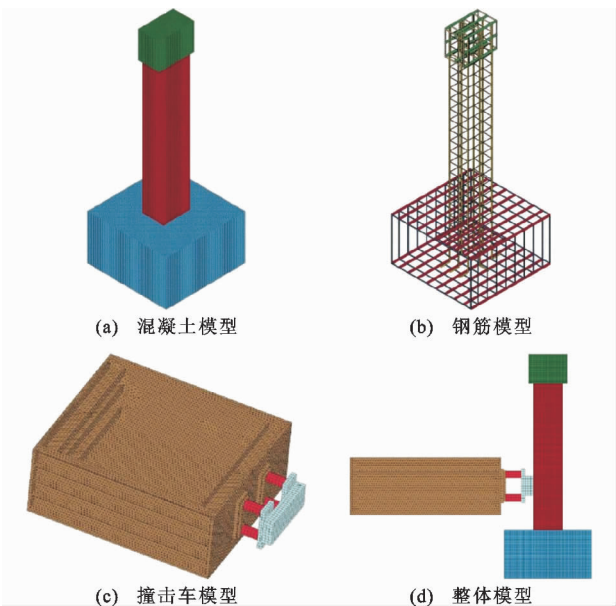


图 2 RC 桥墩撞击试验有限元模型

Fig. 2 Finite Element Models of RC Bridge Pier Impact Test

表 1 桥墩撞击有限元模型参数

Finite Element Model				
模型材料	钢筋	混凝土	纵筋	箍筋
型号	HRB400	C35	8Φ12	Φ6@100

注:试件尺寸为 240 mm×300 mm×1 500 mm。

1.2.1 混凝土

(1)MAT_CSCM_CONCRETE(159[#])

MAT_CSCM_CONCRETE(159[#])是由 Murray 等^[8-9]开发的连续盖帽混凝土材料模型。该模型在剪切屈服面和强化盖帽面之间采用光滑曲面连接,并且考虑了应变率效应对混凝土材料力学性能的影响。目前,159[#]模型在 RC 结构低速撞击领域已得到广泛应用。

(2)MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL(145[#])

MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL(145[#])模型对塑性流动和损伤积累采取分开处理方式,其中塑性流动受应力控制,会导致永久变形但不会出现弹性模量退化。损伤则会导致弹性模量和强度的不断退化,引入盖帽是为了模拟材料中空隙破坏引起的塑性体积变化。目前,姜华等^[10-13]已对 145[#]模型进行了标定,并将其应用到 RC 桥墩在船舶撞击作用下的动力响应研究。

1.2.2 钢筋

MAT_PLASTIC_KINEMATIC(3[#])是一种适用于各向同性和随动强化的材料模型,可以有效地

用于梁单元(Hughes-Liu Element 和 Truss Element)和实体单元(Solid Element)分析。该材料模型采用 Cowper-Symonds 模型^[14]考虑应变率效应对钢筋材料力学性能的影响,即

$$\sigma_d=\sigma_s[1+(\frac{\epsilon}{C})^{1/P}] \tag{1}$$

式中: σ_d 为动力作用下钢筋的应力; σ_s 为静力作用下钢筋的应力; ϵ 为应变率; C,P 为应变率参数。

1.3 黏结滑移

选用 LS-DYNA 软件中 CONTACT_1D^[14]来模拟混凝土与钢筋界面的黏结滑移^[15]。在 CONTACT_1D 中,钢筋单元节点被迫沿着混凝土单元主节点滑动,且它们之间的黏结力与滑动距离成正比。当黏结力超过某个限值时,钢筋与混凝土即会分离^[15-16]。此外,通过在混凝土与钢筋节点间设置一组虚拟弹簧来实现黏结滑移的模拟。

在不考虑损伤累积的情况下,假定混凝土与钢筋界面的黏结力为理想弹性^[16]。当考虑损伤累积时,在弹性区域,黏结剪应力与滑移仍然呈线性关系;进入塑性后,黏结剪应力随着塑性滑移的增加呈指数级降低。因此,黏结剪应力 τ 与滑移 s 的关系可以表述为

$$\tau=\begin{cases} G_s s & s \leqslant s_{\max} \\ \tau_{\max} e^{-h_{\text{dmg}} D} & s > s_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中: G_s 为黏结剪切模量,取 80 MPa·mm⁻¹^[14]; s_{\max} 为最大弹性滑移量,取 0.3 mm^[16]; h_{dmg} 为损伤指数曲线系数,取 0.12^[16]; D 为损伤指数,定义为塑性应变的总和。

1.4 撞击接触

本章选用 LS-DYNA 软件中的 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE(ASTS)模拟撞击车辆与桥墩之间的接触。ASTS 可以有效地减小接触噪声对撞击荷载时程的影响,同时可以有效地控制沙漏能占总能量的比例。由于撞击车辆与桥墩之间的刚度差异较大,ASTS 选用软约束罚函数接触算法。在 RC 桥墩水平撞击试验模拟中,参考文献^[10]及试验结果,静摩擦因数、动摩擦因数、摩擦指数衰减系数和黏滞阻尼控制参数分别取为 0.3,0.2,0.1,30。

1.5 沙漏能

LS-DYNA 在单元计算中采用单点高斯积分,显著地减小了运算次数和数据储存量,极大地提高了计算效率。由于单点积分可能会引起具有数学描述但无物理意义的零能模态^[14],即沙漏模态(Hour-

glassing Mode),因此需要加以控制。本次模拟采用沙漏黏性阻尼抑制零能模态^[14]。

2 有限元模型验证

目前,刘飞等^[17-18]采用 159# 模型模拟混凝土;姜华等^[10-13]则采用 145# 模型模拟混凝土,孟一等^[2,16,18-22]采用 3# 模型模拟钢筋。本次模拟分别采用 159#,145# 模型模拟混凝土材料,并采用 3# 模型模拟钢筋材料。表 2,3 分别给出了 159#,3# 模型的材料输入参数,而 145# 模型的参数取值详见文献[18]。本次有限元模型中桥墩边界条件和撞击部位与水平撞击试验完全一致,即桥墩基础及柱帽均采用固端约束,限制其 3 个方向的平动及转动位移。

表 2 159# 材料模型参数

Tab. 2 159# Material Model Parameters

LS-DYNA 材料模型	输入参数	数值
MAT_CSCM_CONCRETE	密度/(kg·m ⁻³)	2 380
	弹性模量/GPa	32.5
	泊松比	0.2
	抗压强度/MPa	33.18
	最大骨料粒径/mm	22
	ERODE	1.10

注:抗压强度为混凝土圆柱体轴心抗压强度;ERODE 表示单元发生侵蚀时的材料损伤情况。

表 3 3# 材料模型参数

Tab. 3 3# Material Model Parameters

LS-DYNA 材料模型	输入参数	数值
MAT_PLASTIC_KINEMATIC	纵筋屈服强度/MPa	484
	箍筋屈服强度/MPa	519
	失效应变	0.2
	SRC	40
	SRP	5

注:SRC,SRP 为材料模型的应变率效应参数。

图 3,4 分别为采用 159#,145# 混凝土材料本构模型建立的 RC 桥墩水平撞击有限元模型分析结果,表 4 列出了相关的动力响应和桥墩耗能数据。

由图 3 可以看出:由 159# 模型得到的撞击荷载峰值(714 kN)略低于试验结果(723 kN),由 145# 模型得到的撞击荷载峰值(756 kN)略高于试验结果;由 159# 模型得到的持时(15 ms)为试验结果(30 ms)的一半,而 145# 模型得到的持时(30 ms)与试验结果基本一致。

由图 4 可以看出,由 159# 模型得到的位移时程曲线与试验结果存在明显差异,而由 145# 模型得到的位移时程曲线与试验结果基本吻合。由 159# ,

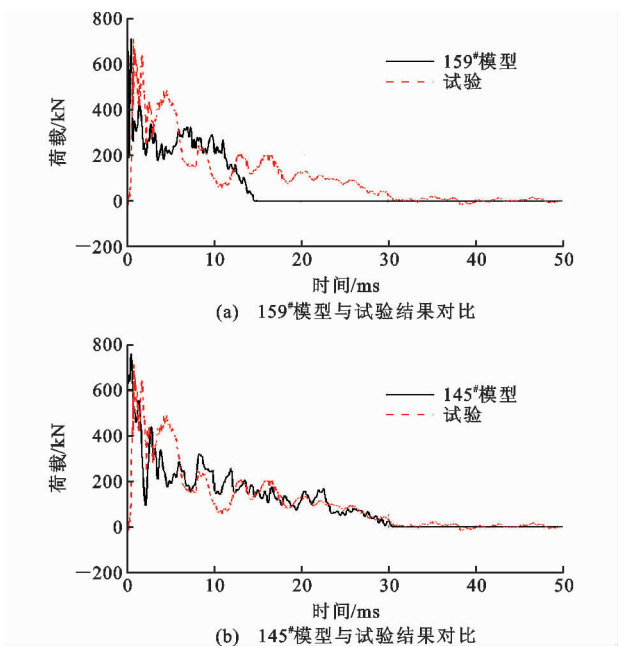


图 3 撞击荷载时程曲线对比结果

Fig. 3 Comparison of Impact Load Time History Curves

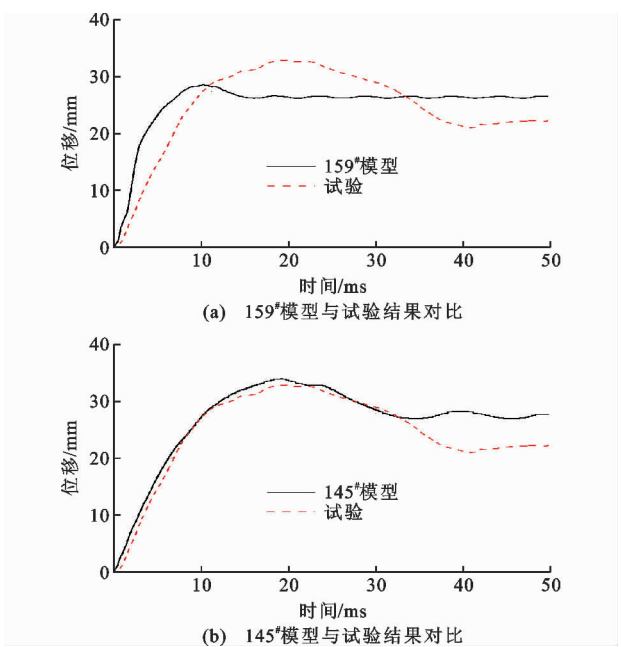


图 4 位移时程曲线对比

Fig. 4 Comparison of Displacement Time History Curves

表 4 有限元分析与撞击试验动力响应

Tab. 4 Dynamic Response of Finite Element Analysis and Impact Test

参数	水平撞击试验	159# 模型	145# 模型
荷载峰值/kN	723	714	756
最大位移/mm	32.9	28.4	33.9
残余位移/mm	22.1	26.5	27.7
桥墩耗能/kJ	9.7	8.6	9.1
持时/ms	30	15	30

145# 模型分析得到的最大位移分别为 28.4,33.9 mm。此外,由 159#,145# 模型分析得到的残余位移分别为 26.5,27.7 mm。以上分析表明,对于本次 RC 桥墩水平撞击试验而言,145# 模型能够较好地反映桥墩撞击部位的位移时程。

由表4可知,由159#,145# 模型分析得到的桥墩耗能分别为 8.6,9.1 kJ。对比可知,由 145# 模型得到的耗能水平与撞击试验结果(9.7 kJ)更为接近,因此,对于本次 RC 桥墩水平撞击试验而言,145# 模型能够较好地反映桥墩的耗能特性。

图 5 为有限元和试验的桥墩破坏模式和损伤分布对比结果。可以看出,由 159# 模型分析得到的桥墩破坏模式和试验结果存在明显差异,而由 145# 模型得到的桥墩破坏模式与试验结果基本吻合。由图还 5 可以发现,159# 模型中桥墩破坏模式呈弯曲破坏,而试验中桥墩破坏模式为剪切破坏。此外,159# 模型中桥墩损伤主要集中在撞击部位背面和墩底处,而试验中桥墩损伤主要集中在撞击部位与墩底之间的剪切带处。

观察图5(c)可以发现,145# 模型中桥墩破坏模

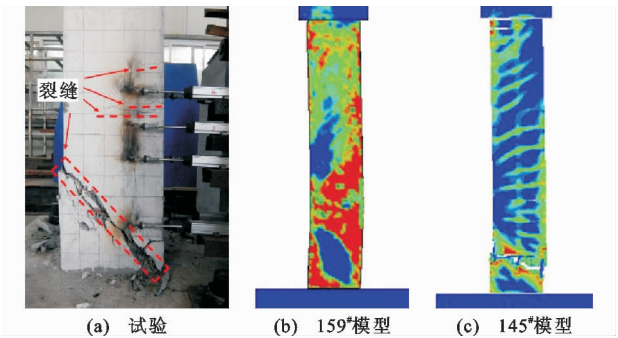


图 5 混凝土等效塑性应变云图

Fig. 5 Equivalent Plastic Strain Nephogram of Concrete

式为剪切破坏,且剪切带处的混凝土发生了单元删除,形成了剪切斜裂缝,这与试验结果基本吻合。以上分析表明,对于本次 RC 桥墩水平撞击试验而言,145# 模型能够较好地反映桥墩在车辆撞击作用下的破坏模式和损伤分布。

综上所述,对于本次 RC 桥墩水平撞击试验而言,MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL (145#)混凝土和 MAT_PLASTIC_KINEMATIC (3#)钢筋材料模型建立的 LS-DYNA 有限元模型,能够准确地反映 RC 桥墩在等代车辆撞击作用下的动力响应特征。

3 参数分析

根据已验证的有限元模型,将对 RC 桥墩动力响应和损伤状态的影响参数展开分析,主要包括:撞击质量、撞击位置、撞击冲量。表 5 给出了各影响参数的取值。

3.1 撞击质量

图 6,7 为不同撞击质量下桥墩的动力响应和耗能结果,表 6 列出了相关数据。可以看出:当撞击质量从 0.58 t 增至 1.58 t 和 2.58 t 时,荷载峰值从 514 kN 增至 756 kN 和 890 kN,桥墩撞击部位的最大位移则从 9.1 mm 增至 33.9 mm 和 61.3 mm;残余位移则从 6.2 mm 增至 27.7 mm 和 58.1 mm,耗能从 2.6 kJ 增至 9.1 kJ 和 13.8 kJ。这是由于增加撞击质量造成较大车辆撞击动能,导致荷载峰值增大,同时使得桥墩需要产生更大的变形来耗散更多的能量。

图 8 为不同撞击质量下桥墩的混凝土塑性损伤应变云图。可以看出,桥墩损伤程度和裂缝宽度随撞击质量的增加而增大。随着撞击质量增大,桥墩

表 5 桥墩参数

Tab. 5 Parameters of Bridge Pier

试件编号	混凝土等级	钢筋型号	$\rho_l/\%$	$\rho_s/\%$	m/t	$v/(m \cdot s^{-1})$	$I/(t \cdot mm \cdot s^{-1})$	P/mm
BPM-1	C35	HRB400	1.2	0.51	0.58	4.0	2.32	400
BPM-2	C35	HRB400	1.2	0.51	1.58	4.0	6.32	400
BPM-3	C35	HRB400	1.2	0.51	2.58	4.0	10.32	400
BPP-1	C35	HRB400	1.2	0.51	1.58	4.0	6.32	400
BPP-2	C35	HRB400	1.2	0.51	1.58	4.0	6.32	500
BPP-3	C35	HRB400	1.2	0.51	1.58	4.0	6.32	600
BPI-1	C35	HRB400	1.2	0.51	6.32	1.0	6.32	400
BPI-2	C35	HRB400	1.2	0.51	3.16	2.0	6.32	400
BPI-3	C35	HRB400	1.2	0.51	1.58	4.0	6.32	400

注: BPM-2, BPP-1, BPI-3 为同一撞击工况; ρ_l 为配筋率; ρ_s 为配箍率; m 为撞击质量; v 为撞击速度; I 为撞击冲量; P 为撞击高度; 试件尺寸为 240 mm×300 mm×1 500 mm。

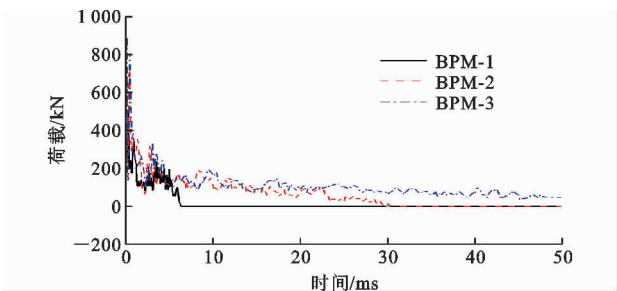


图 6 不同撞击质量下的荷载时程曲线

Fig. 6 Load Time History Curves Under Different Impact Masses

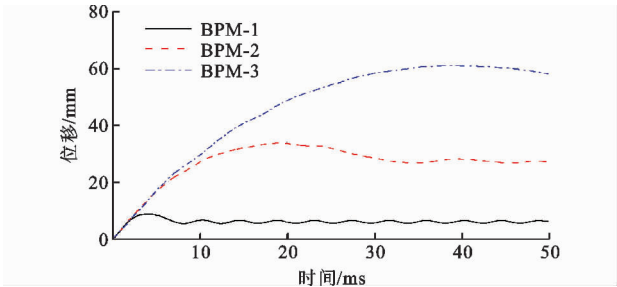


图 7 不同撞击质量下的位移时程曲线

Fig. 7 Displacement Time History Curves Under Different Impact Masses

表 6 不同撞击质量下的桥墩动力响应

Tab.6 Dynamic Responses of Bridge Pier Under Different Impact Masses					
试件编号	荷载峰值/ kN	最大位移/ mm	残余位移/ mm	桥墩耗能/ kJ	持时/ ms
BPM-1	514	9.1	6.2	2.6	7
BPM-2	756	33.9	27.7	9.1	30
BPM-3	890	61.3	58.1	13.8	50

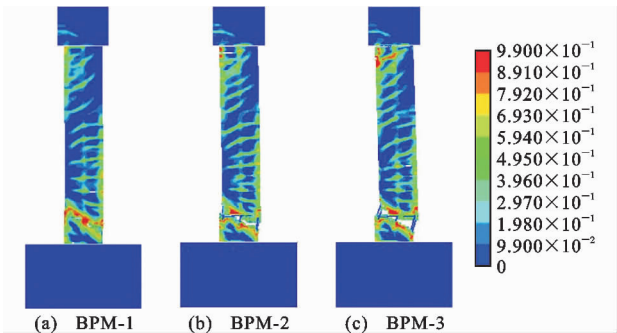


图 8 不同撞击质量下的桥墩损伤应变云图

Fig. 8 Damage Strain Nephograms of Bridge Piers Under Different Impact Masses

破坏模式从局部破损逐渐转化为墩底剪切破坏。这是由于撞击质量增加造成车辆撞击动能增大,使得桥墩需要产生更大的塑性变形来耗散撞击能量,从而导致桥墩损伤程度和裂缝宽度明显增大。

3.2 撞击位置

图 9,10 为不同撞击位置处桥墩的动力响应和耗能结果,表 7 列出了相关数据。由图 9 可以看出,荷载峰值基本不受撞击位置变化的影响。桥墩 BPP-1~BPP-3 的荷载峰值分别为 756,745,732 kN。这是由于撞击位置变化对撞击初始时刻的桥墩局部变形刚度无影响,因而荷载峰值基本不发生改变。此外,随着撞击位置升高,撞击荷载曲线在衰减段的斜率逐渐减小,使得撞击荷载形成了衰减平台。这是由于撞击位置升高使得剪跨比增大,造成桥墩破坏机制由脆性破坏转变为延性破坏,从而使桥墩在破坏阶段的承载力不会迅速下降。

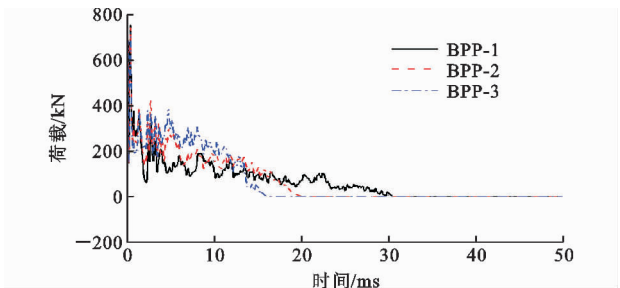


图 9 不同撞击位置下的荷载时程曲线

Fig. 9 Load Time History Curves at Different Impact Positions

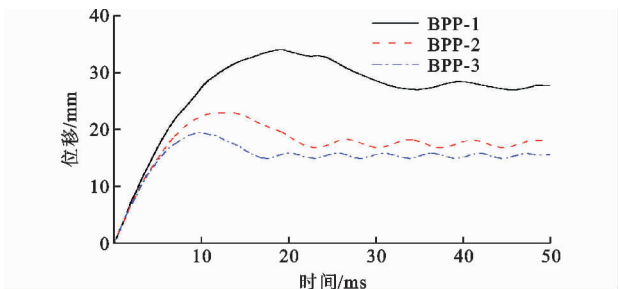


图 10 不同撞击位置下的位移时程曲线

Fig. 10 Displacement Time History Curves at Different Impact Positions

表 7 不同撞击位置下的桥墩动力响应

Tab.7 Dynamic Response of Bridge Piers at Different Impact Positions					
试件编号	荷载峰值/ kN	最大位移/ mm	残余位移/ mm	桥墩耗能/ kJ	持时/ ms
BPP-1	756	33.9	27.7	9.1	30
BPP-2	745	22.9	18.1	7.9	20
BPP-3	732	19.4	15.5	6.8	15

由图 9,10 可以看出,桥墩变形、耗能和持时随撞击位置升高而减小。当撞击位置从 400 mm 升至 500 mm 和 600 mm 时,桥墩撞击部位的最大位移从 33.9 mm 减至 22.9 mm 和 19.4 mm,残余位移从

27.7 mm 减至 18.1 mm 和 15.5 mm,耗能从 9.1 kJ 减至 7.9 kJ 和 6.8 kJ,持时从 30 ms 减至 20 ms 和 15 ms。这是由于撞击位置升高使得剪跨比增大,造成桥墩变形机制由局部剪切变形(脆性破坏)向整体弯曲(弯剪)变形(延性破坏)转变,从而提高了桥墩的残余刚度,减小了桥墩变形、耗能和持时。

图 11 为不同撞击位置处桥墩的混凝土等效塑性应变云图。可以看出,随撞击位置升高,桥墩损伤程度逐渐减小。桥墩 BPP-1 在撞击部位与墩底之间发生了剪切破坏,并形成了明显的剪切裂缝。桥墩 BPP-2 和 BPP-3 主要发生了弯曲(或弯剪)破坏,形成了明显的弯曲(或弯剪)裂缝,且桥墩撞击背面(受拉区)的混凝土也发生了明显破损。这是由于撞击位置升高改变了桥墩的破坏机制,使得桥墩由局部剪切破坏转化为整体弯曲(或弯剪)破坏,即剪切破坏下的箍筋受拉和混凝土受剪状态转化成了弯曲(或弯剪)破坏下的纵筋受拉和混凝土受压状态,从而使得混凝土和钢筋的材料强度和延性得到了合理利用。

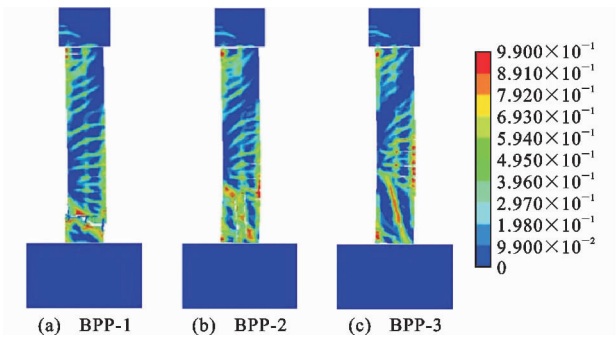


图 11 不同撞击位置下的桥墩损伤应变云图
Fig. 11 Damage Strain Nephograms of Bridge Piers Under Different Impact Positions

3.3 撞击冲量

试验及有限元分析已表明,撞击荷载峰值、桥墩撞击部位的变形和耗能随车辆撞击速度和质量的增加而增大。由于车-桥撞击系统在数值分析过程中动量是始终守恒的,因此在保持相同撞击冲量的条件下,通过增加撞击速度(减小撞击质量)研究上述问题。

图 12~14 为试件 BPI-1~BPI-3 的动力响应和耗能结果,表 8 列出了相关数据。可以看出,当撞击速度从 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,荷载峰值从 363 kN 增至 447 kN 和 756 kN,桥墩撞击部位的最大位移从 5.4 mm 增至 11.7 mm 和 33.9 mm,残余位移从 4.2 mm 增至 9.2 mm 和 27.7 mm,桥墩耗能从 1.3 kJ 增至 3.3 kJ 和 9.1 kJ。这表明

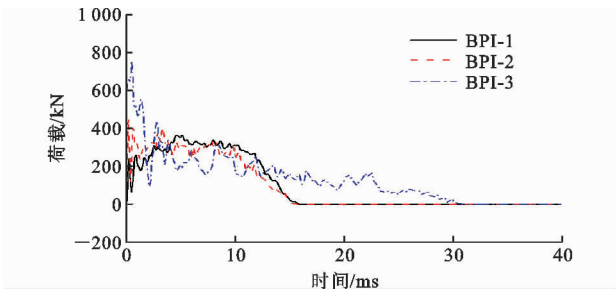


图 12 相同撞击冲量下的荷载时程曲线
Fig. 12 Load Time History Curves Under the Same Impact Impulse

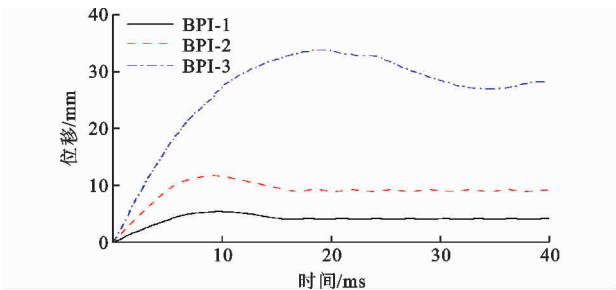


图 13 相同撞击冲量下的位移时程曲线
Fig. 13 Displacement Time History Curves Under the Same Impact Impulse

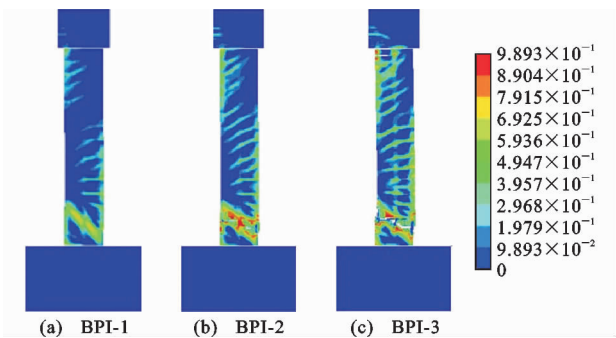


图 14 相同撞击冲量下的桥墩损伤应变云图
Fig. 14 Damage Strain Nephograms of Bridge Piers Under the Same Impact Impulse

表 8 相同撞击冲量下的 RC 桥墩动力响应数据

Tab. 8 Dynamic Response Data of RC Pier Under Same Impact Impulse

试件 编号	荷载峰值/ kN	最大位移/ mm	残余位移/ mm	桥墩耗能/ kJ	持时/ ms
BPI-1	363	5.4	4.2	1.3	15
BPI-2	447	11.7	9.2	3.3	15
BPI-3	756	33.9	27.7	9.1	30

在相同撞击冲量条件下,撞击荷载峰值、桥墩变形和耗能均随撞击速度增加而增大,即随撞击质量增加而减小。

可以看出,当撞击速度为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (撞击质量为 6.32 t) 时,桥墩未发现明显开裂;当撞击速度为

$2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (撞击质量为 3.16 t) 时,桥墩发生剪切破坏,但剪切裂缝宽度较小;当撞击速度为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (撞击质量为 1.58 t) 时,桥墩剪切破坏程度明显加重,并在墩底处产生了宽度较大的剪切裂缝。这表明在相同撞击冲量条件下,桥墩的损伤程度随撞击速度增加而增大,即随撞击质量增加而减小。

4 结 语

(1) 对于本次水平撞击试验而言,采用 MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL(145[#]) 混凝土和 MAT_PLASTIC_KINEMATIC(3[#]) 钢筋材料模型构建的有限元模型,能够更加准确地反映 RC 桥墩在等效车辆撞击作用下的动力特性、剪切破坏模式和损伤分布。

(2) 在等代车辆撞击作用下,混凝土损伤累积主要集中于墩底剪切带处,而桥墩其他部位的混凝土未出现明显损伤累积。

(3) 参数分析表明,增加撞击质量能够显著增大撞击荷载峰值、桥墩变形和损伤程度。当撞击质量从 0.58 t 增至 1.58 t 和 2.58 t 时,荷载峰值从 514 kN 增至 756 kN 和 890 kN ,桥墩撞击部位的最大位移则从 9.1 mm 增至 33.9 mm 和 61.3 mm ,残余位移则从 6.2 mm 增至 27.7 mm 和 58.1 mm ,耗能从 2.6 kJ 增至 9.1 kJ 和 13.8 kJ 。

(4) 提高撞击位置能够使桥墩破坏模式由局部剪切破坏转化为整体弯曲(或弯剪)破坏,减小桥墩的变形和损伤程度。当撞击位置从 400 mm 升至 500 mm 和 600 mm 时,桥墩撞击部位的最大位移从 33.9 mm 减至 22.9 mm 和 19.4 mm ,残余位移从 27.7 mm 减至 18.1 mm 和 15.5 mm ,耗能从 9.1 kJ 减至 7.9 kJ 和 6.8 kJ ,持时从 30 ms 减至 20 ms 和 15 ms 。

(5) 在相同撞击冲量下,撞击荷载峰值、桥墩变形、耗能和损伤程度均随撞击速度增加而增大,但随撞击质量增加而减小。当撞击速度从 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,荷载峰值从 363 kN 增至 447 kN 和 756 kN ,桥墩撞击部位的最大位移从 5.4 mm 增至 11.7 mm 和 33.9 mm ,残余位移从 4.2 mm 增至 9.2 mm 和 27.7 mm ,桥墩耗能分别从 1.3 kJ 增至 3.3 kJ 和 9.1 kJ 。

参考文献:

References:

[1] PHAM T M, HAO H. Plastic Hinges and Inertia

Forces in RC Beams Under Impact Loads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 103: 1-11.

[2] 孟 一. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁的试验及数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

MENG Yi. Experiment and Numerical Simulation Study on Reinforced Concrete Beam Under Impact Loading[D]. Changsha: Hunan University, 2012.

[3] 曾 翔, 许 斌. 无腹筋钢筋混凝土梁抗冲击行为试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 63-73.

ZENG Xiang, XU Bin. Experimental Study on the Impact-resistant Behavior of RC Beams Without Shear-resistant Rebar [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 63-73.

[4] 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.

[5] KISHI N, MIKAMI H, MATSUOKA K G, et al. Impact Behavior of Shear-failure-type RC Beams Without Shear Rebar [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(9): 955-968.

[6] 陈 林. 桥墩防车辆撞击研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

CHEN Lin. Research on Bridge Piers Subjected to Vehicle Collisions[D]. Changsha: Hunan University, 2015.

[7] 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.

[8] MURRAY Y D, ABU-ODEH A, BLIGH R. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2007.

[9] MURRAY Y D. User's Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2007.

[10] 姜 华, 贺拴海, 王君杰. 混凝土弹塑性损伤帽盖模型参数确定研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 132-139.

JIANG Hua, HE Shuan-hai, WANG Jun-jie. Parameters Determination of Elasto-plastic Damage Cap Model for Concrete Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 132-139.

[11] 姜 华, 贺拴海, 王君杰. 钢筋混凝土梁冲击试验数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 140-145.

- JIANG Hua, HE Shuan-hai, WANG Jun-jie. Numerical Simulation of the Impact Test of Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 140-145.
- [12] 姜 华, 王君杰, 贺拴海. 钢筋混凝土梁桥船舶撞击连续倒塌数值模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 68-73.
- JIANG Hua, WANG Jun-jie, HE Shuan-hai. Numerical Simulation on Continuous Collapse of Reinforced Concrete Girder Bridge Subjected to Vessel Collision[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10): 68-73.
- [13] JIANG H, ZHAO J. Calibration of the Continuous Surface Cap Model for Concrete[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 97: 1-19.
- [14] HALLQUIST J O. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2010.
- [15] 王 娟. 城市桥梁下部结构抵抗重型车辆撞击的性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- WANG Juan. Study on the Performance of Urban Bridge Substructure Against Heavy Vehicle Impact[D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [16] SHI Y, LI Z X, HAO H. Bond Slip Modelling and Its Effect on Numerical Analysis of Blast-induced Responses of RC Columns[J]. Structural Engineering & Mechanics, 2009, 32(2): 251-267.
- [17] 刘 飞. 钢筋混凝土桥墩抗车辆撞击机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LIU Fei. The Mechanism Research of Reinforced Concrete Piers Subjected to Vehicle Collisions[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [18] 王 娟, 钱 江, 周德源. 城市桥梁下部结构抗重型车辆撞击的数值仿真分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(7): 88-95.
- WANG Juan, QIAN Jiang, ZHOU De-yuan. Numerical Simulation of Urban Bridge Substructures Impacted by Heavy Vehicles[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(7): 88-95.
- [19] SHA Y, HAO H. Nonlinear Finite Element Analysis of Barge Collision with a Single Bridge Pier[J]. Engineering Structures, 2012, 41: 63-76.
- [20] SHA Y, HAO H. Laboratory Tests and Numerical Simulations of Barge Impact on Circular Reinforced Concrete Piers[J]. Engineering Structures, 2013, 46: 593-605.
- [21] SHA Y, HAO H. Laboratory Tests and Numerical Simulations of CFRP Strengthened RC Pier Subjected to Barge Impact Load[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, 15(2): 1450037.
- [22] 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.