文章编号:1674-2974(2025)05-0128-13 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025054

钢筋套筒挤压连接装配式混凝土梁冲击试验研究

陈庆军[1,2],李云龙[2],王英涛[3†],姚妙金[2],何展超[2],蔡健[1,2]
[1. 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室(华南理工大学),广东 广州 510640;
2. 华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510641;
3. 佛山大学 土木与交通学院,广东 佛山 528000]

摘 要:为研究冷挤压套筒连接下装配式混凝土梁在冲击荷载作用下的工作性能,开展了6个采用钢筋套筒挤压连接的3种拼接类型梁试件及2个现浇梁试件的落锤冲击试验,并进行了4个对应梁试件的静载对照试验,其中拼接类型包括跨中拼接、两端拼接与叠合梁形式.研究相同冲击能量下不同的落锤质量和冲击速度对试验梁的破坏形态、跨中挠度、冲击力以及变形耗能等动力响应的影响.结果表明:不同拼接类型的预制梁与现浇梁的破坏模态与裂缝发展基本一致,但跨中拼接型梁裂缝更集中于拼接缝处,拼接段与冲击位置重合时对结构较为不利;同时钢筋挤压套筒作为预制梁的拼装连接形式是可靠的.在6 762 J冲击能量不变的情况下,冲击质量由230 kg增加到400 kg,对峰值冲击力影响不明显;但均值冲击力有所提高,且3种拼接类型预制梁提高幅度均超过25%.不同拼接类型预制梁的最大变形耗能与现浇梁相当,占输入能量的50%~70%;在相同能量下增大冲击质量,除中间拼接式预制梁的最大变形耗能变化不明显外,其他试验梁的最大变形耗能增加幅度均超过15%.

关键词:钢筋套筒挤压连接;装配式混凝土梁;冲击荷载;动力响应
中图分类号:TU375.1 **文献标志码**:A

Research on Impact Test of Precast Concrete Beam with Pressed Steel Sleeve Connections

CHEN Qingjun[1,2], LI Yunlong[2], WANG Yingtao[3†], YAO Miaojin[2], HE Zhanchao[2], CAI Jian[1,2]
[1. State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science(South China University of Technology), Guangzhou 510640, China;
2. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
3. School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan 528000, China]

Abstract: To investigate the behavior of precast concrete (PC) beams with pressed steel sleeves under impact loads, a total of 6 beams with pressed steel sleeves connection of 3 different assembly types, and 2 cast-in-place

* **收稿日期**:2024-04-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178139), National Natural Science Foundation of China(52178139);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2024A1515012518), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2024A1515012518)
作者简介:陈庆军(1975—),男,广东潮州人,华南理工大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: cvwyt@fosu.edu.cn

reinforced concrete (RC) beams were tested under free-falling drop-weights, while 4 corresponding beams were tested under static load. The assembly form included mid-span splice, end splice, and composite beam forms. The research focused on the effects of different hammer masses and impact velocities on the dynamic responses of the precast concrete beams under the same impact energy, including failure modes, mid-span deflection, impact force, and deformation energy. The results obtained are as follows: the failure modes and crack development of RC and PC beams with different splicing types are basically consistent, but the cracks in mid span splicing beams are more concentrated at the splicing part, and the overlapping of splicing sections and impact positions is more unfavorable to the structure. The pressed steel sleeve is reliable as the assembly and connection form of precast concrete beams. When the impact energy of 6 762 J remains unchanged, the increase of impact mass from 230 kg to 400 kg has little effect on the peak impact force. But the average impact force has increased, and the increase in amplitude of the three types of splicing PC beams exceeds 25%. The maximum deformation energy consumption of PC beams with different splicing types is equivalent to that of RC beams, with a ratio of input energy ranging from 50% to 70%. Except for the mid-joint precast beam, increasing the impact mass at the constant energy increased the maximum deformation energy consumption of the test beam more than 15%.

Key words: pressed steel sleeve connection; precast concrete beams; impact loading; dynamic response

建筑物在服役期间可能遭受到各种冲击荷载,冲击荷载具有峰值大、持时短等特点,直接影响着建筑物的使用安全,其作用下结构和构件的受力机理与静荷载以及地震荷载作用下有很大差异.而目前装配式混凝土结构因其施工效率高、节能环保等优点在我国有着较为广泛的应用.其中冷挤压套筒连接方式操作简便,且挤压质量可控,湿作业相对较少,是一种性能较优异的连接方式,近几年在装配式结构中得到了较多应用.装配式混凝土结构在冲击下的结构性能如何,是值得进行深入研究的课题.

近年来,国内外学者对钢筋套筒挤压连接的混凝土结构的力学性能进行了大量研究.李宁波等[1-2]对7片采用套筒挤压连接的预制剪力墙进行了水平低周反复荷载试验,发现套筒挤压连接能够有效传递钢筋应力.韩文龙等[3]、赵作周等[4]分别对2个预制部分纵筋采用套筒挤压连接的叠合次梁-主梁连接节点进行静力试验,以及对2个整体式叠合梁-预制梁进行拟静力试验,结果表明连接中的挤压套筒接头同样能有效传递应力,装配整体式中节点试件的抗震性能与现浇中节点试件相当.陈庆军等[5]对7个采用冷挤压套筒连接的装配式梁柱节点进行拟静力试验并与现浇节点试件进行对比,结果表明装配式梁柱节点的抗震性能和耗能能力与现浇节点基本相当.

在冲击荷载作用下钢筋混凝土现浇梁的动态性能研究方面,Ohnuma等[6]进行了18根钢筋混凝土梁的落锤试验,结果表明梁冲击力峰值比静载下极限承载力大很多,冲击初速度较低时钢筋混凝土梁发生弯曲破坏,较高时梁发生剪切破坏.Bentur等[7]在对钢筋混凝土梁进行落锤试验时重点采集了加速度时程数据,发现碰撞过程中梁加速度值较大并在达到峰值后迅速减小.Fujikake等[8]对不同落锤高度和不同配筋形式的钢筋混凝土梁进行落锤冲击试验,结果表明三种类型梁的破坏模式均为弯曲破坏.Ožbolt等[9]通过落锤冲击试验发现混凝土梁的破坏模式和裂缝分布在很大程度上取决于冲击速度,随着冲击速度的增大,破坏模式从弯曲破坏转变为剪切破坏.赵德博[10]进行了4根钢筋混凝土梁的落锤冲击试验,提出了估算冲击荷载作用下梁体最大挠度的经验公式.

目前对于装配式混凝土梁在冲击荷载作用下的研究仍相对较少,且集中在灌浆套筒连接方面.闫秋实等[11]对5根装配式混凝土梁(PC梁)和1根作为对比的现浇钢筋混凝土梁(RC梁)进行落锤冲击试验,研究了不同拼装位置和套筒灌浆料饱满度对PC梁

的抗冲击性能影响. 梁继超[12]研究了4根PC叠合梁和4根RC梁的落锤冲击试验,分析了不同落锤锤头质量、冲击速度和冲击能量对现浇梁和预制混凝土梁的抗冲击行为的影响,拟合了预制叠合梁跨中峰值挠度和残余挠度的计算公式. Wu等[13]对冲击荷载下无黏结预应力筋连接的预制混凝土梁进行数值模拟. 结果表明跨中冲击位置处出现大量剪切裂纹,新旧混凝土交界处是薄弱区. 预制梁有着较好的自复位能力,残余挠度要小于现浇梁.

由上可知,国内外学者对于装配式混凝土结构进行了广泛的应用研究,但大部分研究集中在构件的静力力学性能或抗震性能,对于装配式混凝土结构的动力冲击性能研究较少. 而冷挤压套筒连接下装配式混凝土梁在冲击荷载作用下的研究基本未见. 本文旨在研究不同拼接类型、冲击速度和冲击质量对采用钢筋套筒挤压连接的装配式混凝土梁构件抗冲击性能的影响,为采用挤压套筒连接的预制混凝土梁在动态冲击下的安全性能设计提供借鉴.

1 试验概况

1.1 试验设计

本试验参考文献[11]并结合实际情况进行了试件的装配式设计,共制作了12根梁试件,3根RC梁和9根PC梁,试件参数与加载模式如表1所示. 其中A组梁是现浇形式,B组梁是中间拼接形式,C组梁是两端拼接形式,D组梁是叠合梁形式,梁试件的尺寸均为150 mm(宽)×300 mm(高)×2 000 mm(长),梁试件的配筋相同,根据《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)[14]中7.3.3条规定,后浇段内的箍筋加密,箍筋间距取100 mm. 每种混凝土强度等级均制作3个立方体试块,混凝土力学参数如表2所示,钢筋力学参数如表3所示. 试件设计示意图如图1所示. 试件制作流程如图2所示,第一次浇筑采用C30混凝土,包括3根现浇梁与9根预制梁的预制部分.《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)[15]中,规定了结构加固用的混凝土强度等级应高于原结构和构件的混凝土强度等级,且不得低于C20,故第二次浇筑采用C40混凝土,包括9根预制梁的后浇部分. 采用的冷挤压套筒材质为20#钢,挤压力参考文献[16]中关于冷挤压套筒的研究取值,并通过冷挤压套筒的单向拉伸材性试验得到屈服强度与极限强度. 冷挤压套筒参数如表4所示.

表1 试件设计参数

Tab.1 Parameters of beams specimens

试件编号	类型	加载模式	底筋	顶筋	箍筋	混凝土
A-W-0	现浇式	静载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30
A-W-1		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30
A-W-2		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30
B-W-0	中间拼接式	静载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
B-W-1		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
B-W-2		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
C-W-0	两端拼接式	静载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
C-W-1		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
C-W-2		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
D-W-0	叠合梁	静载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
D-W-1		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40
D-W-2		动载	2Φ18	2Φ14	Φ8@100	C30/C40

表2 混凝土立方体试块实测抗压强度

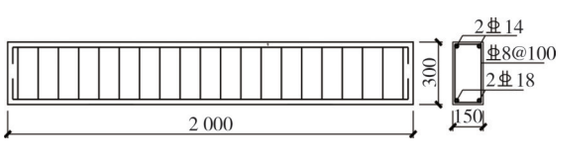
Tab.2 Measured compressive strength of concrete cubes

混凝土等级	混凝土强度/MPa			
	试块1	试块2	试块3	平均值
C30	31.40	32.16	28.74	30.77
C40	42.40	37.72	38.88	39.67

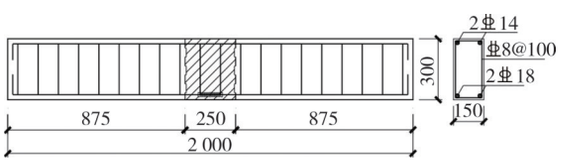
表3 实测钢筋材料性能

Tab.3 Measured steel bars material properties

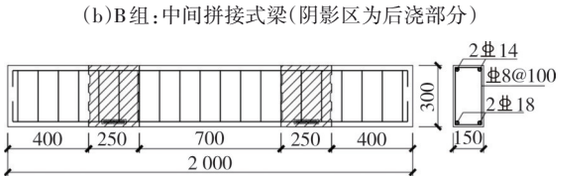
钢筋直径/mm	实测屈服强度/MPa	实测极限强度/MPa
Φ8	449.28	622.23
Φ14	419.65	621.72
Φ18	397.41	599



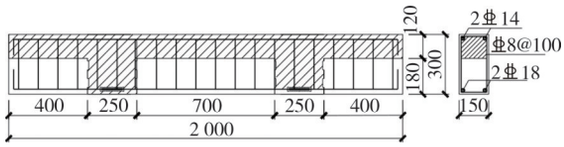
(a)A组:现浇梁



(b)B组:中间拼接式梁(阴影区为后浇部分)



(c)C组:两端拼接式梁(阴影区为后浇部分)



(d)D组:叠合梁(阴影区为后浇部分)

图 1　试件设计示意图(单位:mm)

Fig.1　Design diagram of test specimens(unit:mm)


(a)贴应变片及装模


(b)现浇及预制部分


(c)第二次浇筑前凿毛


(d)后浇部分

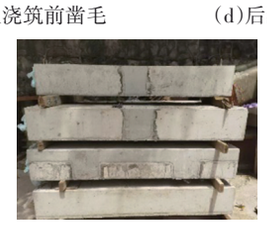

(e)7天后拆模自然养护

图 2　试件制作流程

Fig.2　Fabrication process of test specimens

表 4　冷挤压套筒参数

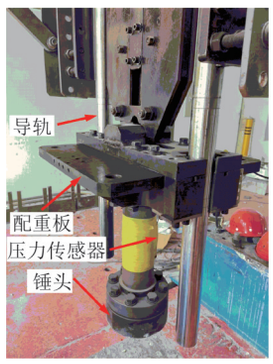
Tab.4　Parameters of cold pressed sleeve

规格	长度/mm	外径/mm	壁厚/mm	挤压力/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
A18	118	34	5.7	48	284.14	394.38

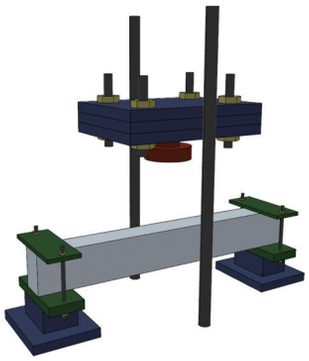
1.2　试验设备

落锤冲击试验采用超高重型落锤冲击试验机进行,如图 3 所示. 落锤冲击试验装置由落锤、竖向导轨、铰支座等组成. 落锤锤头为直径 220 mm 的圆柱形锤头,主要由锤头、压力传感器和配重组成. 试验梁钢筋应变片布置如图 4 所示. 挠度测量方案布置如图 5 所示,在梁跨中以及梁左右 1/4 净跨处分别布置 ZY-DT100 位移计以测量冲击荷载作用下梁试件的位移.

静载试验采用 1 000 t 压力试验机进行,如图 6 所示. 除加载方式与落锤试验不同外,其边界约束、测点分布等参数与落锤冲击试验保持一致. 为与冲击试验相对应,静载试验采用跨中单点静力加载.



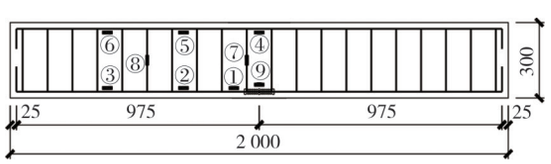
(a)落锤


(b)冲击加载装置示意图

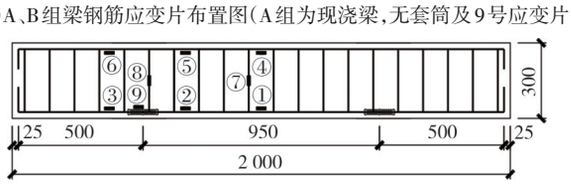

(c)试验梁安装示意图

图 3　落锤冲击试验装置

Fig.3　Drop hammer impact test device



(a)A、B组梁钢筋应变片布置图(A组为现浇梁,无套筒及9号应变片)



(b)C、D组梁钢筋应变片布置图

图 4　试验梁钢筋应变片布置图(单位:mm)

Fig.4　Layout diagrams of strain gauges on the reinforcing bars of the test beams(unit:mm)

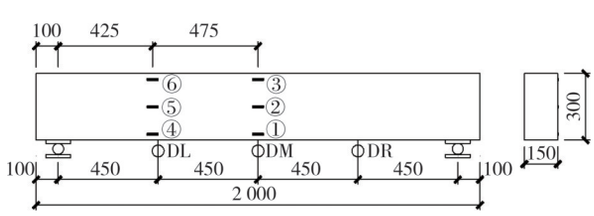


图 5　混凝土应变片与位移计布置图(单位:mm)

Fig.5　Layout diagrams of strain gauges and displacement meters on concrete(unit:mm)

数字图像相关法(digital image correlation,DIC)是一种用于捕捉测量物体表面变形的非接触式光学



图6 静力试验装置

Fig.6 Static test device

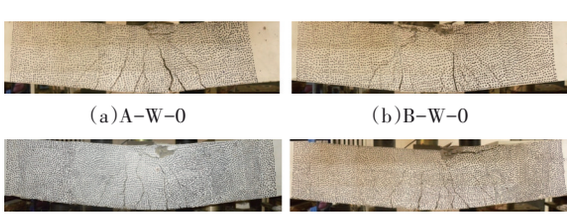
测量方法.其中DIC-2D法主要应用于物体表面的变形和应变测量分析.本次试验引入DIC-2D法对梁试件的位移、应变进行测量分析.

2 静载试验

本试验试件为3种拼接形式的预制梁和现浇梁各1根共4根试验梁,设计参数如表1中编号为0的试件所示.图7为4种类型梁的静载最终破坏形态.

由图7可见,4根梁均为典型的适筋梁受弯破坏模态,3种拼接类型的预制梁裂缝分布与普通现浇混凝土梁相似.随着荷载的增大,梁底部混凝土发生开裂,A-W-0、C-W-0和D-W-0梁均首先在跨中部位出现竖向的受弯裂缝,而B-W-0梁首先在跨中部位两侧的拼接位置处出现裂缝.随后在跨中左右两侧出现45°的斜裂缝并逐渐向梁顶发展,呈现出"八"字形分布.沿梁左右半跨方向出现多条细小斜裂缝,并随着荷载的增加向梁顶和梁底延伸.不同类型梁在静载作用下的主要控制裂缝依然是跨中部位的竖向受弯裂缝,但B-W-0梁的开裂裂缝发生位置为拼接位置处,存在交界面破坏现象,说明当静力荷载作用于拼接段时,拼接段的接缝为薄弱处.

图8为静载试验梁的荷载-跨中挠度曲线.取曲线最高点所对应的峰值荷载为极限荷载,ABCD四组



(a)A-W-0 (b)B-W-0

(c)C-W-0 (d)D-W-0

图7 静载作用下梁的破坏形态

Fig.7 Failure mode of beams under static loading

不同类型梁的极限荷载依次为157.37、166.09、163.12、163.57 kN.

由图8可见,在跨中集中静力荷载作用下,3种不同拼接类型预制梁的力学性能与普通现浇混凝土梁相同,试验梁均呈现良好的变形性能.在相同截面尺寸和合理配筋的情况下,3种预制梁的整体抗弯刚度与普通混凝土梁基本一致.4根梁的荷载-跨中挠度曲线相似,均经历3个不同的加载段:加载初始为弹性段;跨中挠度增加到6 mm时梁达到屈服,跨中挠度显著增加而荷载缓慢增加;挠度达到50 mm时挠度曲线近似为水平段,最终梁完全破坏.B-W-0梁虽然在上文中破坏形态存在交界面开裂现象,但其屈服和极限承载力仍然与现浇梁接近,表明中间拼接段接缝对混凝土开裂出现时间和裂缝位置有一定影响,但对梁的承载力影响较小.

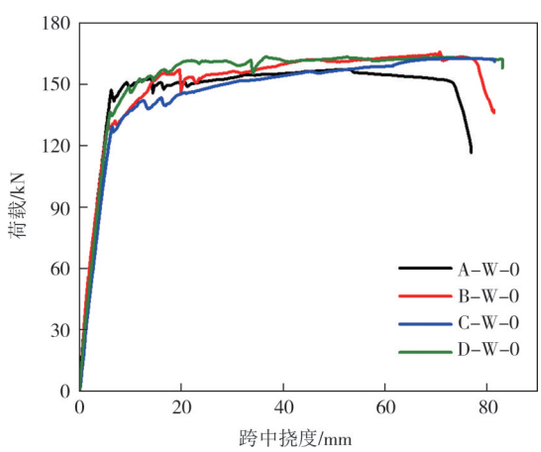


图8 静载试验梁荷载-跨中挠度曲线

Fig.8 Load-midspan deflection curve of the beam under static load

图9以B-W-0梁为例,展示其在静载下底部纵筋和套筒应变的发展情况.由图9可知,随着挠度的增大,梁底部纵筋产生拉应变且逐渐增大,跨中应变发展最快且数值最大,由跨中向支座端应变值逐渐减小;跨中处应变测点1、套筒应变测点9与半跨测点2的应变值均超过2 000 με,底部钢筋发生屈服;测点9的应变值与发展速率均低于同位置钢筋的测点1.故在相同情况下,随着挠度的持续增大,底部纵筋的破坏发生在应变值更大的钢筋处而非套筒连接处.

3 冲击荷载作用下PC梁冲击试验

3.1 试件方案

本次冲击试验为3种拼接形式的预制梁和现浇

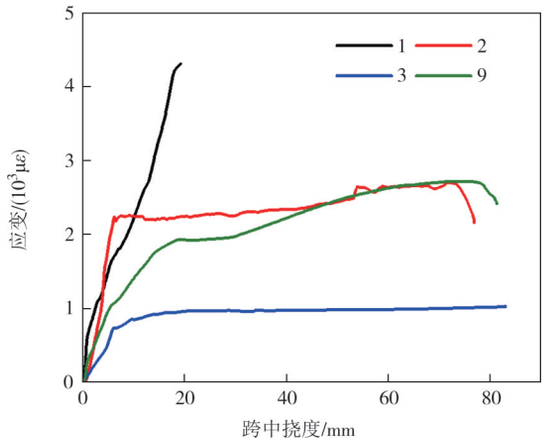


图 9　B-W-0 梁底部纵筋和套筒应变-跨中挠度曲线

Fig.9　Bottom reinforcement and sleeve strain vs mid-span deflection curve of the beam B-W-0

梁各两根共 8 根试验梁. 在相同的冲击能量下,结合预试验和有限元结果,考虑落锤质量和导轨长度等实际试验场地条件,并参考文献[11]中的冲击试验参数,设计不同的冲击质量和冲击速度来研究钢筋挤压套筒连接下预制梁在冲击作用下的动态性能. 详细的试验梁加载制度如表 5 所示,每根梁均进行一次冲击试验.

表 5　冲击试验梁加载制度

Tab. 5　Loading system for impact test on beams

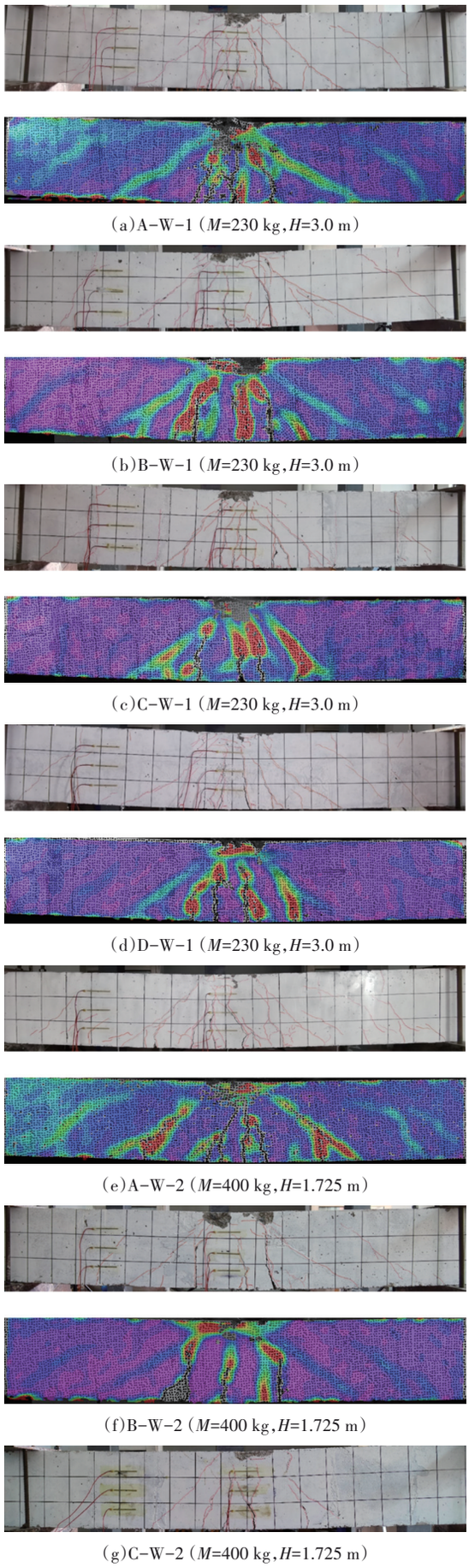
试件编号	梁类型	落锤		冲击	
		质量/kg	高度/m	速度/(m·s^{-1})	能量/J
A-W-1	现浇式	230	3.0	7.67	6 762
A-W-2		400	1.725	5.81	6 762
B-W-1	中间	230	3.0	7.67	6 762
B-W-2	拼接式	400	1.725	5.81	6 762
C-W-1	两端	230	3.0	7.67	6 762
C-W-2	拼接式	400	1.725	5.81	6 762
D-W-1	叠合梁	230	3.0	7.67	6 762
D-W-2		400	1.725	5.81	6 762

3.2　破坏形态及裂缝发展

3.2.1　整体破坏形态

图 10 给出了试验梁在冲击荷载下的破坏形态,以及结合 DIC-2D 采集并计算得到的混凝土梁侧表面应变结果. 其中 C-W-2 梁试件因采集失误未能给出应变结果.

在相同冲击能量下,冲击质量 M 为 230 kg 和 400 kg 试验梁的裂缝以冲击部位为中心呈放射状分布,主要裂缝为跨中的竖向受弯裂缝,且裂缝发展充分接近梁顶. 同时从跨中冲击点处左右两侧存在与



(a)A-W-1 (M=230 kg, H=3.0 m)

(b)B-W-1 (M=230 kg, H=3.0 m)

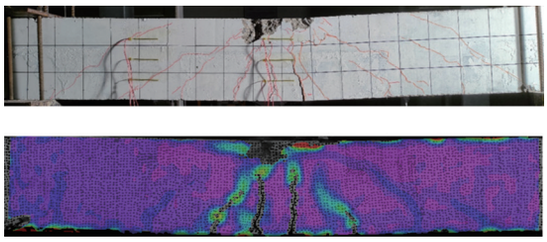
(c)C-W-1 (M=230 kg, H=3.0 m)

(d)D-W-1 (M=230 kg, H=3.0 m)

(e)A-W-2 (M=400 kg, H=1.725 m)

(f)B-W-2 (M=400 kg, H=1.725 m)

(g)C-W-2 (M=400 kg, H=1.725 m)



(h)D-W-2 (M=400 kg,H=1.725 m)

图 10 单次冲击梁破坏模态

Fig. 10 Failure mode of beam under single impact loading

水平方向呈45°的剪切斜裂缝,呈现出“八”字形,试验梁表现出典型的弯曲和剪切破坏特征.冲击质量400 kg试验梁的受弯裂缝的数目相对冲击质量230 kg试验梁有所减少,但最大裂缝宽度相对230 kg试验梁略微增大.

在冲击荷载下,3种不同类型预制梁的破坏模态和裂缝发展情况与A组现浇梁基本一致.对于B组中间拼接式梁,B-W-1和B-W-2梁跨中拼接位置处的受弯裂缝相对于其他形式的梁较少,相应地,其左右两侧接缝处的竖向裂缝发展充分,伴随着更多的交界面破坏,两者的最大裂缝宽度与A组梁相似,均在3~4 mm.对于两端拼接梁,C-W-1和C-W-2梁主要裂缝与A组现浇梁均分布在跨中位置,但C组梁几乎没有从支座梁底发展来的斜裂缝或裂缝只发展至拼接位置而没有穿透.对于D组叠合梁,D-W-1和D-W-2梁受冲击荷载下的裂缝发展与破坏模态基本与A组现浇梁相同,是3种预制形式中最接近现浇梁的.

3.2.2 梁裂缝发展过程

结合数字图像相关法DIC-2D所采集的应变数据,图11以梁C-W-1为例给出了其应变发展云图,对其裂缝发展过程进行分析.图中白色箭头指向的裂缝均为冲击过程中新产生的裂缝,白色虚线为新旧混凝土交界面.在冲击开始t=0.3 ms时,跨中处出现3条竖向裂缝;t=0.5 ms时,跨中左右两侧各出现一条45°的细小斜裂缝,并向梁底发展至两端的拼接位置,靠近支座的新旧混凝土交界面因受负弯矩而出现竖向裂缝;t=1 ms时,斜裂缝和新旧混凝土交界面竖向裂缝进一步发展,同时出现多条竖向小裂缝;t=3.0 ms时,裂缝进一步发展并贯穿截面;试验梁在t=12.7 ms时达到峰值挠度;在t=30 ms时基本没有新裂缝的出现,已出现的裂缝向梁顶和梁底充分发展,锤头与梁体逐渐脱离,接触区侧面有小面积混凝土崩裂.

3.2.3 钢筋挤压套筒形态

冲击试验结束后,将套筒位置处冲击破坏程度最严重的中间拼接式梁,即B组试件的跨中梁底混凝土凿开.发现挤压套筒完好,没有产生裂纹,且左右两侧钢筋并未出现松脱,挤压套筒连接依然牢靠.说明在梁拼接位置与冲击位置相同,即破坏程度最严重的情况下,挤压套筒仍可为梁构件提供稳定可靠的连接.

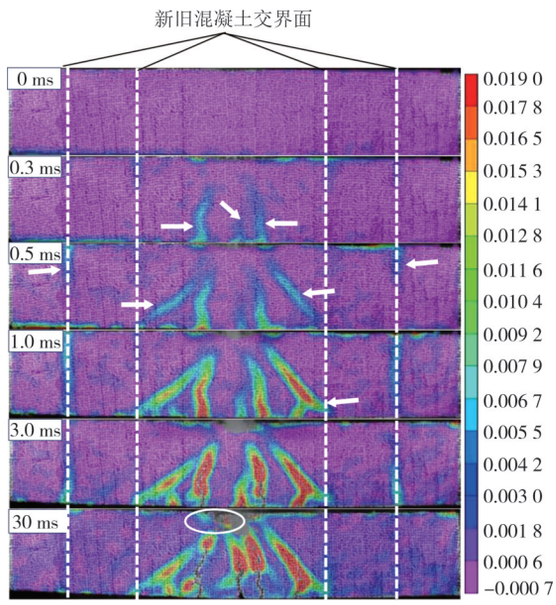


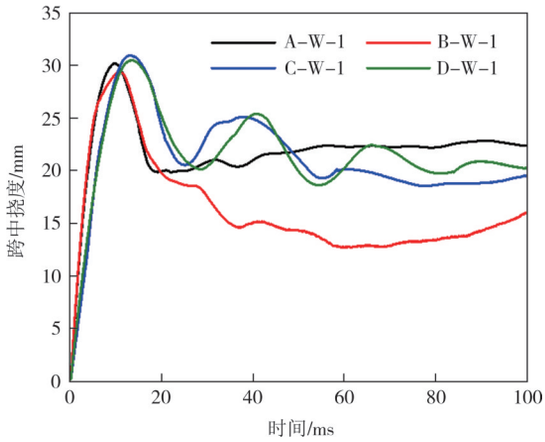
图 11 C-W-1梁裂缝发展情况

Fig.11 Development process of cracks in beam C-W-1

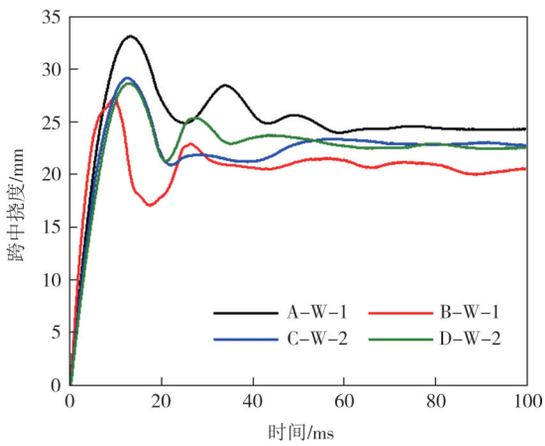
3.3 跨中挠度时程曲线分析

图12为8根冲击梁在相同冲击能量、不同冲击质量下的跨中挠度时程曲线对比图.由图可知,不同冲击质量下的试验梁跨中挠度时程曲线表现出相似的变化趋势.通过采集的数据可知,在冲击开始时锤头与梁体表面发生接触碰撞,梁体产生竖直向下的挠度并迅速达到峰值,随后锤头回弹并逐渐与梁体表面分离,梁体跨中挠度逐渐减小;随后由于锤头的反复回弹碰撞梁体表面,梁体的跨中挠度上下小幅度波动直至趋于稳定.

图13为冲击质量对跨中峰值挠度与残余挠度的影响曲线.由图13可知,当冲击能量相同且冲击质量为230 kg时,C、D组预制梁的峰值挠度和残余挠度均比A组现浇梁的大;而当冲击质量为400 kg时,C、D组预制梁的两种挠度则均比A组现浇梁小.对于B组中间拼接式梁,无论是峰值挠度还是残余挠度,都是4种梁类型中最小的.从混凝土强度来看,B组试验梁的冲击部位是梁的拼接段,其混凝土



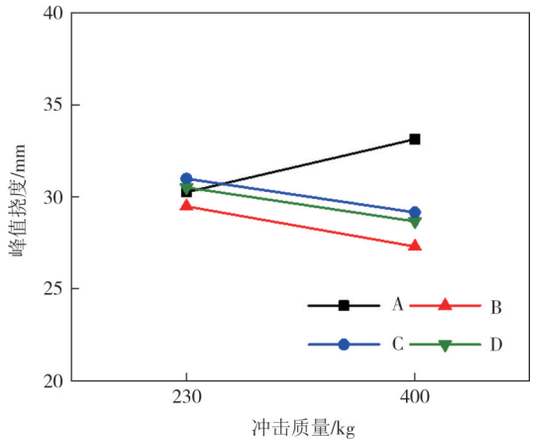
(a)冲击质量 230 kg



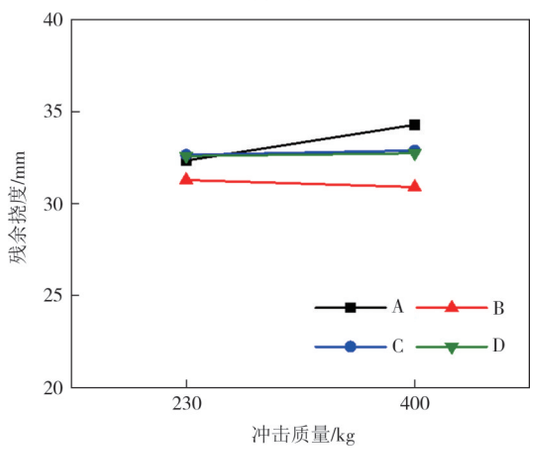
(b)冲击质量 400 kg

图 12　梁跨中挠度对比

Fig.12　Comparison of mid-span deflection of beams



(a)峰值挠度



(b)残余挠度

图 13　冲击质量对跨中挠度的影响

Fig.13　The influence of impact mass on mid-span deflection

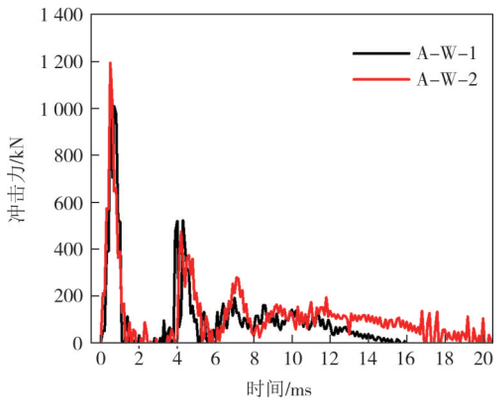
强度更高(C40);从图 10 中的冲击破坏形态可见,B 组梁拼接位置处存在局部的交界面破坏,此处裂缝出现得最早,使得接缝处的钢筋更早地承受拉力,中间拼接段混凝土承受的拉力相对减小,导致 B 组梁中间部分破坏程度要更低,从而表现出更小的跨中挠度.

在冲击能量相同时,随着冲击质量增大(冲击速度减小),A 组现浇梁的峰值挠度和残余挠度均增大,且两者增大的幅度相当;而对于 3 组预制梁,随着冲击质量的增大(冲击速度减小),梁的峰值挠度降低,这与 A 组现浇梁的规律相反,这可能与新旧混凝土交界面的复杂性有关,后续将通过更多的试验进行验证;且所有试验梁的峰值挠度与残余挠度变化幅度均较小,可认为当冲击能量相同时,冲击质量对梁挠度的影响较小.

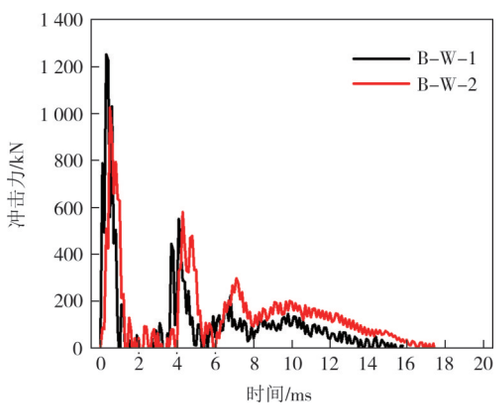
3.4　冲击力时程曲线分析

典型的冲击力时程曲线主要分为脉冲段、分离段、次脉冲段、平台段以及下降段 5 个阶段. 根据曲线特性定义 3 个特征值,包括峰值冲击力 F_p、均值冲击力 F_m 和持续时间 t_d. 图 14 是 8 根试验梁的冲击力时程曲线,由图可知,各试件的冲击力时程曲线均存在一个主波峰和一个次波峰,分别对应着脉冲段和次脉冲段,其中主波峰持续时间为 1.5~2 ms,产生的峰值即峰值冲击力 F_p,而次脉冲段是由落锤第一次回弹落下所产生;在相同冲击能量下,当冲击质量增大时,峰值冲击力变化不明显,次脉冲阶段的次峰值冲击力略有下降,但冲击力时程曲线却表现出更饱满的平台阶段.

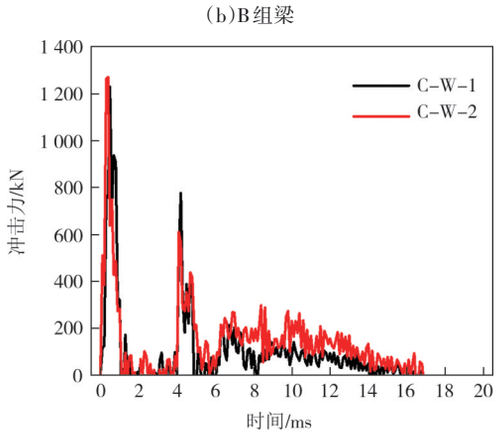
图 15 为定义的 3 个冲击力时程曲线特征值在不同梁类型和不同冲击质量影响下的对比图,包括 F_p/F_{su}、F_m/F_{su} 比值和持续时间 t_d,其中 F_{su} 为静载峰值极限荷载. 由图可知,在相同冲击能量下,不同冲击质量下 F_p/F_{su} 比值的变化都不大,可以认为随着冲击质量的增大,F_m/F_{su} 比值均有所提高,其中 A 组现浇梁变化幅度不明显,仅为 7.5%;而 3 种预制梁的提高幅度则较大,分别为 25.4%(B 组梁)、40.3%(C 组梁)、33.8%(D 组梁). 由此可知,当冲击能量相同时,



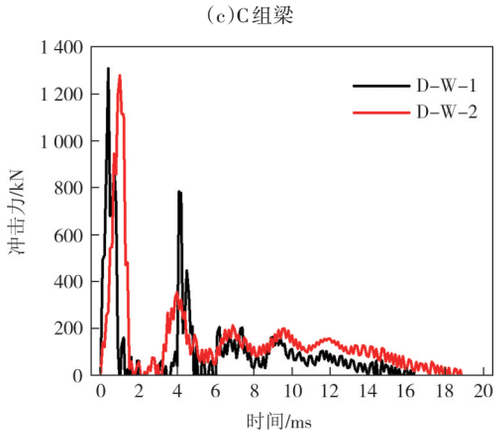
(a)A组梁



(b)B组梁



(c)C组梁

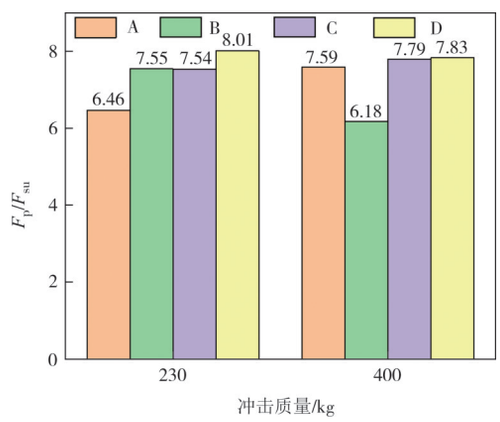


(d)D组梁

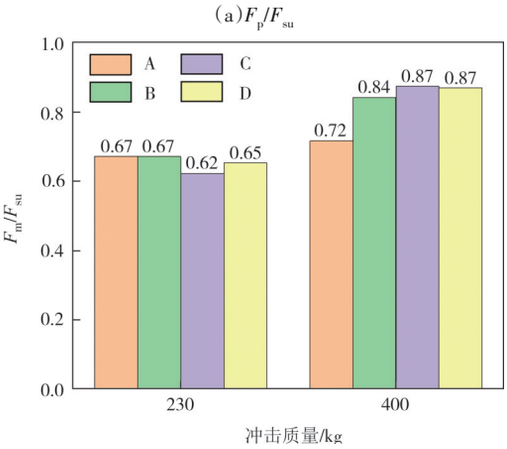
图 14 试验梁冲击力时程曲线

Fig. 14 Time history curves of impact force on test beams

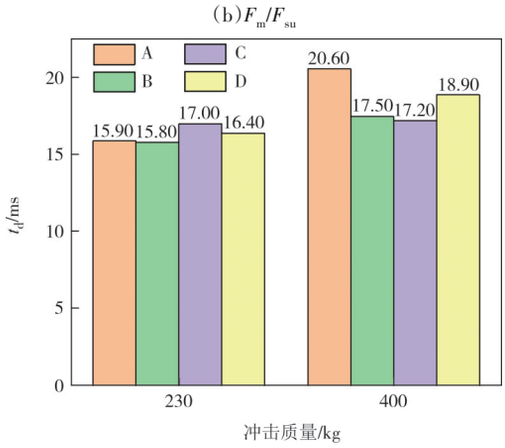
预制梁对于冲击质量的变化相较于现浇梁更为敏感. 对于持续时间 t_d, 冲击质量的增大对其影响较小, 平均约增长了 2 ms.



(a)F_p/F_{su}



(b)F_m/F_{su}



(c)t_d

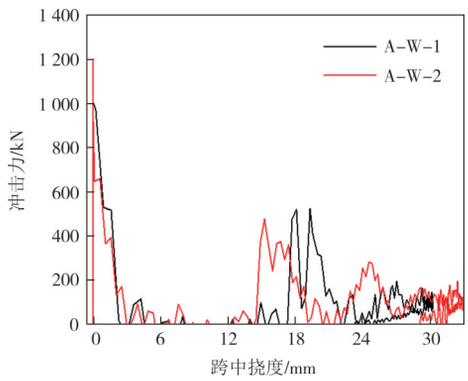
图 15 冲击力特征值对比

Fig. 15 Comparison of characteristic values of impact force

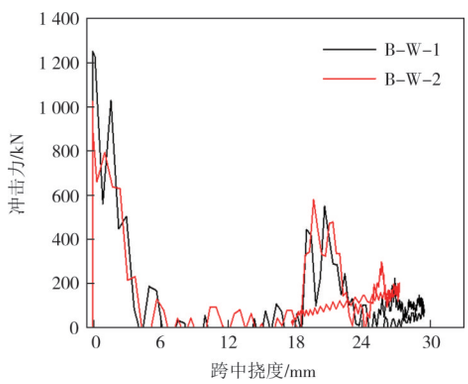
3.5 冲击力-跨中挠度曲线分析

图 16 给出了各试件在冲击荷载作用下的冲击力-跨中挠度曲线. 由图可知, 当冲击力达到峰值时, 跨中挠度基本为 0, 跨中挠度的出现滞后于冲击力的发展. 在冲击作用初始阶段, 仅梁锤接触面附近产生

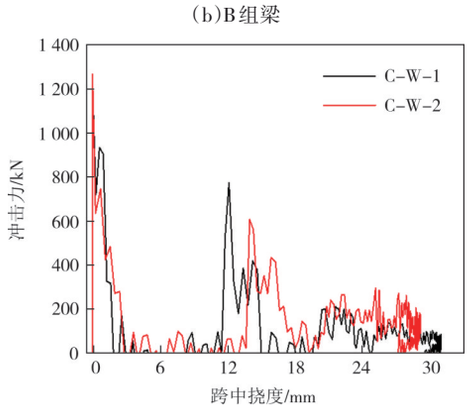
局部变形;当冲击力进入次脉冲阶段和平台阶段时,梁的跨中挠度才得到充分发展.



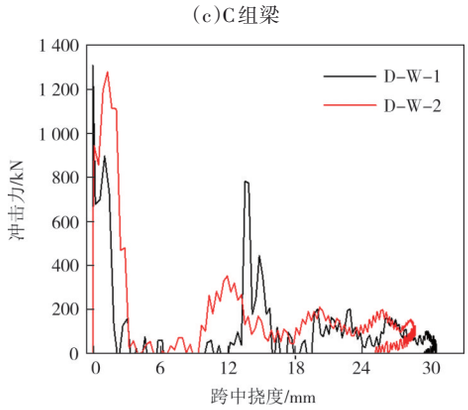
(a)A组梁



(b)B组梁



(c)C组梁



(d)D组梁

图 16　荷载冲击力-跨中挠度曲线

Fig. 16　Impact force load-deflection curves at mid-span

最大变形耗能值是对冲击力-跨中挠度曲线在跨中挠度从零到峰值挠度的区间进行积分得到的.表6为8根试验梁在冲击荷载作用下的最大变形耗能值,图17为最大变形耗能与输入能量比值.8根试验梁的最大变形耗能占比在50%~70%范围内.在相同冲击能量下,随着冲击质量的增大,只有B组中间拼接式梁最大变形耗能有少许降低且下降幅度仅有0.7%;其余试验梁的最大变形耗能均有所提高且幅度,提高幅度分别为21.7%(A组梁)、19.5%(C组梁)、16.8%(D组梁).其中,A组现浇梁的变形耗能相较于其他三种预制梁均要低,这可能与A组实测的峰值冲击力和均值冲击力相对较低有关.

表6　最大变形耗能

Tab. 6　Maximum deformation energy absorption

梁编号	冲击质量/kg	实测冲击速度/(m·s^{-1})	最大变形耗能E_{ab}/J	输入能量E_k/J
A-W-1	230	7.48	3 265.65	6 429.14
A-W-2	400	5.67	3 974.94	6 438.86
B-W-1	230	7.48	4 490.81	6 429.14
B-W-2	400	5.71	4 460.34	6 529.96
C-W-1	230	7.48	3 665.94	6 429.14
C-W-2	400	5.67	4 379.21	6 438.86
D-W-1	230	7.48	3 643.58	6 429.14
D-W-2	400	5.67	4 257.07	6 438.86

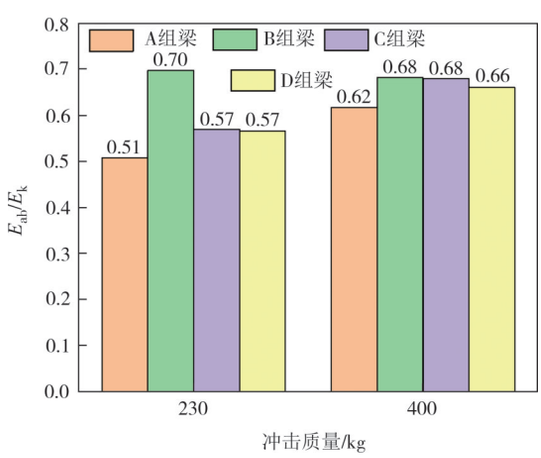


图 17　最大变形耗能与输入能量比值

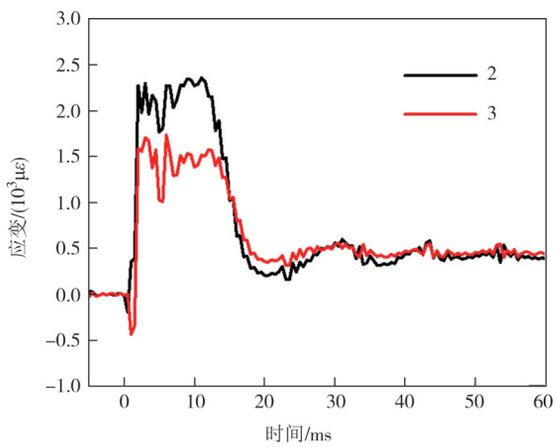
Fig.17　Ratio between maximum deformation energy absorption and input energy

3.6　钢筋和混凝土应变时程曲线分析

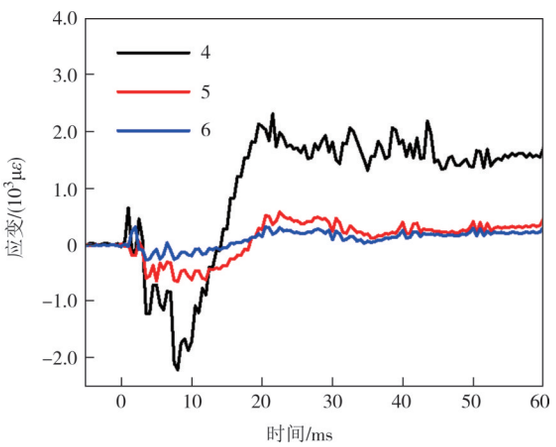
以B-W-2、C-W-2梁为例,图18给出了钢筋和混凝土应变的发展情况.对于钢筋应变,测点1~3的应变是按距离冲击点由近到远的顺序产生的,而测点2、3在梁受到冲击作用时先产生压应变再转变为

拉应变,说明梁锤碰撞发生时,冲击波从冲击点位置向梁端两侧进行传播,这与赵德博[10]观测到的情况及所给出的冲击初始阶段竖向挠动传播模型解释一致.随着冲击的进行,跨中测点1应变在梁冲击力进入脉冲段后也迅速达到峰值并超过2 000 με,底部钢筋发生屈服.C-W-2中套筒测点9与测点3位于同一位置,两者应变值水平相当且均处于弹性阶段,可见挤压套筒连接与普通钢筋连接的应变在冲击作用下具有相同的发展趋势,挤压套筒连接可靠.全过程两根梁的测点7和测点8应变均低于2 000 με,箍筋尚处于弹性阶段,这与试验梁受冲击作用下发生弯曲破坏的形态相符.

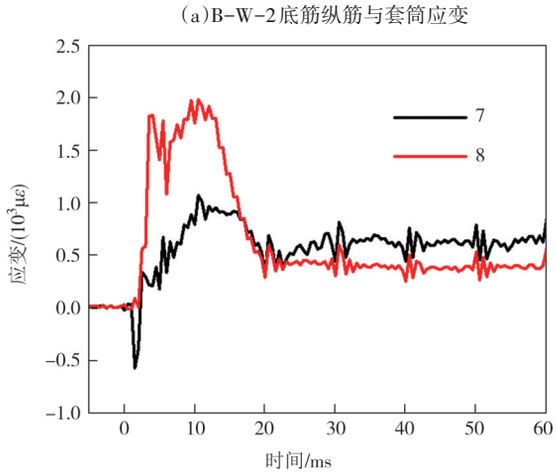
对于混凝土应变,测点1因梁侧混凝土裂缝发展而破坏,因此这里并未给出.跨中混凝土表面中部测点2和顶部测点3在冲击作用下均产生拉应变,Rossi[17]对这种现象解释为混凝土如果距离冲击位置非常近时,就会产生一定的膨胀而引起拉应变.



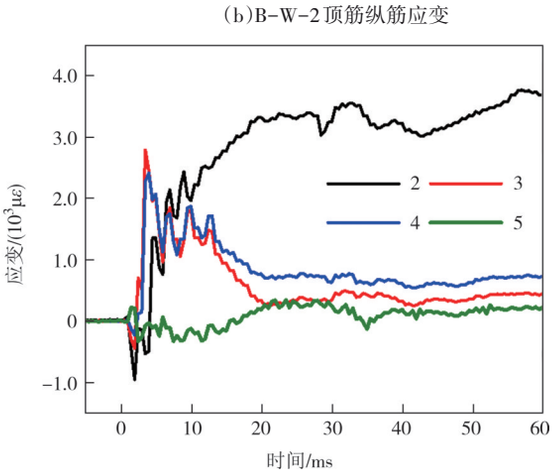
(a)B-W-2底筋纵筋与套筒应变



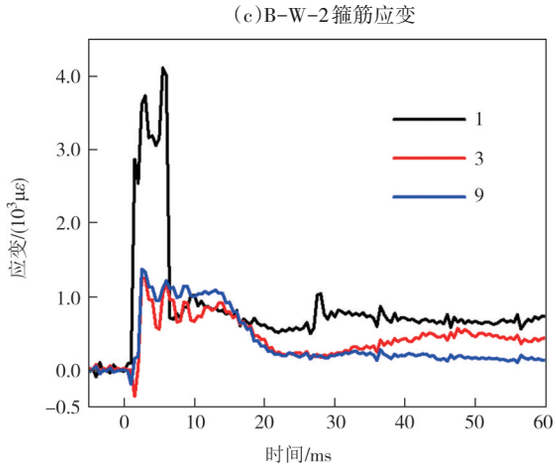
(b)B-W-2顶筋纵筋应变



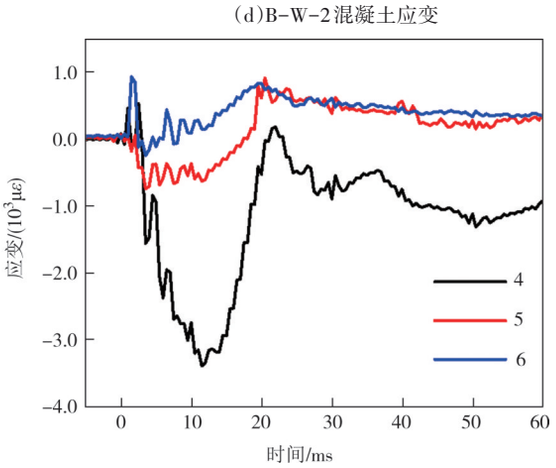
(c)B-W-2箍筋应变



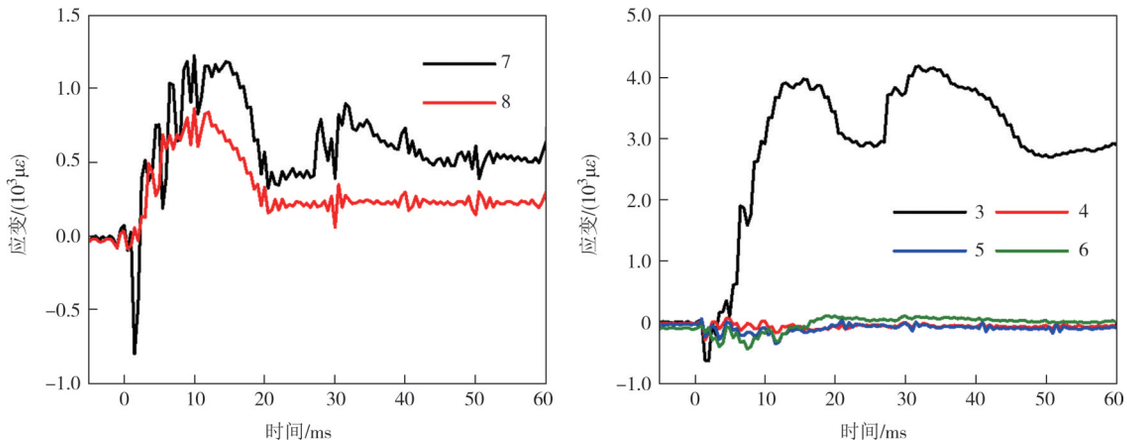
(d)B-W-2混凝土应变



(e)C-W-2底筋纵筋与套筒应变



(f)C-W-2顶筋纵筋应变



(g)C-W-2箍筋应变　　(h)C-W-2混凝土应变

图 18　钢筋和混凝土应变时程曲线

Fig. 18　Strain-time curves of steel and concrete

4　结 论

本文进行了采用钢筋套筒挤压连接的不同拼接类型梁试件的落锤冲击试验,考虑不同的落锤质量和冲击速度,测量了跨中挠度、冲击力等数据,分析现浇梁与 3 种预制梁的动力响应过程,主要结论如下:

1) 挤压套筒在试件冲击破坏后均保持完好,验证了钢筋挤压套筒作为预制梁拼装连接形式的可靠性. 同时 B 组中间拼接式预制梁的破坏形态还伴随局部的交界面破坏,说明在实际设计和应用中对考虑此种工况的构件,应采取相应的措施以提高其抗冲击能力.

2) 在相同冲击能量下增大冲击质量,A 组现浇梁的峰值挠度与残余挠度均增大,但 3 种预制梁的峰值挠度反而减小. 新旧混凝土交界面的复杂性是影响其挠度变化的关键因素之一.

3) 在相同冲击能量下,增大冲击质量对峰值冲击力 F_p 的影响较小,但均值冲击力 F_m 有所提高. 其中 A 组现浇梁 F_m 变化相对不明显,而 3 种预制梁 F_m 的提高幅度均超过了 25%,说明预制梁对于冲击质量变化更为敏感. 冲击力时程曲线平台阶段表现得更为饱满,同时持续时间 t_d 略有增加. 因此冲击能量无法合理代表冲击作用,需同时考虑冲击质量及速度.

4) 预制梁的抗冲击整体最大变形耗能与现浇梁相当,最大变形耗能占输入能量的 50%~70%. 在相同能量下增大冲击质量,除 B 组中间拼接式预制梁变化不明显外,其余试验梁最大变形耗能增加幅度均超过 15%. 表明了中间拼接式梁由于局部交界面破坏而变形耗能下降.

参考文献

[1] 李宁波, 钱稼茹, 刘时伟, 等. 部分竖向分布钢筋套筒挤压连接的预制剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016,49(7): 36-48.
LI N B, QIAN J R, LIU S W, et al. Experimental study on seismic behavior of pre-cast shear walls with partial vertical distributed steel bars pressed sleeve splicing[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 36-48. (in Chinese)

[2] 李宁波, 钱稼茹, 叶列平, 等. 竖向钢筋套筒挤压连接的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(1): 31-40.
LI N B, QIAN J R, YE L P, et al. Tests on seismic behavior of precast RC shear walls with vertical rebar splicing by pressed sleeve[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(1): 31-40. (in Chinese)

[3] 韩文龙, 赵作周, 钱稼茹, 等. 钢筋套筒挤压搭接连接叠合次梁-主梁连接节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 86-93.
HAN W L, ZHAO Z Z, QIAN J R, et al. Experimental study on mechanical behavior of composite RC beam and girder joints with rebars lapping in pressed sleeve [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 86-93. (in Chinese)

[4] 赵作周, 韩文龙, 钱稼茹, 等. 钢筋套筒挤压连接装配整体式梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(4): 45-53.
ZHAO Z Z, HAN W L, QIAN J R, et al. Experimental study on seismic behavior of assembled monolithic beam-column interior joints with rebar spliced by pressed sleeve [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(4): 45-53. (in Chinese)

[5] 陈庆军, 潘忠尧, 蔡健, 等. 冷挤压套筒连接装配式梁柱节点

抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(5): 918-925.
CHEN Q J, PAN Z Y, CAI J, et al. Experimental research on seismic behaviors of assembled beam-column joints with rebars spliced by pressed sleeves [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(5): 918-925. (in Chinese)

[6] OHNUMA H, ITO C, NOMACHI S G. Dynamic response and local rupture of reinforced concrete beam and slab under impact loading [C]//Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Belgium: North-holland Physics Publishing, 1985: 179-184.

[7] 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.

[8] 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.

[9] OŽBOLT J, SHARMA A. Numerical simulation of reinforced concrete beams with different shear reinforcements under dynamic impact loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(12): 940-950.

[10] 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 D B. Response characteristics and design method of reinforced concrete beams under impacting load [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)

[11] 闫秋实, 邵慧芳, 李亮. 冲击荷载作用下装配式钢筋混凝土梁力学性能研究[J]. 工程力学, 2017, 34(4): 196-205.
YAN Q S, SHAO H F, LI L. Study on the behavior of precast reinforced concrete beams under impact loading [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4): 196-205. (in Chinese)

[12] 梁继超. 冲击荷载作用下PC梁动力响应及破坏效应研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
LIANG J C. Study on dynamic response and failure effect of PC beams under impact load [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019. (in Chinese)

[13] WU M, JIN L, DU X L. Numerical investigation of precast RC beam with unbonded prestressing tendon under impact loads [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(4): 460-474.

[14] 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
Technical specification for precast concrete structures: JGJ 1—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

[15] 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

[16] 江少坤. 竖向钢筋挤压套筒连接装配式剪力墙抗震性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2021.
JIANG S K. Research on seismic behavior of precast rc structural walls with vertical rebars spliced by pressed couplers [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. (in Chinese)

[17] ROSSI P. Dynamic behaviour of concretes: from the material to the structure [J]. Materials and Structures, 1994, 27(6): 319-323.