

PVA-ECC-钢筋复合梁抗冲击的影响因素及破坏特性研究

齐宝欣^{1,2}, 李宜人¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要 目的 研究 PVA-ECC-钢筋复合梁抗单、多次冲击性能的影响因素。方法 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立 PVA-ECC-钢筋复合梁的有限元实体模型, 综合考虑梁的配筋参数、冲击速度、梁的跨度和截面尺寸对 PVA-ECC-钢筋复合梁抗冲击性能的影响。结果 PVA-ECC-钢筋复合梁受冲击作用下因配筋因素导致的影响在最开始时较不明显, 在后续的冲击过程中有明显影响, 且梁中纵筋配筋率越高, 梁跨中部的位移就越小; 梁跨长度的不同对 PVA-ECC 钢筋复合梁受冲击作用后的起初仅有较小的影响, 但对受冲击作用后的中后期有显著作用效果, 且梁跨中部位移随着梁跨长度的减小, 冲击体速度越大; PVA-ECC-钢筋复合梁的局部受破坏越明显, 梁跨中部位出现的耗能区域越大; 梁截面尺寸对 PVA-ECC-钢筋复合梁受冲击作用后的跨中位移变化略有影响, 跨中位移值随着截面形状短边长度的增加而减少。结论 随着冲击次数的增加, PVA-ECC-钢筋复合梁跨中应力不断增大, 随冲击次数增加而逐渐扩散至整个跨中部位; 由于 PVA 纤维的耗能能力和桥接作用, PVA-ECC-钢筋复合梁在受冲击后可通过发展多条细密小裂缝来耗散能量, 可抵抗多次冲击, 从而提升建筑结构的安全性。

关键词 PVA-ECC-钢筋复合梁; 抗冲击性能; 破坏特性; 多次冲击; 数值模拟

中图分类号 TU375; TN384

文献标志码 A

Influence Factors and Failure Characteristics of Impact Resistance of PVA-ECC-Reinforced Composite Beams

QI Baixin^{1,2}, LI Yiren¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

收稿日期: 2020-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678373); 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1817); 辽宁省教育厅项目(jytcy201825)

作者简介: 齐宝欣(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事建筑结构抗爆性能方面研究。

Abstract: In this paper, the influence factors of single and multiple impact resistance of PVA-ECC-reinforced composite beams are studied. The finite element solid model of PVA-ECC composite beam is established by using ANSYS/LS-DYNA finite element software. The influence of reinforcement parameters, impact velocity, beam span and section size on the impact resistance of PVA-ECC-reinforced composite beam is comprehensively considered. The results show that the influence of reinforcement factors on the PVA-ECC-reinforced composite beam under impact is not obvious at the beginning, but has obvious influence in the subsequent impact process, and the higher the longitudinal reinforcement ratio in the beam, the smaller the displacement in the middle of the beam span. The results show that the different span length has little effect on the initial impact of PVA-ECC reinforced composite beams, but has significant effect on the middle and late impact, and the displacement of the middle span decreases with the span length. The larger the impact velocity is, the more obvious the local damage of PVA-ECC reinforced composite beam is, and the larger the energy dissipation area appears in the middle of the beam span; The results show that the section size has a little effect on the mid span displacement of PVA-ECC reinforced composite beams, and the mid span displacement decreases with the increase of the short side length of the section shape. The conclusion of this paper is that with the increase of impact times, the mid span stress of PVA-ECC reinforced composite beam increases continuously, and gradually spreads to the whole mid span with the increase of impact times. Due to the energy dissipation capacity and bridging effect of PVA fiber, PVA-ECC reinforced composite beams can dissipate energy by developing multiple fine cracks after impact, which can resist multiple impacts, so as to improve the safety of building structure.

Key words: PVA-ECC-reinforced composite; impact resistance property; failure characteristics; repeated impact; numerical simulation

随着土木工程领域中超级工程的大量施工建设,在对建筑结构的抗冲击、抗倒塌性能的要求越来越高。PVA 增强纤维水泥基复合材料 (PVA-ECC) 由 V. C. LI 和 C. K. Y. LEIMG^[1] 基于微观力学和断裂力学理论提出的新型纤维水泥基复合材料,具有强韧性^[2-3]、抗疲劳性^[4-5] 和抗冲击性^[6] 的水泥基复合材料。因此,近些年来,PVA-ECC 等水泥基复合材料得到了广泛的工程应用和推广^[7-8]。

F. YUAN^[9] 采用 ATENA 有限元软件建立 PVA-ECC 钢筋复合梁的四点受弯三维实体模型,通过与试验结果对比验证了有限元模型的准确性。WANG Qiusheng^[10] 研究了钢纤维、玄武岩纤维和硫酸钙对高掺量粉煤

灰聚乙烯醇 (PVA) 纤维基工程水泥基复合材料 (ECC) 力学性能的影响,分别进行了单轴拉伸、压缩和四点弯曲试验,对混合料的力学性能进行了表征。W. K. LEE 等^[11] 研究了纤维增强混凝土与 FRP 筋配合使用,以减少梁的裂缝宽度,将改进的 Gergely-Lutz 模型应用于测量裂缝宽度,结果表明,FRP 筋显著降低了纤维增强混凝土梁的最大裂缝宽度。H. WANG 等^[12] 试验研究聚丙烯纤维增强混凝土梁的受弯性能,确定了纤维加固构件延性指标,改善了梁的弯曲性能。马益标^[13] 研究了 PVA-ECC 钢筋网加固后梁的抗弯、抗剪性能,结果表明,加固后提高了梁的抗弯、抗剪承载力、刚度和限制裂缝发展。王冲^[14] 研究 PVA-ECC 钢丝网加固混凝土

板、梁的抗弯性能,加固后提高了结构的承载能力和刚度。赵培智^[15]研究箍筋对钢筋增强 ECC 剪切试件的破坏模式,确定了钢筋种类、配箍率对增强钢筋 ECC 的抗剪性能的影响。目前,针对 PVA-ECC-钢筋水泥基复合结构构件的力学性能研究主要以静力学为主,针对动荷载,尤其是冲击荷载作用下 PVA-ECC-钢筋复合梁的动态破坏响应因素的研究成果较少。

基于此,笔者综合考虑单、多次冲击作用下 PVA-ECC-钢筋复合梁抗冲击影响因素,通过数值模拟方法对比分析梁配筋参数、梁跨长度、冲击体质量和截面尺寸等因素对 PVA-ECC-钢筋复合梁在多次冲击作用下抗冲击性能的影响。研究表明:随着冲击次数增加,PVA-ECC-钢筋复合梁跨中应力不断增大,且逐渐扩散至整个跨中部位;随着梁跨度的增加,PVA-ECC 钢筋复合梁受冲击作用的影响越大。

1 有限元建模方法

1.1 有限元模型

笔者设计的 PVA-ECC-钢筋复合梁,截面形式如图 1 所示。笔者采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,创建落锤、PVA-ECC 梁、钢筋和约束刚体的实体模型。其中,落锤、混凝土梁和约束刚体均采用 3D SOLID164 单元,内部钢筋采用 3D LINK 160 单元见图 2。其中,主要考虑钢筋配筋参数,截面尺寸、梁的跨度和落锤等模型参数,试件工况见表 1。



图 1 PVA-ECC-钢筋复合梁示意图
Fig. 1 Schematic diagram of PVA-ECC-reinforced composite beam

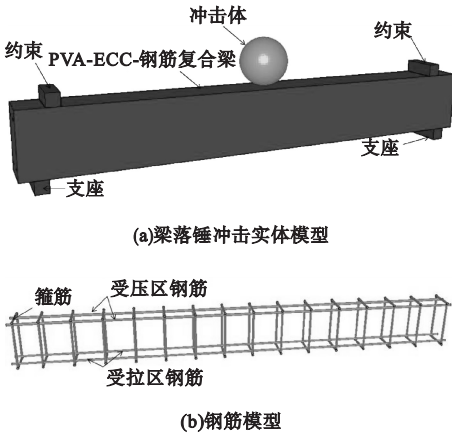


图 2 PVA-ECC-钢筋复合梁有限元模型
Fig. 2 The finite element model of PVA-ECC-reinforced composite beam

1.2 材料本构模型参数

PVA-ECC 采用脆性损伤本构模型,关键字为 * MAT_BRITTLE_DAMAGE, PVA-ECC 抗拉强度为 9.17 MPa,抗压强度为 78.6 MPa,拉伸初裂强度为 4.0 MPa,弹性模量为 2.0×10^4 MPa,泊松比为 0.2。落锤和支座约束采用刚体材料模型,关键字为 * MAT_RIGID,密度为 7.85×10^{-2} g/mm³,弹性模量为 2.0×10^5 N/mm²,泊松比为 0.3。钢筋采用各向同性硬化和随动硬化塑性模型,考虑应变率效应,关键字为 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC,屈服强度为 300 MPa,密度为 7.85×10^{-2} g/mm³,弹性模量为 2.0×10^5 MPa,泊松比为 0.3,切线模量为 2.0×10^3 MPa,应变率效应参数 C 为 5, P 为 40,失效应变为 0.15。单元网格划分尺寸分别为 PVA-ECC 梁采用 5 mm;落锤和支座约束单元划分为 15 mm。梁与支座约束采用自动面接触,接触摩擦系数为 0.3。

1.3 模型验证

采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟 PVA-ECC 梁落锤冲击荷载作用下的破坏形态,数值模型建模依据文献[16-17]。模型的截面尺寸如图 3 所示。落锤冲击的位置在 PVA-ECC 梁跨中部位,有限元模型选取文献中的落锤高度 1m,落锤质量 7.34 kg 的

表 1 试件工况和模型参数

Table 1 Test conditions and model parameters

模型 编号	纵筋(拉、压)、箍筋参数	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	跨度/ mm	冲击体 质量/kg	截面长×宽/ mm
S1	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
S2	2Φ12;2Φ10;Φ16@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
S3	2Φ12;2Φ10;Φ20@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
S4	2Φ16;2Φ16;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
S5	2Φ20;2Φ20;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
L1	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	700	50	150×250
L2	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 100	50	150×250
L3	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 500	50	150×250
L4	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
N1	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	15	150×250
N2	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	30	150×250
N3	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
N4	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	100	150×250
N5	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	200	150×250
J1	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	100×250
J2	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	120×250
J3	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
C-S1	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
C-S4	2Φ16;2Φ16;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
C-S5	2Φ20;2Φ20;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
C-L2	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 100	50	150×250
C-L3	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 500	50	150×250
C-L4	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
C-N2	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	30	150×250
C-N3	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	50	150×250
C-N4	2Φ12;2Φ10;Φ10@125	78.6	9.17	1 900	100	150×250

工况进行数值模拟和试验结果对比验证(见图4)。

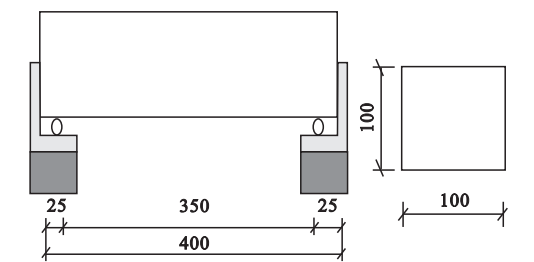


图 3 PVA-ECC 梁示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PVA-ECC beam

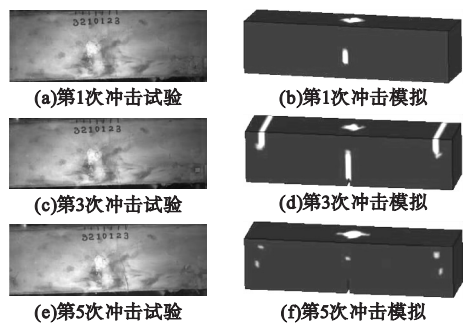


图 4 多次冲击下 PVA-ECC 梁的破坏模式

Fig. 4 Failure mode of PVA-ECC

beam under multiple impact

2 PVA-ECC-钢筋复合梁抗单次冲击的影响因素分析

2.1 梁纵向配筋

笔者研究 PVA-ECC-钢筋复合梁的配筋参数对其在抗冲击性能方面的影响,数值模拟中分别设置了工况 S1 ~ S5,共 5 组 PVA-ECC-钢筋复合梁,其冲击力时程曲线如图 5 所示。其中,PVA-ECC 抗压、抗拉强度,梁跨度,冲击体质量和截面尺寸均相同,纵筋和箍筋配筋参数不同(见表 1)。

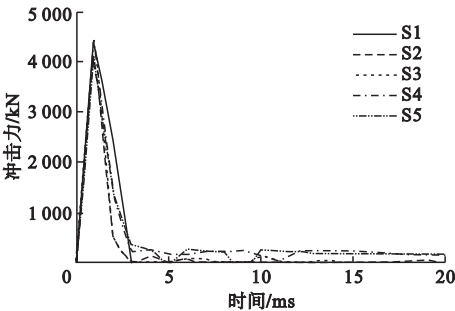


Fig. 5 The time history curve of impact force in S-groups beams

由图 5 可知,不同配筋率的 PVA-ECC-钢筋复合梁的冲击力时程曲线。其中,到达冲击力峰值前,冲击力和时间成线性关系;当 2.5 ms 时,达到冲击力峰值后的 S 组(S1 ~ S5)冲击力时程曲线略有不同(见图 6),原因是复合梁在受冲击后对首个冲击波的响应速度略缓,导致工况 S1 ~ S5 各组复合梁冲击力时程曲线在短时间内出现无较大差别的现象。

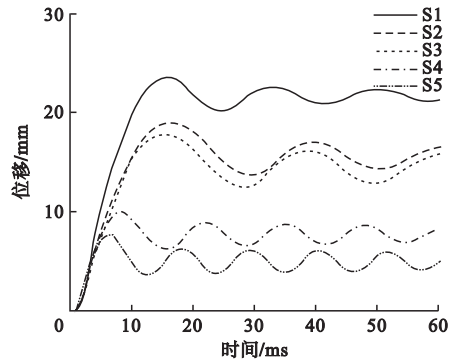


Fig. 6 The time history curve of mid-span displacement in S-groups beams

由图 6 可知,工况 S1 ~ S3 复合梁所配钢筋仅箍筋直径不同,它们的跨中位移时程曲线相近,复合梁箍筋配筋率对梁的跨中最大位移影响较小。由 S1、S4 和 S5 复合梁的跨中位移时程曲线看出,随着纵筋配筋率增大,复合梁跨中位移减小;结果表明复合梁中纵筋配筋率越大,抗冲击性能越强。

2.2 梁跨度

笔者研究 PVA-ECC-钢筋复合梁的跨度对其在抗冲击性能方面的影响,数值模拟中分别设置了工况 L1 ~ L4,共 4 组 PVA-ECC-钢筋复合梁,其冲击力时程曲线如图 7 所示。其中,梁的配筋参数,PVA-ECC 抗压、抗拉强度,冲击速度和截面尺寸均相同,跨度不同(见表 1)。

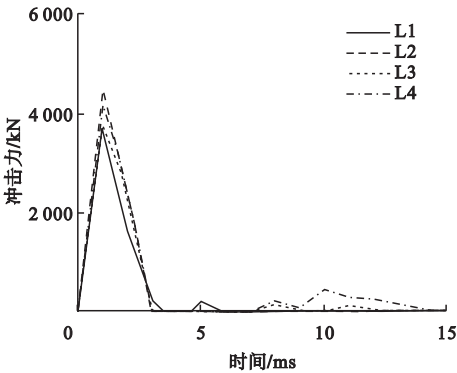


Fig. 7 The time history curve of impact force in L-groups beams

由图 7 可知,PVA-ECC-钢筋复合梁在冲击荷载作用之初冲击力和时间成线性关系,在受冲击后的前 3 ms 内,各复合梁的冲击力时程曲线趋势基本一致;随着复合梁跨度的增大,最大冲击力逐渐增加;考虑各复合梁在冲击作用之初主要受冲击体和 PVA-ECC-钢筋复合梁之间的接触刚度作用,由于冲击体为自由落体,使得各复合梁在后续的受冲击过程中存在冲击体“反弹效应”,使得冲击力时程曲线有振荡发生。

跨度对冲击作用下 PVA-ECC-钢筋复合梁的跨中位移有显著影响(见图 8)。随着梁跨度

的增加使得跨中位移的变化更大。工况 L1 和工况 L4 相比,振幅更小、自工况振更快;表明梁跨度越小,PVA-ECC-钢筋复合梁越能在受到冲击作用后出现更为迅速的自振响应,也就相当于梁跨越短抗冲击效果越好。

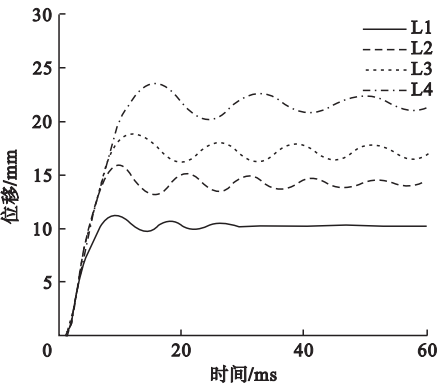


图 8 L 组梁跨中位移时程曲线

Fig. 8 The time history curve of mid span displacement in L-groups beams

2.3 冲击速速

笔者研究 PVA-ECC-钢筋复合梁在不同冲击速度作用时的破坏状态,数值模拟中分别设置了工况 N1 ~ N5,共 5 组 PVA-ECC-钢筋复合梁,其冲击力时程曲线如图 9 所示。截面尺寸、配筋参数、PVA-ECC 抗压抗拉强度和梁跨长度均相同,冲击速度不同(见表 1)。为统一不同速度下的冲击体有相同冲击能量,通过改变冲击体自身质量来获得冲击体 200 kg 在 1 m 高处自由落体产生的冲击能量,以复合梁 N3 的冲击能量作为标准。

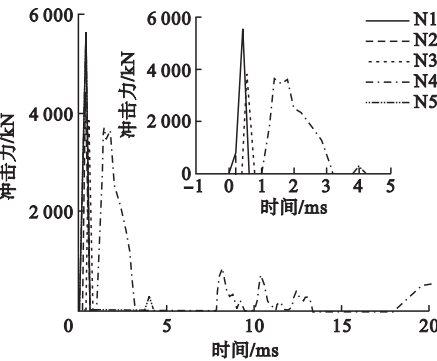


图 9 N 组梁冲击力时程曲线

Fig. 9 The time history curve of impact force in N-groups beams

由图 9 可知,在工况 N1 (冲击体小球质量为 15 kg、冲击速度为 16.7 m/s)下,PVA-ECC-钢筋复合梁冲击力峰值远远高于其他工况;而冲击体速度越小,复合梁的冲击力峰值越小。

N 组梁跨中位移时程曲线如图 10 所示。由图 10 可知,冲击速度低于 8.85 m/s 时,PVA-ECC-钢筋复合梁的跨中最大位移和残余位移都明显随着冲击速度的增加而变大,且速度越大,两者增加得越明显;当冲击速度高于 11.43 m/s 时,PVA-ECC-钢筋复合梁的跨中最大位移和残余位移随着冲击速度的增加而变大,且冲击体质量越大,梁跨中最大位移越大。因此,当冲击体质量较大时应注意冲击速度,避免冲击荷载作用后的 PVA-ECC-钢筋复合梁发生更大变形。

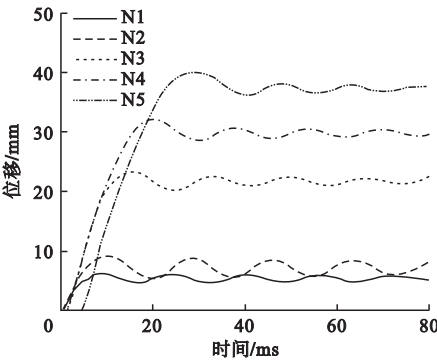


图 10 N 组梁跨中位移时程曲线

Fig. 10 The time history curve of mid-span displacement in N-groups beams

N 组梁冲击破坏模式如图 11 所示。

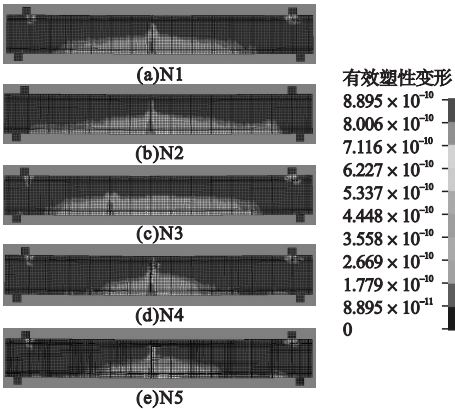


图 11 N 组梁冲击破坏模式

Fig. 11 Impact failure modes of beams in N-groups

由图 11 可知,在 PVA-ECC-钢筋复合梁冲击能量相同时,冲击体的质量越大、冲击速度越小,梁跨中受损区域越小,且跨中位置出现贯通的裂缝;冲击体质量越小、冲击速度越大,PVA-ECC-钢筋复合梁的跨中部位出现的耗能区域越大,有更多的 PVA 纤维参与进耗能过程。因此,PVA-ECC-钢筋复合梁能够有效抵抗冲击荷载。

2.4 截面尺寸

笔者研究不同截面尺寸的 PVA-ECC-钢筋复合梁在承受冲击作用时的破坏状态,数值模拟中分别设置了 J 组 3 个 PVA-ECC-钢筋复合梁,其冲击力时程曲线如图 12 所示。截面长×宽分别为 100 mm×250 mm、120 mm×250 mm、150 mm×250 mm,小球冲击速度、配筋参数、PVA-ECC 抗压抗拉强度和梁跨长度均相同。

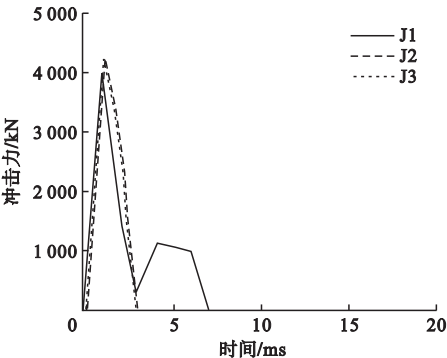


图 12 J 组梁冲击力时程曲线

Fig. 12 The time history curve of impact force in J-groups beams

由图 12 可知,PVA-ECC-钢筋复合梁的截面尺寸在冲击荷载的初期对 PVA-ECC-钢筋复合梁的影响不大,各 PVA-ECC-钢筋复合梁所承受的最大冲击力虽然稍有不同,但在受冲击后的前 3 ms 内各 PVA-ECC-钢筋复合梁的冲击力时程曲线基本一致,考虑各 PVA-ECC-钢筋复合梁冲击作用之初主要受冲击体小球和 PVA-ECC-钢筋复合梁之间的接触刚度作用,各 PVA-ECC-钢筋复合梁仅在后续的受冲击过程中有较大的曲线走势改变。

J 组梁跨中位移时程曲线如图 13 所示。

由图 13 可知,截面尺寸对 PVA-ECC-钢筋复合梁冲击作用后的跨中位移变化略有影响,跨中位移值随着截面形状短边长度的增加而减少,且短边长度越长,模型梁的振动频率越快,PVA-ECC-钢筋复合梁越能快速恢复平稳状态。

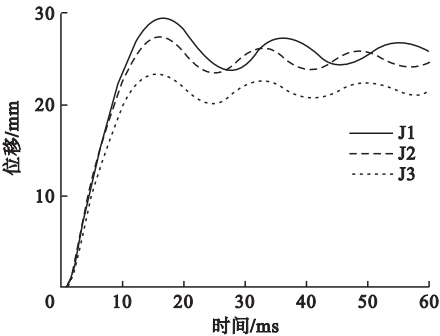


图 13 J 组梁跨中位移时程曲线

Fig. 13 The time history curve of mid span displacement in J-groups beams

3 PVA-ECC-钢筋复合梁抗多次冲击影响因素分析

3.1 纵向配筋

由 PVA-ECC-钢筋复合梁抗单次冲击影响因素的研究结果可知,箍筋配筋率对 PVA-ECC-钢筋复合梁的抗冲击性能影响不大,而纵筋对其影响较为明显。因此,笔者主要研究配筋参数中纵筋对 PVA-ECC-钢筋复合梁多次冲击荷载作用的影响。梁截面尺寸、PVA-ECC 抗压强度、抗拉强度、梁跨长度和冲击体质量均相同,具体纵筋配筋参数见表 1。C-S 组梁跨中位移时程曲线如图 14 所示。

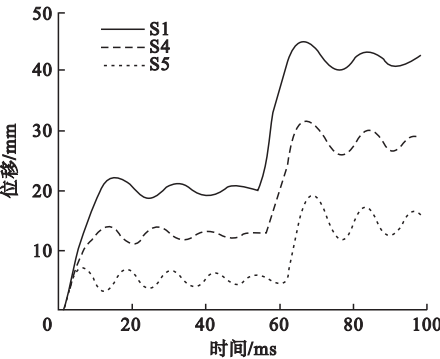


图 14 C-S 组梁跨中位移时程曲线

Fig. 14 The time history curve of mid span displacement in C-S groups beams

由图 14 可知,随着 PVA-ECC-钢筋复合梁内部纵筋直径的增大,梁的跨中最大位移不断减小;在第二次冲击荷载作用后,工况 C-S1、C-S4 和 C-S5 的跨中位移时程曲线差别较大,但曲线走势几乎相同,且工况 C-S1、C-S4 和 C-S5 在二次冲击后依然能保持振荡,说明依然有良好的抗冲击能力;PVA-ECC-钢筋复合梁内部纵筋直径越大,梁的自振频率越快;对比第二次与第一次冲击作用后梁的位移时程曲线,发现二次冲击作用时造成的相对位移较第一次冲击作用时的更大且第二次冲击后梁的自振振幅比第一次冲击作用时的大。

3.2 梁跨度

笔者研究 PVA-ECC-钢筋复合梁多次冲击作用下的影响因素,其中,截面尺寸、配筋参数、PVA-ECC 抗压强度、抗拉强度和冲击体质量均相同,复合梁跨度不同(见表 1)。C-L 组梁跨中位移时程曲线如图 15 所示。

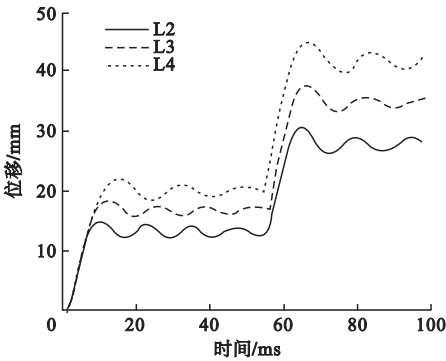


图 15 C-L 组梁跨中位移时程曲线
Fig. 15 The time history curve of midspan displacement in C-L groups beams

由图 15 可知,在 PVA-ECC 钢筋复合梁受到第二次冲击作用后,工况 C-L2、C-L3 和 C-L4 的位移时程曲线虽曲线趋势大致相同,但位移却有不同。随着梁跨度的增大,梁跨中最大位移越大;对比第二次与第一次冲击作用后梁的位移时程曲线,发现二次冲击作用时造成的相对位移较第一次冲击作用时的更大,但在二次冲击作用后依然能具备良好的抗冲击能力;同时工况 C-S 组具有第二次

冲击后梁的自振振幅较第一次更大的特点。

3.3 冲击体质量

笔者针对冲击体质量分别为 30 kg、50 kg 和 100 kg 时,PVA-ECC-钢筋复合梁多次冲击作用下的模拟分析,截面尺寸、配筋参数、PVA-ECC 抗压强度、抗拉强度和梁跨长度均相同,具体参数见表 1。C-N 组各梁跨中位移时程曲线如图 16 所示。

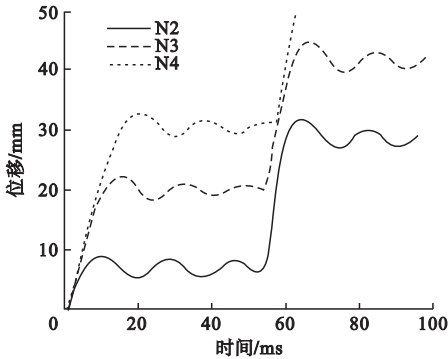


图 16 C-N 组各梁跨中位移时程曲线
Fig. 16 The time history curve of midspan displacement in C-N groups beams

由图 16 可知,PVA-ECC-钢筋复合梁的工况 N4 在第二次冲击作用后失效发生断裂破坏,PVA-ECC-钢筋复合梁的工况 N2 和工况 N3 在第二次冲击作用后依然能够有良好的抗冲击能力,梁的跨中最大位移随着冲击体质量的增加而变大,与 C-S 组和 C-L 组同样具有第二次冲击后梁的自振振幅较第一次更大且相对位移也更大的特点。

4 结 论

(1)PVA-ECC-钢筋复合梁冲击作用下,配筋因素导致的影响在最开始时不明显,在后续的冲击过程中影响明显,且梁中纵筋配筋率越高,梁跨中部位移就越小,说明纵筋配筋参数变化对 PVA-ECC-钢筋复合梁受冲击后的挠度变化有很大影响,梁中箍筋配筋率对 PVA-ECC-钢筋复合梁受冲击作用时的影响很小。

(2)梁跨长度的不同对 PVA-ECC 钢筋复合梁受冲击作用后的起初仅有较小的影响,当

梁跨度为1.9 m时,受冲击作用后的中后期有显著的振荡作用效果,且梁跨中部位移最大。

(3)在冲击能量相同情况下,冲击体速度越大,PVA-ECC-钢筋复合梁的局部受破坏越明显,梁跨中部位出现的耗能区域越大,就有更多的PVA纤维参与耗能过程。

(4)随着冲击次数的增加,PVA-ECC-钢筋复合梁跨中应力不断增大;随冲击次数增加而逐渐扩散至整个跨中部位,由于PVA纤维的耗能能力和桥接作用,PVA-ECC-钢筋复合梁在受冲击后可通过发展多条细密小裂缝来耗散能量,可抵抗多次冲击,从而提升结构构件的安全性。

参考文献

- [1] LI V C, LEIMIG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of engineering mechanics,1992,118(11):2246-2264.
- [2] 杨珊,李祚,彭林欣,等.高温后PVA纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2021(4):49-54.
(YANG Shan,LI Zuo,PENG Linxin,et al. Study on mechanical properties of PVA-ECC composites after elevated temperature [J]. China concrete and cement products,2021(4):49-54.)
- [3] 朱涵,蒋金龙,姜雯丽霞,等.钢纤维对聚氨酯砂浆力学性能及弯曲韧性的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(1):95-103.
(ZHU Han,JIANG Jinlong,JIANG Wenlixia,et al. Effect of steel fiber on mechanical properties and flexural toughness of polyurethane mortar [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2021,37(1):95-103.)
- [4] 唐文涵,何浙浙.PVA-ECC拉压强度尺寸效应试验研究[J].建筑结构,2020,50(增刊2):534-538.
(TANG Wenhan,HE Xixi. Experimental study on size effect of tensile and compressive strength of PVA-ECC [J]. Building structure,2020,50(S2):534-538.)
- [5] MUSTAFA S,ERDOGAN O,HASAN E Y,et al. Frost resistance and microstructure of engineered cementitious composites;influence of fly ash and micro polyvinyl alcohol fiber [J].Cement concrete composites,2012,34:156-165.
- [6] 李亮,吴文杰,吴俊,等.水泥基复合材料的研究现状及其在动态冲击领域的应用[J].建筑结构,2018(增刊1):545-554.
(LI Liang,WU Wenjie,WU Jun,et al. Status of engineered cementitious composites and its application under dynamic impact loading [J].

- Building structure,2018(S1):545-554.)
- [7] DAN M,ZHANG Y X,LEE C K. Flexural fatigue behavior of steel reinforced beams [J]. Construction and building materials,2019,211:384-398.
- [8] LEPECH M D,LI V C. Application of ECC for bridge deck link slabs [J]. Materials and structures,2009,42(9):1185.
- [9] YUAN F,PAN J L,WU Y F. Numerical study on flexural behaviors of steel reinforced engineered cementitious composite(ECC) and ECC/concrete composite beams [J]. Technological sciences,2014,57(3):637-645.
- [10] WANG Qisheng, YI Yong, MA Guowei, et al. Hybrid effects of steel fibers,basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high volume fly ash [J]. Cement and concrete composites,2019,97:357-368.
- [11] LEE W K,JANSEN D C,BERLIN K B,et al. Flexural cracks in fiber-reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer reinforcing bars [J]. ACI structural journal,2010,107(3):321-329.
- [12] WANG H,BELARBI A. Ductility characteristics of fiber reinforced concrete beams reinforced with FRP rebars [J]. Construction and building materials,2011,25(5):2391-2401.
- [13] 马益标. 聚乙烯醇纤维砂浆钢筋网加固梁受弯性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
(MA Yibiao. Research on RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite steel mesh [D]. Changsha: Hu'nan University,2018.)
- [14] 王冲.PVA-ECC 钢丝混凝土梁复合抗弯增强试验研究[J]. 南京:东南大学,2019.
(WANG Chong. Experimental study on the flexural behavior of concrete beams strengthened with PVA-ECC and steel wire meshes [D]. Nanjing:Southeast University,2019.)
- [15] 赵培智. 钢筋增强工程水泥基复合材料 PVA-ECC 剪切性能试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
(ZHAO Peizhi. Experimental research on shear performance of reinforced PVA-ECC [D]. Chongqing:Chongqing University,2019.)
- [16] 齐宝欣,李荣,刘东,等.基于压电主动传感技术的高温后PVA-ECC梁冲击损伤监测研究[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(5):233-240.
(QI Baoxin,LI Mo,LIU Dong,et al. Research on impact damage monitoring of PVA-ECC beam after high temperature based on piezoelectric active sensing technology [J]. Journal of architecture and civil engineering,2018,35(5):233-240.)
- [17] QI Baoxin,KONG Qingzhao,QIAN Hui,et al. Study of impact damage in PVA-ECC beam under low-velocity impact loading using piezoceramic transducers and PVDF thin-film transducers [J]. Sensors,2018(18):671.
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)