

冲击作用下 PVA-ECC-钢筋复合梁的损伤破坏数值模拟分析

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. 大连理工大学建设工程学部, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要 目的 数值模拟单次冲击和多次冲击作用下的 PVA-ECC-钢筋复合梁损伤破坏程度, 对比分析素混凝土梁、普通钢筋混凝土梁和 PVA-ECC-钢筋复合梁单次和多次冲击作用的动态响应。方法 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件分别创建素混凝土梁、普通钢筋混凝土梁和 PVA-ECC-钢筋复合梁的有限元实体模型, 在进行落锤单次和多次冲击动态响应分析时, 考虑不同落锤的冲击高度和冲击速度, 跨中最大位移和冲击高度之间关系, 冲击耗能、跨中最大位移-冲击次数。结果 通过建立相对位移, 判定梁的破坏, 可知 PVA-ECC-钢筋复合梁断裂破坏相比素混凝土梁和普通钢筋混凝土梁在弹性阶段有更小的跨中位移和恢复变形的速度; 引入相对耗能值, 判定梁的抗冲击耗能性能, PVA-ECC-钢筋复合梁比普通钢筋混凝土结构更具有耗能能力和抗冲击能力。结论 通过建立最大位移损伤评估指标, 形成了损伤评估等级划分, 分别是轻微损伤、中等损伤、严重损伤和破坏失效

关键词 PVA-ECC; 多次冲击; 有限元模拟; 跨中位移; 损伤破坏

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Numerical Simulation Analysis of Damage and Failure of PVA-ECC-reinforced Composite Beams under Impact Loading

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)

Abstract: In this paper, the damage degree of PVA-ECC-reinforced composite beams under single and multiple impact is studied by numerical simulation method, and the dynamic response of

收稿日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678373); 辽宁省自然科学基金项目(20181023); 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1817)

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

concrete beams, ordinary reinforced concrete beams and PVA-ECC-reinforced composite beams under single and multiple impact is compared and analyzed. Using ANSYS/LS-DYNA finite element software, three-dimensional solid models of concrete beam, ordinary reinforced concrete beam and PVA-ECC-reinforced composite beam are created respectively. Considering the impact height and impact velocity of different drop hammers, the relationship between the maximum displacement and impact height in the span, the impact energy consumption and the maximum displacement impact times in the span, the dynamic response analysis of single and multiple impact of drop hammer is carried out. The results show that the fracture failure of PVA-ECC-reinforced composite beam has smaller midspan displacement and recovery rate of deformation than that of concrete beam and ordinary reinforced concrete beam in the elastic stage, PVA-ECC-reinforced composite beams have more energy dissipation capacity and impact resistance than ordinary reinforced concrete structures. The maximum displacement damage assessment index is established to form the classification of damage assessment grades, which are slight damage, medium damage, serious damage and failure.

Key words: PVA-ECC; multiple impacts; finite element simulation; middle span displacement; damage failure.

工业与民用建筑领域的工程结构在服役期间有可能遭受到不同程度的冲击荷载作用,例如:车桥碰撞事故、船桥碰撞事故等。随着科学技术和生活水平的不断提升,人们对结构的安全要求和材料性能要求越来越高。在20世纪90年代由美国密歇根大学的 V. C. Li 等^[1-5]根据微观力学和断裂力学基本原理提出的一种新型材料,即纤维增强水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)。人们在混凝土中通过添加纤维使得混凝土材料自身水泥基材料的收缩性、抗拉强度、韧性得以增强改善,自此纤维混凝土得到迅猛发展^[6-9]。加入的纤维材料既不会影响到混凝土材料本身的优越特性,更能够使纤维发挥其自身材料的特性,改善混凝土材料的脆性大、抗弯强度低、延伸率小等缺陷,延长混凝土结构的使用寿命,扩大其应用领域^[10-13]。

M. G. PARRA^[14]通过对外部 RCS 节点构件进行与拟静力相关的试验研究,研究表明,无横筋的 ECC 节点荷载-位移曲线很饱满;G. Fischer^[15-16]通过对配筋的 ECC 柱进行低周反复荷载作用下的抗震性能相关试验研究,结果说明,较 RC 柱相比,配筋 ECC 柱

的滞回曲线更饱满,且耗能能力更显著;Y. Mohammadi^[17]对钢纤维混凝土梁参照落锤冲击法进行冲击荷载作用试验研究,掺入钢纤维后,混凝土的抗冲击能力显著。

冲击作用发生时产生的冲击力可能会对混凝土结构的梁构件造成严重破坏,且多次冲击作用会对混凝土结构的梁构件造成疲劳性累积破坏^[18],然而对 PVA-ECC-钢筋复合梁的抗冲击性能,尤其是抗多次冲击的研究成果相对较少。基于此,笔者对比素混凝土梁、普通钢筋混凝土梁和 PVA-ECC-钢筋复合梁分别进行单次冲击荷载作用和多次冲击荷载作用下的有限元数值模拟计算结果,获得梁结构受冲击后的动态响应、破坏时临界冲击能量限值,并建立损伤破坏评估指标。研究表明:PVA-ECC-钢筋复合梁的抗冲击性能最优,在实际抗冲击需求的工程中可以采用。

1 材料本构模型

1.1 混凝土材料本构模型

笔者采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件创建三组梁有限元计算模型,分别是素混凝土梁、钢筋混凝土梁和配筋的 PVA-ECC 梁。混凝土采用塑性损伤模型,关键字为

* MAT_CONCRETE_REL3 (MAT72),同时考虑材料应变率效应,混凝土的屈服强度为 2.64 MPa,密度为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$,弹性模量为 $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比为 0.22.

1.2 钢筋材料本构模型

钢筋采用随动强化双线性弹塑性模型,关键字为 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT3),钢筋的屈服强度为 300 MPa,密度为 $7.85 \times 10^{-2} \text{ g/mm}^3$,弹性模量为 $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为 0.3. 通过 Cowper-Symonds 模型考虑钢筋的应变率效应,即应变率效应参数 P 为 4.0, C 为 5.0,失效参数为 0.2.

1.3 PVA-ECC 纤维混凝土本构模型

PVA-ECC 纤维混凝土的纤维体积掺量为 2%,关键字为 * MAT_CONCRETE_REL3 (MAT72),同时考虑材料应变率效应. PVA-ECC 纤维混凝土的抗拉强度为 3.45 MPa,抗压强度 36.2 MPa,拉伸初裂强度为 4.0 MPa,弹性模量为 $2.0 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比为 0.2.

1.4 小球和约束刚体材料本构模型

小球和约束刚体采用理想型刚体材料 (* MAT_RIGID),忽略其冲击过程中产生的变形,小球和约束刚体的本构参数如表 1 所示.

表 1 刚体本构参数

Table 1 Rigid body constitutive parameters		
密度/ $10^{-2} \text{ (g} \cdot \text{mm}^{-3})$	弹性模量/ 10^5 MPa	泊松比
7.85	2.0	0.3

2 建立数值模拟模型

2.1 落锤冲击分析模型

笔者共创建三组模型,各组模型中只有梁的材质不同,小球和约束刚体的材质完全一致. 模型 I 为普通混凝土梁构件,模型 II 为配筋的普通混凝土梁构件,模型 III 为配筋的 PVA-ECC 梁构件,三组梁构件分别在约束刚体的约束下受到来自小球的竖向冲击荷载,且设置重启动命令,对比分析三组模型在多次冲击荷载作用下的力学性能. 模型 I 的建模示意图如图 1(a)所示,模型 II 和模型 III 的建模示意图如图 1(b)所示. 建模采用 g-mm-ms 单位制.

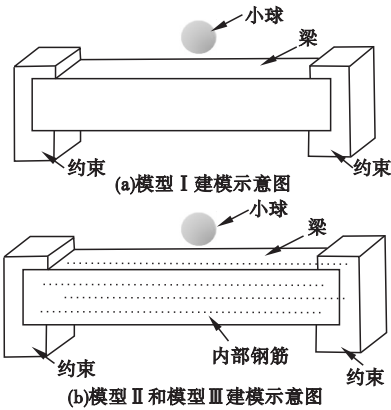


图 1 有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of finite element model

2.2 数值模拟模型

采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 中自带的实体建模方法,创建小球、混凝土梁、内部钢筋和约束刚体共四部分实体模型,模型尺寸如图 2 所示.

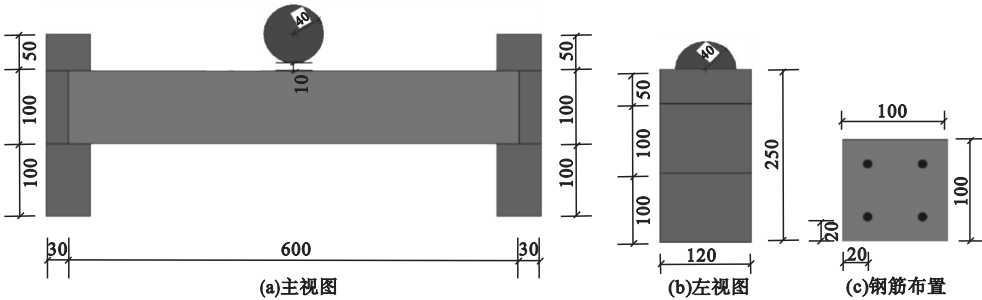


图 2 PVA-ECC-钢筋复合梁有限元模型

Fig. 2 The finite element model of PVA-ECC-reinforced composite beam

小球、混凝土梁和约束刚体均采用 3D SOLID 164 单元,内部钢筋采用 3D LINK 160 单元进行创建.梁模型的横截面长×宽为 100 mm×100 mm,梁长度为 600 mm,对称配筋且纵向钢筋为 HPB300 级,配筋率为 2%,小球模型的半径为 40 mm.

2.3 数值模拟验证

为了验证笔者数值模拟方法的准确性,笔者将采用有限元建模方法对比分析 Qi 等落锤冲击试验中的水泥砂浆梁工况 1(见图 3).

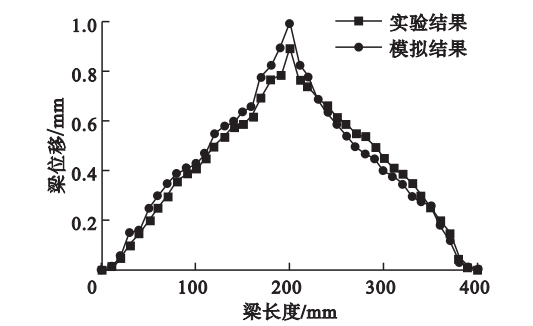


图 3 落锤冲击下素混凝土梁试验与数值模拟的位移曲线对比

Fig. 3 Displacement comparison between experimental test and numerical simulation of the mortar beam under impact loading

对比两者跨中断裂破坏模式,发现数值模拟结果与试验结果虽然存在一定误差,但吻合较好,这证明了笔者有限元建模方法的可行性,为下文模拟落锤冲击普通混凝土梁、配筋的普通混凝土梁和配筋的 PVA-ECC 梁的损伤研究奠定了基础.

3 单次冲击荷载作用下的梁动态响应

3.1 单次冲击作用下梁跨中挠度

笔者分别对模型 I、模型 II 和模型 III 进行跨中位置的单次冲击荷载作用,各工况如表 2 所示.通过对素混凝土梁、普通钢筋混凝土梁和 PVA-ECC-钢筋复合梁在单次冲击荷载作用下的动力响应对比分析,进而总结出 PVA-ECC-钢筋复合梁的破坏阶段包括:弹性阶段、塑性阶段、塑性破坏阶段和断裂阶段.

图 4 是模型 I、模型 II 和模型 III 在不同冲击高度时单次冲击荷载作用下的跨中位移时程曲线.从图中的总体趋势可以看出:随着冲击高度 H 的增加,相对位移不断增大;由

表 2 单次冲击作用下各工况参数表

Table 2 Parameter table of each working condition under single impact						
编号	计算模型	有效长度/ mm	冲击位置	冲击高度/ m	冲击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	梁类型
1	I	600	跨中	3	7.67	素混凝土梁
2	II	600	跨中	3	7.67	普通钢筋混凝土梁
3	III	600	跨中	3	7.67	PVA-ECC-钢筋复合梁
4	I	600	跨中	4	8.85	素混凝土梁
5	II	600	跨中	4	8.85	普通钢筋混凝土梁
6	III	600	跨中	4	8.85	PVA-ECC-钢筋复合梁
7	I	600	跨中	5	9.90	素混凝土梁
8	II	600	跨中	5	9.90	普通钢筋混凝土梁
9	III	600	跨中	5	9.90	PVA-ECC-钢筋复合梁
10	I	600	跨中	6	10.84	素混凝土梁
11	II	600	跨中	6	10.84	普通钢筋混凝土梁
12	III	600	跨中	6	10.84	PVA-ECC-钢筋复合梁
13	III	600	跨中	7	11.71	PVA-ECC-钢筋复合梁
14	III	600	跨中	8	12.52	PVA-ECC-钢筋复合梁
15	III	600	跨中	9	13.28	PVA-ECC-钢筋复合梁
16	III	600	跨中	10	14.00	PVA-ECC-钢筋复合梁

图 4(a)、图 4(b)中可以看出:模型 I、II 在冲击高度 H 为 3 m、4 m 时受冲击后尚能保持稳定回弹,模型 I、II 在冲击高度 H 为 6 m 时受冲击后发生塑性变形,此时变形不可恢复;由图 4(c)中可以看出:模型 III 在冲击高

度 H 为 6 m、7 m、8 m、9 m 时受冲击后依然能保持稳定回弹的状态,模型 III 在冲击高度为 10 m、11 m 时受冲击后发生塑性变形,此时变形不可恢复。

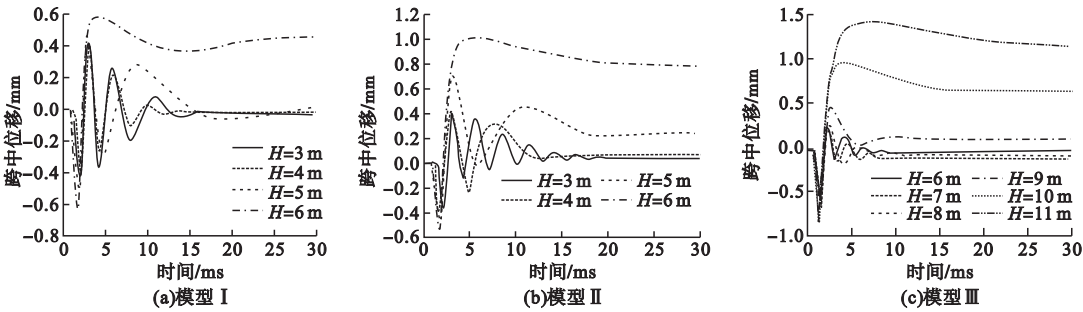


图 4 跨中位移时程曲线

Fig. 4 Time history curve of mid-span displacement

3.2 跨中最大位移和冲击高度的关系

图 5 所示是模型 I、模型 II 和模型 III 在单次冲击荷载作用下的跨中最大位移 - 冲击高度关系曲线。

钢筋复合结构较普通钢筋混凝土结构的抗冲击能力更强。

由于模型 I、II 在冲击高度 H 为 6 m 时发生断裂破坏,而模型 III 在冲击高度 H 为 10 m 时发生断裂破坏,故模型 III 的跨中最大位移曲线取点较模型 I、II 多。通过分析由于模型 II、III 相较于模型 I,模型 II、III 内部配置的纵向钢筋提高了构件的抗弯能力,能较好地控制构件变形,且模型 III 中的 PVA 纤维通过自身的桥接作用控制构件的变形,增强了构件的抗冲击性能。

为研究梁跨中部位最大位移与有效梁长度的关系,引入相对位移 δ 。

$$\delta = \frac{Y_{\max}}{L}.$$

(1)

式中: Y_{\max} 为梁跨中部位竖向最大位移; L 为有效梁长度。

在不同冲击高度单次冲击作用下模型 I、II、III 各梁的 δ 值如表 3 所示。 δ 越大,梁跨中部位 Y 向位移占整个梁有效长度的比例越大。笔者认为 $\delta > 0.22\%$ 时,素混凝土梁发生破坏; $\delta > 0.23\%$ 时,普通钢筋混凝土梁发生破坏; $\delta > 0.29\%$ 时,PVA-ECC-钢筋复合梁发生破坏。数值模拟得到的单次冲击作用下跨中位移-冲击高度曲线进一步证明 PVA-

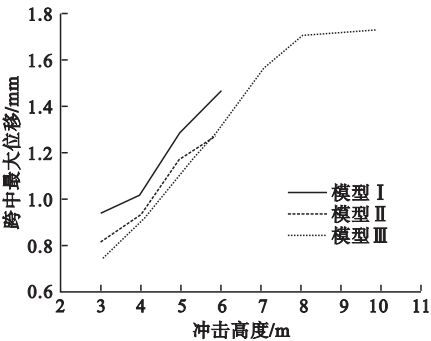


图 5 跨中最大位移 - 冲击高度关系曲线

Fig. 5 Maximum displacement impact height curve in midspan

由图 5 可以看出:随着冲击高度的增加,模拟计算得出的模型 I、II、III 的跨中最大位移不断增大,且增长趋势几乎相同。冲击高度相同时,模型 I 的跨中最大位移最大,模型 III 的跨中最大位移最小,模型 II 的跨中最大位移介于二者之间,普通钢筋混凝土梁的跨中最大位移值较素混凝土梁可缩小 9%,PVA-ECC-钢筋复合梁的跨中最大位移值较素混凝土梁可缩小 13%,较普通钢筋混凝土梁可缩小 5%,说明在相同冲击高度时 PVA-ECC-

表3 模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ各梁δ值

Table 3 The δ values for model I,II and III			
编号	冲击高度/m	模型	δ/%
1	3	Ⅰ	0.16
2	4	Ⅰ	0.17
3	5	Ⅰ	0.22
4	6	Ⅰ	0.25
5	3	Ⅱ	0.14
6	4	Ⅱ	0.15
7	5	Ⅱ	0.20
8	6	Ⅱ	0.23
9	3	Ⅲ	0.13
10	4	Ⅲ	0.15
11	5	Ⅲ	0.19
12	6	Ⅲ	0.22
14	7	Ⅲ	0.26
15	8	Ⅲ	0.28
16	9	Ⅲ	0.29
17	10	Ⅲ	0.29

ECC-钢筋复合结构具有良好的抗冲击能力和控制构件变形能力。

3.3 冲击耗能分析

图6为模型Ⅰ、模型Ⅱ和模型Ⅲ在冲击过程中内能耗散时程曲线图。从图6中可以看出:冲击高度相同时,模型Ⅲ趋于内部能量平稳时的内部能量值最小。为了研究内部耗能情况,引入相对耗能值 Q 。

$$Q = Q_m - Q_p. \tag{2}$$

式中: Q_m 为内部能量最大值; Q_p 为内部能量平稳值。当冲击高度为4 m时,模型Ⅲ相对耗能值 Q 是模型Ⅱ的8.2倍。由此可见,PVA-ECC-钢筋复合结构较普通钢筋混凝土结构有更好的耗能能力和抗冲击能力。

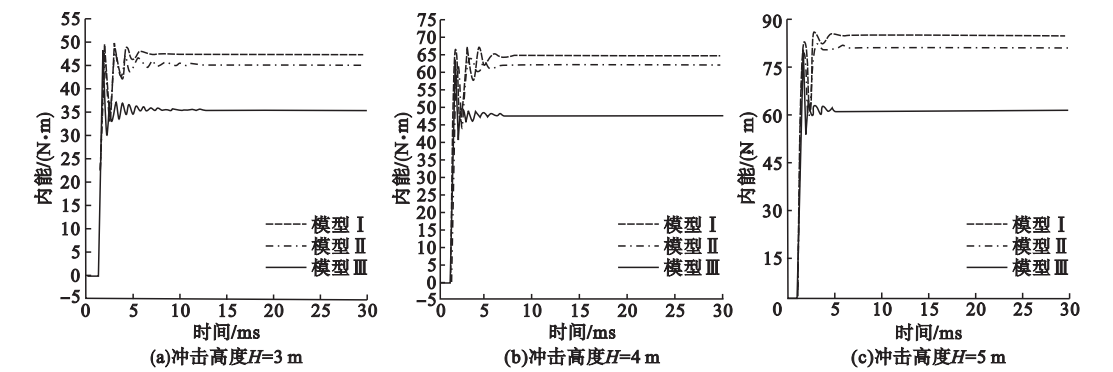


图6 模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ在冲击过程中内能耗散时程曲线图

Fig. 6 Time history diagram of internal energy dissipation of models I,II and III during impact

4 多次冲击荷载作用下梁动态响应

4.1 跨中最大位移-冲击次数关系曲线分析

笔者分别对模型Ⅰ、模型Ⅱ和模型Ⅲ进行跨中位置的多次冲击荷载作用,冲击高度 H 分别取3 m、4 m、5 m,与冲击高度相对应的冲击速度分别为7.67 m/s、8.85 m/s、9.90 m/s。各工况如表2中编号1~9所示。笔者通过对素混凝土梁、普通钢筋混凝土梁和PVA-ECC-钢筋复合梁在多次冲击荷载作用下的动力响应进行详细分析对比。

通过对k文件的修改,增加*CHAN

GE_CURVE_DEFINITION关键字,并结合LS-DYNA关键字手册对模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ进行小型重启计算分析,分别提取3 m、4 m、5 m时的跨中最大位移-冲击次数关系曲线进行分析。图7为不同冲击高度时跨中最大位移-冲击次数关系曲线。

由图7可以看出:在冲击高度 H 为3 m时,模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ均能承受3次冲击次数,随着冲击次数的增加,模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的跨中最大位移不断增大,且在第3次冲击时,模型Ⅰ跨中最大位移的增大趋势大于第2次冲击时跨中最大位移,模型Ⅱ、Ⅲ在第3次冲击时的跨中最大位移增大趋势远小于模型Ⅱ,模型

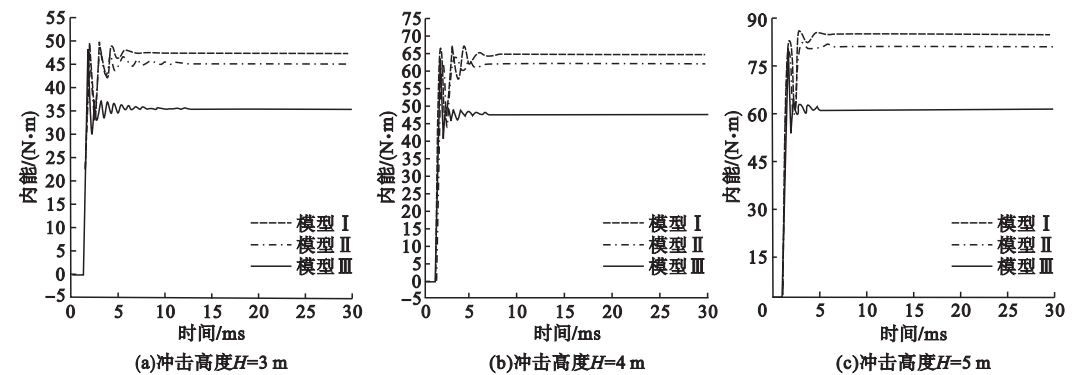


图7 跨中最大位移-冲击次数关系曲线

Fig.7 Relation curve of maximum displacement impact times in midspan

Ⅲ的跨中位移始终没有模型Ⅰ、Ⅱ的大;在冲击高度 H 为 4 m 时,模型Ⅰ在受到第 2 次冲击后发生断裂,不再考虑第 3 次冲击,模型Ⅲ在受到第 2 次冲击后的跨中最大位移增大趋势小于模型Ⅱ,模型Ⅱ在受到第 3 次冲击后发生断裂;在冲击高度为 5 m 时,模型Ⅱ在受到第 2 次冲击后彻底断裂,不再考虑第 3 次冲击,模型Ⅲ在受到第 2 次冲击时的跨中最大位移依然小于模型Ⅱ,模型Ⅲ在承受第 3 次冲击后发生断裂. 根据式(1)可得出模型

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ各梁在不同冲击高度多次冲击作用下的 δ 值,如表 5 所示. 由此可见,PVA-ECC-钢筋复合结构较普通混凝土结构和普通钢筋混凝土结构有良好的抗疲劳冲击能力,PVA 纤维在混凝土结构中的耗能作用也增加了混凝土结构在受到冲击后的耗能作用,这样的抗疲劳抗冲击的复合结构在实际工程中能大大提高建筑的使用寿命,增加结构的安全性.

表5 在不同冲击高度多次冲击作用下模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ各梁 δ 值

Table 5 The δ values for model I,II and III under multiple impacts of different impact heights

编号	冲击高度/m	冲击次数	梁类型	δ /%	编号	冲击高度/m	冲击次数	梁类型	δ /%
1	3	1	I	0.16	13	5	2	II	0.28
2	4	1	I	0.17	14	3	2	III	0.17
3	3	1	II	0.14	15	4	2	III	0.20
4	4	1	II	0.15	16	5	2	III	0.25
5	5	1	II	0.20	17	3	3	I	0.28
6	3	1	III	0.13	18	4	3	I	—
7	4	1	III	0.15	19	3	3	II	0.24
8	5	1	III	0.19	20	4	3	II	0.27
9	3	2	I	0.20	21	5	3	II	—
10	4	2	I	0.24	22	3	3	III	0.22
11	3	2	II	0.18	23	4	3	III	0.27
12	4	2	II	0.22	24	5	3	III	0.34

4.2 损伤评估指标

通过有限元数值模拟的分析结果可以发现梁的多个破坏形态,梁跨中部位的最大位移能够直接反映其损伤程度,且在实际工程的应用中,对跨中部位的最大位移值的获取也较为容易,便于损伤评估方法的推广和应用。

笔者采用最大位移的损伤评估指标:

$$D = 1 - \frac{\delta_{\max}}{\Delta_{\max}} \tag{3}$$

式中: δ_{\max} 为当前状态所经历的跨中最大残余位移; Δ_{\max} 为模拟梁所能承受的极限状态所对应的残余位移。

由式(3)可知,PVA-ECC-钢筋复合梁的损伤评估指标 D 在 $0 \sim 1$ 变化,跨中最大残余位移越小,损伤度 D 越大,构件的损伤程度也就越严重;相反的,跨中最大残余位移越大,损伤度 D 越小,构件的损伤程度也就越轻.因此, D 的大小代表着损伤程度的高低,可用基于最大位移的损伤评估指标 D 对 PVA-ECC-钢筋复合梁进行损伤评估。

损伤评估的等级划分根据构件类型、荷载类型、荷载作用方式的不同而不同,笔者在目前现有的研究成果基础上通过对有限元模拟分析所得的 8 组构件的损伤形态和损伤指标 D 行统计分析,如表 6 所示.以此建立适用于跨中部位冲击荷载作用下 PVA-ECC-钢筋复合梁的损伤评估等级。

表 6 构件损伤情况与损伤指标 D 统计分析汇总表
Table 6 Statistical analysis results of component damage and damage index

构件编号	损伤形态	损伤等级	冲击高度/m	冲击速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	损伤度 D
3	轻度变形	轻微	3	7.67	0.370
6	轻度变形	轻微	4	8.85	0.443
9	中度变形	中等	5	9.90	0.550
12	中度变形	中等	6	10.84	0.650
13	中度变形	中等	7	11.71	0.768
14	大变形	严重	8	12.52	0.840
15	冲击位置开裂	严重	9	13.28	0.848
16	冲击位置开裂	破坏	10	14.00	0.855
17	冲击位置开裂	破坏	11	14.70	0.948

根据表 6 的统计分析情况,得出冲击荷载作用下 PVA-ECC-钢筋复合梁的损伤评估等级,即当损伤指标 $D \in [0, 0.45]$ 时,损伤程度为轻微损伤;当损伤指标 $D \in (0.45, 0.77]$ 时,损伤程度为中等损伤;当损伤指标 $D \in (0.77, 0.85]$ 时,损伤程度为严重损伤;当损伤指标 $D \in (0.85, 1]$ 时,损伤程度为破坏失效。

5 结 论

(1)跨中位移时程曲线基本上呈现梁的弹性阶段、塑性阶段、塑性破坏阶段和断裂阶段;随着冲击高度的增加,相对位移不断增大,且 PVA-ECC-钢筋复合梁相比素混凝土梁和普通钢筋混凝土梁在弹性阶段有更小的跨中位移和恢复变形的速度,说明 PVA-ECC-钢筋复合结构具有更好的抗冲击能力,有利于提升构件使用寿命,在实际工程中可节约工程成本。

(2)随冲击次数的增加,跨中最大位移不断增加,PVA-ECC-钢筋复合梁较普通混凝土梁和普通钢筋混凝土梁的跨中最大位移增大趋势小,且同样冲击高度时 PVA-ECC-钢筋复合结构承受的冲击次数更多,说明 PVA-ECC-钢筋复合结构具有良好的抗疲劳冲击能力。

(3)建立了最大位移损伤评估指标 D ,同冲击高度和冲击速度下的 PVA-ECC-钢筋复合梁的有限元模拟工况,形成了损伤评估等级的划分,分别是轻微损伤、中等损伤、严重损伤和破坏失效。

参考文献

[1] LI V C, LEIMG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of engineering mechanics,1992,118(11):2246-2264.
[2] LI V C,MISHRA D K,NAAMAN A E,et al. On the shear behavior of engineering cementitious composites[J]. Advanced cement based materials,1994(3):142-149.

- [3] FISCHER G, LI V C. Influence of matrix ductility on the tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC) [J]. ACI structural journal, 2002, 99(1): 104 – 111.
- [4] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC)-a review of the material and its applications [J]. Journal of advanced concrete technology, 2003, 1(3): 215 – 230.
- [5] WANG S, LI V C. Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances [J]. Proceedings of international RILEM workshop on HPFRCC in structural applications, 2006 (1): 65 – 73.
- [6] YANG Enhua, WANG Shuxin, YANG Yingzi, et al. Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites [J]. Journal of advanced concrete technology, 2008, 6(1): 181 – 193.
- [7] 王玉清, 刘潇, 高元明, 等. 聚乙烯纤维增强水泥基复合材料梁斜截面受剪承载力试验研究 [J]. 工业建筑, 2018, 48(12): 69 – 76.
(WANG Yuqing, LIU Xiao, GAO Yuanming, et al. Experimental research on oblique section shear capacity of PVA-ECC beams [J]. Industrial construction, 2018, 48(12): 69 – 76.)
- [8] 唐微. PVA-ECC 受压构件计算理论及有限元分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
(TANG Wei. Research on computing theory and finite element analysis of PVA-ECC compression member [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.)
- [9] 李可, 喻鹏, 刘伟康, 等. 工程水泥基复合材料受压性能及应力 – 应变关系研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 172 – 177.
(LI Ke, YU Peng, LIU Weikang, et al. Research on mechanical properties and stress-strain relationship of ECC under compression [J]. Industrial construction, 2020, 50(3): 172 – 177.)
- [10] 侯利军. 超高韧性水泥基复合材料弯曲性能及剪切性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
(HOU Lijun. Experimental investigation on flexural and shear behaviors of ultrahigh toughness cementitious composite [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.)
- [11] 王衍. 高韧性纤维增强水泥基复合材料物理力学性能试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
(WANG Yan. Experimental research on physical and mechanical properties of high toughness fiber reinforced cementitious composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)
- [12] ZHANG M H, SHIM V P W, LU G, et al. Resistance of high-strength concrete to projectile impact [J]. International journal of impact engineering, 2004, 31(7): 825 – 841.
- [13] YUAN F, PAN J L, DONG L T, et al. Mechanical behaviors of steel reinforced ECC/concrete composite beams under reversed cyclic loading [J]. Journal of materials in engineering, 2014, 26(8): 04014047.
- [14] PARRA M G, WIGHT J K. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections [J]. Journal of structural engineering, 2000, 126(10): 1113 – 1121.
- [15] FISCHER G, LI V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [J]. ACI structures journal, 2002, 99(6): 781 – 790.
- [16] FISCHER G, LI V C. Influence of matrix ductility on the tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC) [J]. ACI structural journal, 2002, 99(1): 104 – 111.
- [17] MOHAMMADI Y, CARKON A R, SINGH S P, et al. Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio [J]. Construction and building materials, 2008, 23(2): 183 – 189.
- [18] 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.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)