

文章编号:1673-9469(2022)04-0018-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.003

爆炸荷载下装配式钢筋混凝土梁动力响应及抗爆性能研究

赵卫坤¹, 沈峰^{1*}, 夏益兵²

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 苏州市建筑科学研究院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 为了研究灌浆套筒连接的装配式钢筋混凝土梁的抗爆性能, 建立了装配式钢筋混凝土梁的数值模型, 采用多物质流固耦合算法, 分析装配式钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的破坏形态和动态响应, 通过参数化分析方法, 研究了混凝土强度和纵筋配筋率以及炸药位置等因素对装配式梁抗爆性能的影响。结果表明: 对于装配式钢筋混凝土梁, 由于拼装位置处存在新旧混凝土的薄弱接触面, 在爆炸荷载下应力波在梁内传递性能减弱, 冲击力不能有效地传递给梁两侧, 导致局部发生较严重的脆性破坏。提高混凝土强度和纵筋配筋率、改变炸药爆炸位置均能改善装配式钢筋混凝土梁的抗爆性能。

关键词: 装配式钢筋混凝土梁; 爆炸荷载; 数值模拟; 动力响应

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

Study on Dynamic Response and Anti-explosion Performance of Prefabricated Reinforced Concrete Beams Under Blast Load

ZHAO Weikun¹, SHEN Feng^{1*}, XIA Yibing²

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China;

2. Suzhou Building Research Institute, Suzhou, Jiangsu 215011, China)

Abstract: In order to study the anti-explosion performance of prefabricated reinforced concrete beams connected by grouting sleeve, a numerical model of prefabricated reinforced concrete beams was established. The failure modes and dynamic responses of prefabricated reinforced concrete beams under blast loads were analyzed by using multi-material fluid-structure coupling algorithm. The effects of concrete strength, longitudinal reinforcement ratio and explosive position on the anti-explosion performance of prefabricated beams were studied. The results show that for the prefabricated reinforced concrete beam, because there is a weak interface between old and new concrete at the assembled position, the transmission performance of stress wave in the beam is weakened under the explosion load, and the impact force cannot be effectively transmitted to both sides of the beam, leading to serious brittle failure in the local area. Increasing concrete strength, longitudinal reinforcement ratio and changing explosive position can improve the anti-explosion performance of prefabricated reinforced concrete beams.

Key words: prefabricated reinforced concrete beam; explosion load; numerical simulation; dynamic response

近年来,随着国家大力推进建筑工业化,以预制装配式建筑为代表的新型建筑得到重视。《中国建筑产业现代化发展纲要》中明确要求到2025年装配式建筑占新建建筑比例须达到50%以上^[1]。在世界各地恐怖爆炸袭击事件和意外爆炸

事故频有发生,爆炸不仅带来巨额经济损失,也会造成大量的人员伤亡,因此对装配式构件进行抗爆研究具有重要的理论意义和工程应用价值。梁作为装配式结构中重要的受力构件之一,其抗爆能力直接影响整个建筑物在爆炸荷载作用下的抗

收稿日期:2022-02-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51709194),江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:赵卫坤(1994-),男,江苏兴化人,硕士研究生,主要从事结构工程的研究。

* 通讯作者:沈峰(1984-),男,河南洛阳人,博士,副教授,主要从事灾变破坏力学的研究。

倒塌能力^[2],因此对其在爆炸荷载作用下动态响应研究具有十分重要的意义。

国内外学者对钢筋混凝土构件在爆炸荷载作用下的动态响应与破坏进行了大量研究。Sun 等^[3]运用有限元软件 LS-DYNA 对钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的动态响应进行了数值模拟,研究发现钢筋混凝土柱在不同爆炸荷载峰值下,会发生三种破坏形式。Hong 等^[4]对近距离爆炸荷载作用下的钢筋混凝土板进行了数值模拟,并对其层裂特性进行分析。方秦等^[5]以有限差分法和 Timoshenko 梁理论为基础,分析了钢筋混凝土梁承受爆炸荷载的破坏形态。王辉明等^[6]通过试验对爆坑深度和震塌厚度等局部破坏模式进行分析,研究了装药量对局部毁伤效应的影响。向强等^[7]模拟了钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的破坏形式,发现在超压峰值较大、爆炸作用时间较短时,其破坏模式逐渐由整体变形破坏转变为梁端冲切破坏。宋春明等^[8]构建了复杂约束条件下抗爆梁在弹性和塑性阶段的理论解析方法。周清^[9]选取两种不同的混凝土材料模型,通过数值计算研究了不同剪跨比对钢筋混凝土梁破坏形态的影响。吴文燕等^[10]综合考虑了 5 种损伤因素对柱损伤破坏的影响,并进行了灰色关联分析。刘健榕^[11]对预应力装配式框架结构的爆炸响应与破坏进行了模拟分析,并提出相应加固措施。

本文在已有研究成果的基础上,建立了采用灌浆套筒连接的装配式钢筋混凝土梁模型,分析装配式钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的动态响应和破坏形态,并考虑了炸药位置、混凝土强度和纵筋配筋率等影响因素,为装配式钢筋混凝土梁的抗爆设计和安全防护提供参考。

1 数值计算方法

爆炸荷载的计算方法主要有两种,一是用经验法或现有公式简化爆炸荷载,二是被爆结构采用 Lagrange 算法、流体采用 ALE 算法。本文采用 ALE 流

固耦合算法,通过定义多物质流固耦合算法关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 描述冲击波在介质中的传播以及与被爆构件的相互作用。流体与结构构件的耦合是通过一定的约束方法实现力学参量的传递,主要包括速度约束、加速度约束和罚函数约束^[12],其中约束的计算步骤如下:

(1) 搜寻含结构节点的流体单元,将结构单元节点参数分配给流体单元:

$$m_n(M, F)_{f,i} = m_0(M, F)_{f,i} + h_i m(M, f)_s \quad (1)$$

(2) 新的流体单元节点的速度:

$$a(v)_{f,i} = F(M)_{f,i} / m_{f,i} \quad (2)$$

(3) 计算约束结构节点的速度:

$$a(v)_s = \sum_i^i h_i a(v)_{f,i} \quad (3)$$

式中: m_n 和 m_0 为分配前后节点质量; M 为动量; F 为节点力; h 为单个流体单元中含有的节点数; f 和 s 分别为流体单元和实体单元符号。

2 数值模型

2.1 材料模型

2.1.1 混凝土材料模型

LS-DYNA 中提供了 HJC 模型、K&C 模型和 DAMAGE 模型等材料模型来模拟混凝土的动态行为。本文选用能够较好地模拟材料的高应变率、大变形、高压效应的 HJC 材料模型,该模型使用的等效强度是应变率、损伤度及压力的函数,损伤度是等效塑性应变、塑性体积应变和压力的函数。HJC 混凝土模型没有定义失效方式,需要通过定义关键字 *MAT_ADD_EROSION 来界定材料的破坏失效,取失效拉应变 0.001 作为混凝土的失效参数^[13],混凝土的材料参数如表 1。材料模型等效屈服方程如下^[12]:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}] [1 + C \ln \varepsilon^*] \quad (4)$$

式中: σ^* 为标准等效应力, $\sigma^* = \sigma / f_c$; P^* 为标准压力, $P^* = P / f_c$; ε^* 为等效应变率; A 、 B 、 C 、 N 为混凝土强度参数; D 为损伤参数。

表 1 混凝土材料参数模拟

Tab. 1 Concrete material parameters

材料密度 RO/(kg · m ⁻³)	剪切模量 G/GPa	内聚力 强度 A	强度增大 系数 B	应变系数 C	压力增大 系数 N	静态抗压强度 f _c /MPa	最大拉伸静水 压力 T/MPa	最小开裂塑性 应变 EFMIN
2 400	14. 86	0. 79	1. 6	0. 007	0. 61	40	4	0. 01
压溃压力 PC/MPa	压实压力 PL/GPa	压溃体积 应变 UC	压变体积 应变 UL	损伤参数 D ₁	损伤参数 D ₂	压力参数 K ₁ /GPa	压力参数 K ₂ /GPa	压力参数 K ₃ /GPa
16	0. 8	0. 001	0. 1	0. 04	1. 0	85	-171	208

表2 钢筋和套筒材料参数

Tab. 2 Rebar and grout sleeve material parameters

材料	材料密度 RO/(kg·m ⁻³)	弹性模量 E/GPa	泊松比 PR	屈服应力 SIGY/GPa	切线模量 ETAN/GPa	应变率参数 C	应变率参数 P	失效应变 FS
钢筋	7 850	210	0.28	0.40	2.0	45	5	0.12
套筒	7 850	206	0.30	0.35	2.1	40	5	0.20

2.1.2 钢筋和套筒材料模型

钢材属于应变率敏感材料,在爆炸荷载作用下其屈服强度等物理力学性能会明显提高。钢筋和套筒采用塑性随动强化模型,其充分考虑了包含应变率效应的各项同性塑性随动强化。钢筋和套筒材料各参数如表2。材料模型的屈服应力表达式为^[12]:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \quad (5)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; C 、 P 为应变率参数; σ_0 为初始屈服应力; β 为硬化参数; E_p 为塑性硬化模量; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为等效塑性应变。

2.1.3 空气和炸药材料模型及状态方程

空气视为无粘性理想气体,密度1.293 kg/m³;炸药类型为TNT,密度1 630 kg/m³,爆速6 930 m/s,爆压27 GPa,其状态方程的压力和能量如下^[12]:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

式中: P 为压力; V 为相对体积; E 为炸药内能; ω 、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 为材料常数。

2.2 有限元分析模型

装配式钢筋混凝土梁的模型如图1所示,梁长为2 500 mm,截面尺寸为150 mm×300 mm,梁的受拉侧采用3根Φ12,受压侧采用2根Φ12,箍筋采用Φ6@150,纵筋和箍筋的牌号都为HRB400,混凝土保护层厚度为25 mm。对比现浇钢筋混凝土梁,装配式梁具有灌浆套筒和后浇带部分,后浇混凝土的预留长度为500 mm,混凝土的强度等级为C40。在模型中,炸药、混凝土和空气均采用SOLID164三维实体单元,套筒和钢筋采用BEAM161梁单元,网格单元大小均为12.5 mm。混凝土和钢筋采用共节点分离式建模。实体构件选用Lagrange算法,空气和炸药选用Euler算法,爆炸荷载的施加采用流固耦合算法。TNT炸药距离梁上表面为0.7 m,起爆方式为中心点起爆,炸药当量为4 kg,比例距离为0.44 m/kg^{1/3}。为了防止边界处

冲击波的反射对模拟结果造成影响,定义空气四周为无反射边界,梁的两端设为简支约束。求解终止时间设为5 ms。

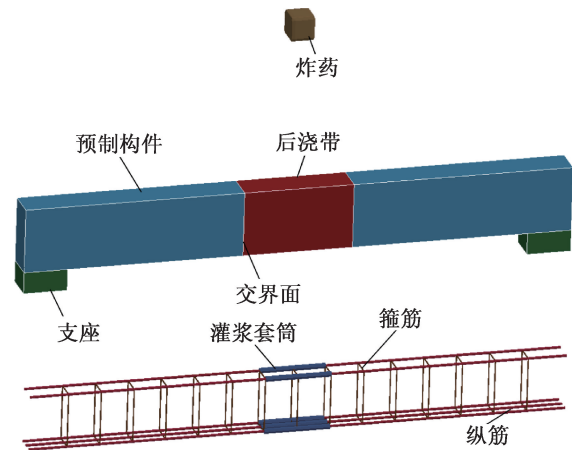


图1 装配式钢筋混凝土梁模型

Fig. 1 FEM for PC beam

本文采用等效钢筋法^[14-15]来模拟灌浆套筒,将灌浆套筒连接部分等效成截面面积更大的钢筋,认为灌浆套筒有较可靠的连接性能且能直接传力,将其等效为直径26 mm,长度为300 mm的钢筋。

预制构件与后浇混凝土的接触面是影响装配式钢筋混凝土梁抗爆性能的薄弱环节。预制构件与后浇混凝土交界面的接触黏结关系,其失效方程表达式为:

$$\left(\frac{|f_n|}{f_{n,\text{fail}}} \right)^n + \left(\frac{|f_s|}{f_{s,\text{fail}}} \right)^s \geq 1 \quad (7)$$

式中, f_n 和 f_s 分别为预制与后浇混凝土接触面的正应力和切向剪应力; n 和 s 分别为接触面对应的应力指数,令 $n=s=2$ 。 $f_{n,\text{fail}}$ 和 $f_{s,\text{fail}}$ 分别为接触面的失效正应力和失效剪应力,结合文献[16-17]试验分别取20 MPa和30 MPa。这种面-面固连失效接触算法是基于失效方程的法向和切向应力,在超过失效条件后允许接触面的节点相对目标面发生滑移和分离。

3 数值算例

3.1 混凝土最大主应力分析

炸药爆炸发生时冲击波以“球形”的方式在空

气中传播,具有速度快、荷载持时短和超压峰值高的特点。图 2 分别为不同典型时刻装配式钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的最大主应力云图变化过程。

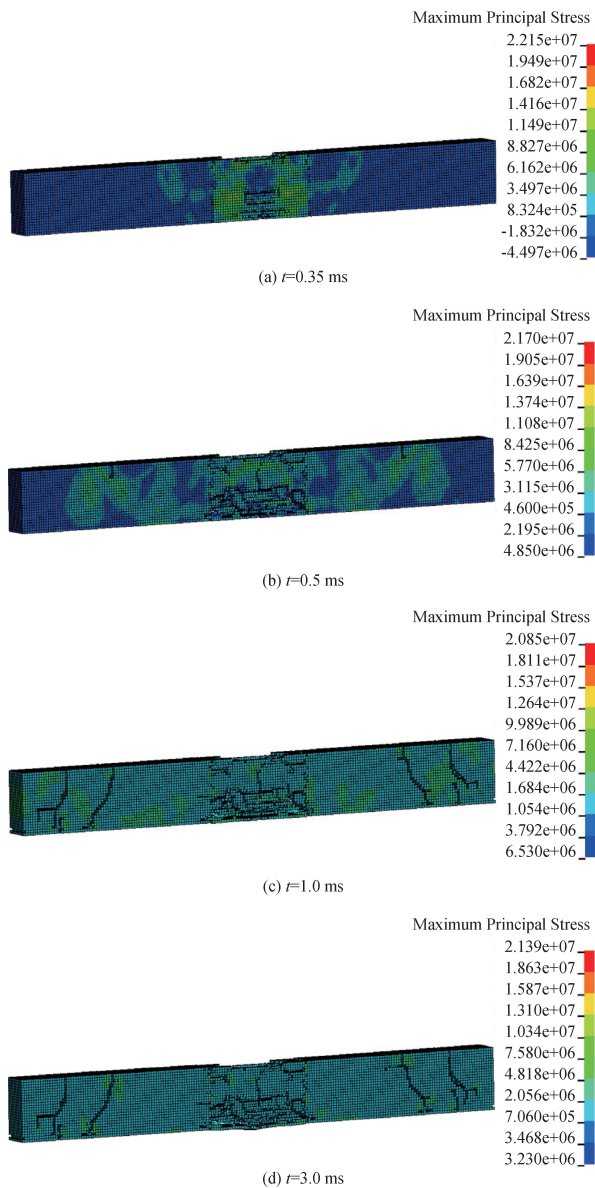


图 2 装配式钢筋混凝土梁最大主应力云图
Fig. 2 Cloud diagram of the maximum principal stress of PC beam

由图 2 可知,梁上表面混凝土主要承受压力作用,底部混凝土主要承受拉力作用。在 $t=0.35$ ms 时,即爆炸冲击作用初期,最大主拉应力主要集中在梁跨中位置,拉应力峰值超过混凝土抗拉强度,底部产生裂缝。随着时间的增长,在 $t=0.5$ ms 时,后浇带混凝土单元因拉应力过大,该区域下部混凝土发生大面积失效剥落并产生较多裂缝。在 $t=1.0$ ms 时,主拉应力区域由跨中向梁两端扩散传播,梁的剪跨区出现从梁顶发展的斜裂缝,梁的抗

剪能力被削弱。梁支座处混凝土单元失效,裂纹出现在梁支座处。在 $t=3.0$ ms 时,由于预制构件与后浇混凝土部分的界面接触断开,装配式梁爆炸能力耗散不均匀,主拉应力区域分布不规则,拼装位置处交界面仍有较大主应力,表现为较严重的局部破坏。

3.2 钢筋轴向应力分析

为研究装配式梁中钢筋单元轴向应力,分别取装配式梁受拉区跨中纵筋单元和梁端钢筋单元,图 3 为装配式梁纵向钢筋的轴向应力时程曲线。

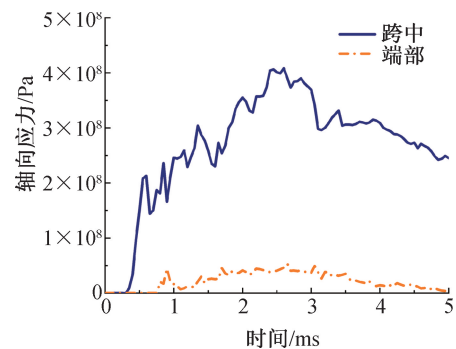


图 3 装配式梁纵筋轴向应力时程曲线

Fig. 3 Time history curve of axial force of longitudinal reinforcement of fabricated beam

由图 3 可知,在整个爆炸响应过程中,装配式梁跨中钢筋轴向应力随着爆炸的持续基本能达到 400 MPa 左右,而梁端的钢筋轴向应力在数值上比跨中低出一个数量级。随着爆炸的持续进行,拼装位置交界面处钢筋发生弯折并造成屈曲断裂,爆炸冲击力不能有效地传递到梁端钢筋,从而导致端部钢筋轴向应力很小,因此在整个爆炸过程中其发挥作用极其有限。

4 参数化分析

装配式钢筋混凝土梁在爆炸荷载下的动力响应和破坏形态受多个因素影响,本文对上述模型进行参数化分析,探讨不同 TNT 当量、混凝土强度、受拉钢筋直径、水平爆炸距离等因素对装配式梁抗爆性能的影响。由于爆炸荷载作用于结构时间极其短暂,且装配式梁在比例距离 $0.44 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时已表现为较严重的局部破坏,因此下文仍取 5 ms 内跨中竖向位移来衡量装配式梁的抗爆性能。

4.1 不同 TNT 炸药当量

为了研究不同炸药当量下装配式梁抗爆性

能,分别取 TNT 炸药当量 1、2、3、4 kg,观察其在不同爆炸荷载下的破坏形态。图 4 为不同 TNT 炸药当量发生爆炸时,梁在 5 ms 时的压力云图。

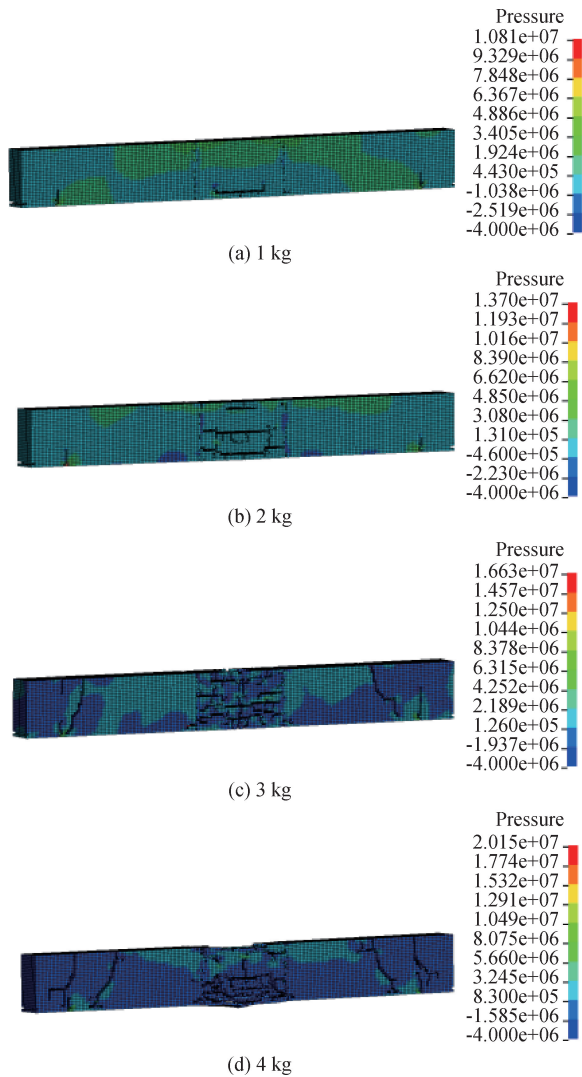


图 4 不同当量 TNT 爆炸作用下装配式梁的压力云图
Fig. 4 Pressure cloud diagram of assembled beam under different equivalent TNT explosion

当炸药当量为 1 kg 时,装配式梁在预制和后浇混凝土界面接触断开后,应力波在梁内不能有效地传递,冲击力易在拼装位置处集中,并在梁跨中受拉区产生一条横向裂纹;当炸药当量为 2 kg 时,装配式梁背爆面混凝土被拉裂,使混凝土发生脱落,拼装位置处形成两条横向裂纹;当炸药当量为 3 kg 时,此时爆炸荷载较大,拼装位置处裂纹数量迅速增多,梁剪跨区遭受较大冲击力,出现由梁顶发展的剪切斜裂缝,且梁支座处发生剪切破坏;当炸药当量为 4 kg 时,预制混凝土和后浇混凝土交界处在爆炸响应过程中刚度发生突变,爆炸冲击力传递性能减弱,不能有效地传递到梁预制部

分,使得拼装位置处易发生应力集中,在较短时间内混凝土发生了大面积失效剥落,导致钢筋在该处主要承受爆炸冲击力,由于梁拼装位置处与预制部分变形不一致,使该处钢筋发生屈服断裂。

炸药爆炸产生的冲击力主要作用于梁跨中位置,取装配式梁背爆面中心位置处的单元为观测对象,并提取装配式梁的竖向位移。图 5、图 6 分别为不同炸药当量下梁跨中位移时程曲线和峰值位移曲线。

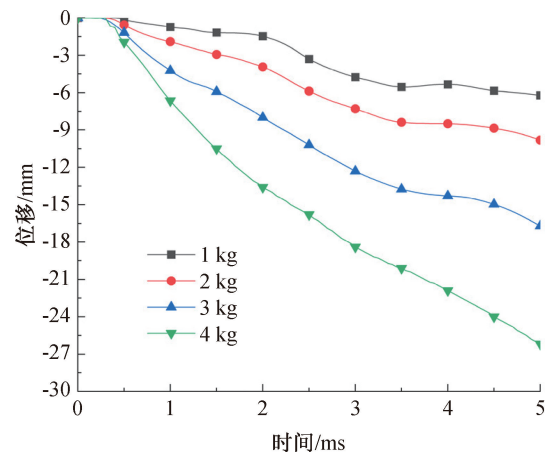


图 5 不同炸药当量位移时程曲线

Fig. 5 Time history curves of displacement of different explosive equivalents

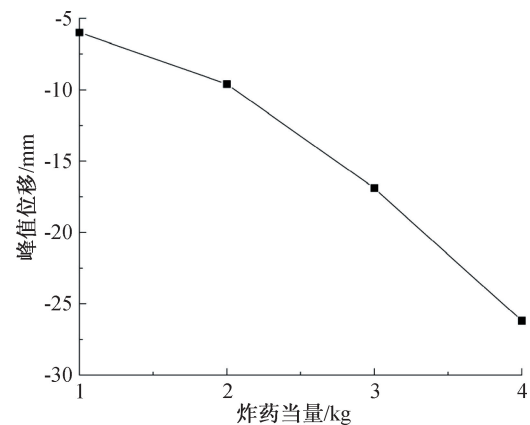


图 6 不同炸药当量峰值位移曲线

Fig. 6 Peak displacement curves of different explosives

由图 5 和图 6 可知,装配式梁的位移峰值随炸药当量的增加而增大。在炸药当量较小时,跨中位移的增大趋势逐渐趋于平缓,且有回弹趋势;而在炸药当量较大时,位移增大趋势趋于线性。当炸药当量由 1 kg 提高到 4 kg 时,装配式梁的跨中峰值位移增长 330%。可以看出在爆炸荷载较大时,装配式梁在整个爆炸响应过程中表现出集中脆性破坏。

4.2 不同混凝土强度

为了研究爆炸荷载下混凝土抗压强度对装配式梁抗爆性能的影响,分别取混凝土的抗压强度 20~60 MPa 不同值。图 7、图 8 为不同混凝土强度下梁跨中位移时程曲线和峰值位移曲线。

由图可知,随着混凝土抗压强度等级的提高,梁跨中位移峰值逐渐由 33.2 mm 减小到 24.5 mm,降幅为 26.2%。这是因为提高混凝土强度等级,使得装配式梁抗弯和抗剪承载力均有所增大,而对于 C50 和 C60 高强度混凝土,随着抗压强度的提高,梁跨中峰值位移降幅不再明显,这是因为其对应变率的敏感程度有所下降。因此混凝土强度等级采用 C40 时可兼备经济效益和抵抗爆炸荷载的性能。

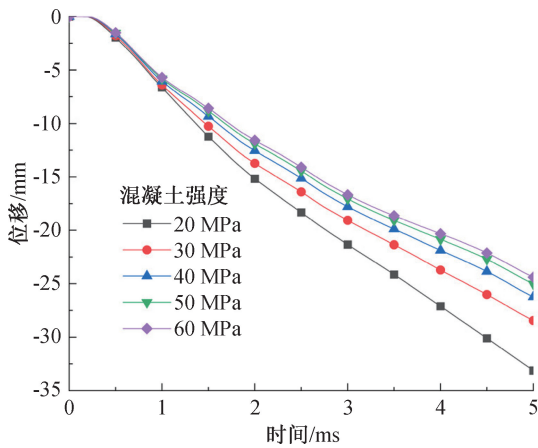


图 7 不同混凝土强度位移时程曲线

Fig. 7 Displacement time history curves of different concrete strengths

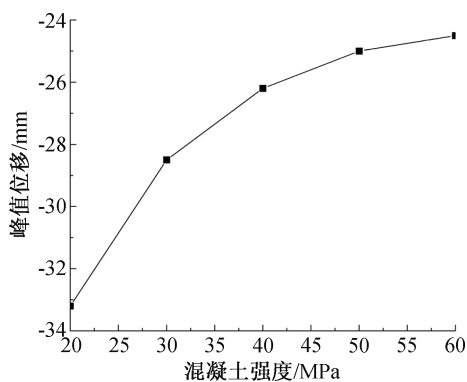


图 8 不同混凝土强度峰值位移曲线

Fig. 8 Peak displacement curves of different concrete strengths

4.3 不同纵向钢筋直径

为了研究爆炸荷载下纵向钢筋直径对装配式梁抗爆性能的影响,受拉钢筋直径分别取 12、14、16、18 mm。图 9、图 10 为不同纵筋直径下梁跨中

位移时程曲线和峰值位移曲线。

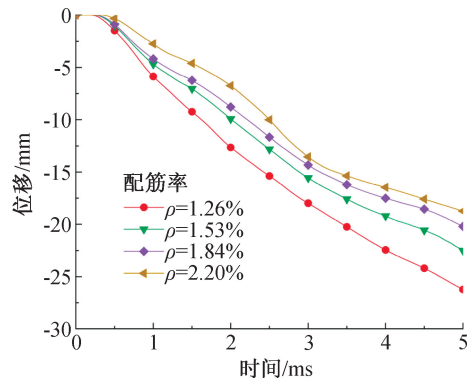


图 9 不同钢筋直径位移时程曲线

Fig. 9 Displacement time history curves of different reinforcement diameters

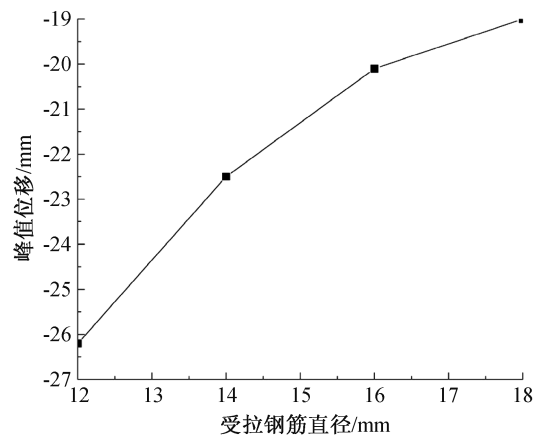


图 10 不同钢筋直径峰值位移曲线

Fig. 10 Peak displacement curves of different reinforcement diameters

由图可知,随着纵向受拉钢筋直径的增大,梁的配筋率由 1.26% 提高到 2.2%,其跨中峰值位移由 27.3 mm 降低到 18.7 mm,降幅为 31.5%。这是由于混凝土梁中,钢筋主要承受拉应力。增大纵向受拉钢筋的面积,提高了其抗拉强度,从而增加了装配式梁的抗弯能力。但过度提高纵向钢筋的配筋率以增强装配式钢筋混凝土梁抗爆性能的方式是不经济的。在保证纵向受压钢筋适当的情况下,可以适当地提高纵向受拉钢筋的配筋率来达到增强装配式梁的抗爆性能。

4.4 不同水平爆炸距离

为了研究爆炸荷载下水平爆炸距离对装配式梁抗爆性能的影响,水平爆炸距离分别取距左支座 1/2、3/8、1/4、1/8 跨梁长。图 11、图 12 为不同水平爆炸距离下梁跨中位移时程曲线和峰值位移曲线。

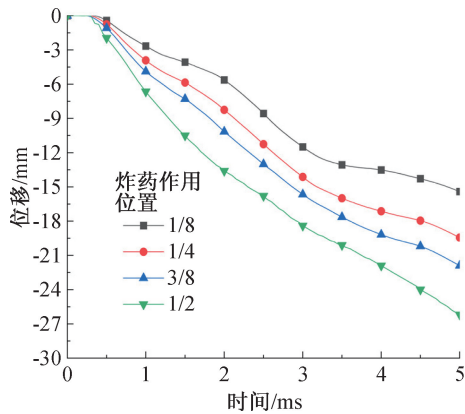


图 11 不同水平爆炸距离位移时程曲线

Fig. 11 Displacement time history curves of different horizontal explosion distances

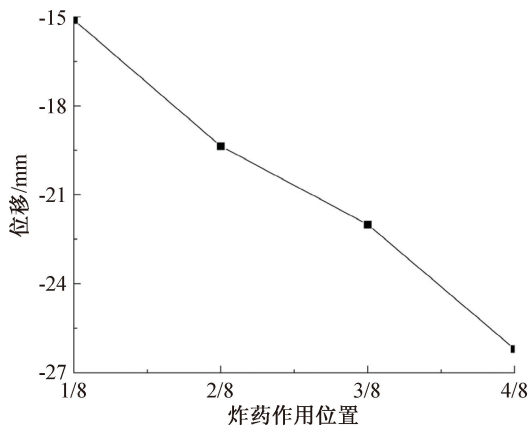


图 12 不同水平爆炸距离峰值位移曲线

Fig. 12 Peak displacement curves of different horizontal explosion distances

由图 11 和图 12 可知,当炸药距支座处水平距离越近,装配式梁跨中位移逐渐减小。当炸药作用位置由距支座 $1/2$ 跨长变为 $1/8$ 跨长时,装配式梁的峰值位移由 26.2 mm 降低为 15.1 mm ,其下降幅度为 42.37% 。当炸药位于梁跨中时,梁跨中产生的位移最大;当炸药位于梁端时,梁跨中产生的位移最小,这是由于当炸药处于跨中位置时,梁跨中距离炸药最近,在爆炸荷载作用下梁跨中为受力最不利位置,梁跨中破坏严重并产生较大的位移,因此当水平爆炸距离为 $1/2$ 跨长时为爆炸最危险的位置。

5 结论

1) 在爆炸荷载作用下,灌浆套筒连接的装配式钢筋混凝土梁的拼装位置为薄弱区;在预制构件与后浇混凝土界面接触断开后,交界面处钢筋易发生弯折并造成屈服断裂,梁拼装位置产生较大的位移,导致梁发生较严重的局部脆性破坏。

2) 在炸药当量较小时,装配式梁跨中位移的增大趋势逐渐趋于平缓,且有回弹趋势;在炸药当量较大时跨中位移增大趋势趋于线性,在整个爆炸响应过程中表现出集中脆性破坏。

3) 提高混凝土强度等级,在受压钢筋合理配置的情况下,适当提高配筋率,均可降低梁跨中峰值位移,增强装配式梁的抗爆性能,但需兼顾经济效益。

4) 水平爆炸距离对装配式梁的抗爆性能有显著影响,当炸药距支座处水平距离越近,装配式梁跨中位移逐渐减小。炸药远离装配式梁跨中位置,能有效降低梁跨中峰值位移,改善装配式梁的抗爆性能。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 5年内装配整体式建筑占比要超20%,10年内超50%[J]. 建筑结构, 2015,45(23):27.
- [2] 钟波. 爆炸作用下钢筋混凝土结构损伤破坏与连续倒塌分析高效数值模型研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [3] SUN J Y, LI G Q, LU Y. Numerical Simulation of Response of SRC Columns Subjected to Blast Loading [J]. Transactions of Tianjin University, 2006(A1):126-131.
- [4] HONG J, FANG Q, CHEN L, et al. Numerical Predictions of Concrete Slabs Under Contact Explosion by Modified K&C Material Model [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1013-1024.
- [5] 方秦,程国亮,陈力. 爆炸作用下钢筋混凝土柱非线性动力响应及破坏模式分析方法[J]. 建筑结构学报, 2012,33(12):85-91.
- [6] 王辉明,刘飞,晏麓晖,等. 接触爆炸荷载对钢筋混凝土梁的局部毁伤效应[J]. 爆炸与冲击, 2021,40(12):37-45.
- [7] 向强,刘彤,王汝恒. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的破坏模式研究[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2011,8(7):89-91+279-280.
- [8] 宋春明,王明洋,刘斌. 边界约束对梁抗爆动力响应的影响(I)-理论研究及分析[J]. 振动与冲击, 2014,33(5):82-86.
- [9] 周清,牛宁宁,刘海员,等. 剪跨比对爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁抗爆性能及破坏形态的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2017,15(1):219-224+237.
- [10] 吴文燕,卢伟. 爆炸作用时钢筋混凝土柱损伤因素分析[J]. 工程爆破, 2021,27(2):58-65.
- [11] 刘健榕. 预应力装配式混凝土框架爆炸破坏分析与抗爆加固研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
- [12] 钱凯,翁运昊. ANSYS/LS-DYNA 在混凝土结构工程中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2020.
- [13] 龚顺风,邓欢,朱升波,等. 近爆作用下钢筋混凝土板

- 动态破坏的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 20-24+100.
- [14] 刘立平, 郑歆耀, 李骥天. 装配式结构数值模拟分析中半灌浆套筒钢筋连接本构关系研究[J]. 特种结构, 2018, 35(4): 1-7.
- [15] 刘锴鑫. 装配式钢筋混凝土梁柱节点抗冲击性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [16] 刘健. 新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [17] 叶果. 新老混凝土界面抗剪性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第17页)
- [3] LEEMANN A, LOSER R. Carbonation Resistance of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 335-341.
- [4] 丁亚红, 郭书奇, 张向冈, 等. 玄武岩纤维对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1228-1238.
- [5] 董伟, 苏英, 林艳杰, 等. 粉煤灰对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 142-145.
- [6] DEVI S C, KHAN R A. Influence of Graphene Oxide on Sulfate Attack and Carbonation of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118883.
- [7] TANG J, WU J, ZOU Z, et al. Influence of Axial Loading and Carbonation Age on the Carbonation Resistance of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 707-717.
- [8] MI R, LIEW K M, PAN G, et al. Carbonation Resistance Study and Inhomogeneity Evolution of Recycled Aggregate Concretes Under Loading Effects[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118: 103916.
- [9] ZHANG K, XIAO J. Prediction Model of Carbonation Depth for Recycled Aggregate Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 88: 86-99.
- [10] 王建超, 裘子铭, 陆佳韦, 等. 废弃纤维再生混凝土碳化深度预测模型研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(5): 1503-1510.
- [11] 余海玲, 郑建岚. 基于 Python 人工神经网络的再生混凝土碳化深度预测[J]. 混凝土, 2020(9): 52-55.
- [12] LIU K, ALAM M S, ZHU J, et al. Prediction of Carbonation Depth for Recycled Aggregate Concrete Using ANN Hybridized With Swarm Intelligence Algorithms[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124382.
- [13] NUNEZ I, NEHDI M L. Machine Learning Prediction of Carbonation Depth in Recycled Aggregate Concrete Incorporating SCMs[J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 123027.
- [14] 张文之, 刘敏. 不同养护条件对大掺量粉煤灰混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2619-2624.
- [15] 王申, 李保亮, 潘子云, 等. 掺磨细镍铁渣混凝土的耐久性及其与孔结构和水化程度的关系[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51(5): 1189-1199.
- [16] 崔正龙, 张雪虹, 唐博. 不同养护环境对粉煤灰混凝土强度及碳化性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 65-69.
- [17] LU C, WANG W, LI Q, et al. Effects of Micro-environmental Climate on the Carbonation Depth and the pH Value in Fly Ash Concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181: 309-317.
- [18] JI Y, WU M, DING B, et al. The Experimental Investigation of Width of Semi-carbonation Zone in Carbonated Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 67-75.
- (责任编辑 周雪梅)