

杜永峰, 靳振飞. 灌浆套筒连接装配式框架-剪力墙爆炸响应与破坏[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 106-111, 133. [DU Yongfeng and JIN Zhenfei. Explosion Response and Failure Modes of Prefabricated Frame-shear Wall Connected by Grouting Sleeve [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 106-111, 133. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.020.]

灌浆套筒连接装配式框架-剪力墙爆炸响应与破坏^{*}

杜永峰^{1,2}, 靳振飞¹

(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 土木工程减震隔震技术研发甘肃省国际科技合作基地, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 为了探究采用灌浆套筒连接的装配式框架-剪力墙结构的爆炸响应与破坏模式, 运用 LS-DYNA 软件建立一榀两层的现浇框架-剪力墙和装配式框架-剪力墙的有限元模型, 分别模拟分析了不同位置处发生爆炸时两种框架-剪力墙结构的动态响应及破坏模式, 并对灌浆套筒连接的装配式框架-剪力墙进行了抗爆性能评估。研究表明: 灌浆套筒连接的装配式框架-剪力墙结构整体性差, 主要原因是预制构件和坐浆层、现浇带之间存在新旧混凝土的薄弱粘结面, 粘结面的界面接触在爆炸荷载下首先发生断开, 然后爆炸冲击力在结构局部区域发生聚集, 使得结构的变形较为集中, 容易造成结构局部发生严重的脆性破坏; 现浇框架-剪力墙结构具有较好的整体性, 爆炸冲击力在结构内能够有效地传递, 而且构件之间具有良好的协同作用, 结构变形较为均匀, 现浇框架-剪力墙的破坏为延性破坏; 炸药在结构中不同位置发生爆炸时, 爆炸冲击波直接作用的构件损坏严重, 其它构件损坏较轻。

关键词: 装配式框架-剪力墙结构; 爆炸荷载; 灌浆套筒; LS-DYNA; 动态响应

中图分类号: TU375.4; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0106-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.020

近年来, 随着我国人口逐渐步入老龄化阶段, 建筑行业的劳动力逐年紧缺, 使得传统的劳动密集型生产技术难以满足当前建设的需求。装配式建筑因采用工厂化的生产方式, 实现了高效、绿色的建造过程, 符合我国倡导的绿色建筑的发展要求, 从而得到广泛应用。另一方面, 当今世界范围内的爆炸事故频频发生, 主要包括化工企业的化学物品爆炸, 民用建筑的燃气爆炸, 以及城市的恐怖袭击爆炸等, 其不仅造成了巨额的经济损失和大量的人员伤亡, 而且严重扰乱了社会的健康发展。装配式混凝土结构因其节点连接相对薄弱, 在遭受爆炸等突发性灾害时, 连接节点易先发生损坏, 容易引起建筑结构发生倒塌, 因而装配式混凝土结构的抗爆性能面临着巨大的挑战^[1-2]。

目前, 对于钢筋混凝土构件在爆炸荷载下的响应与破坏已进行了广泛的研究, 周青等^[3]对不同剪跨比下钢筋混凝土梁的抗爆性能和破坏形态进行了模拟分析, 发现改变剪跨比对梁的破坏模式影响较大; 焦燊烽等^[4]对不同边界约束下钢筋混凝土柱的爆炸响应进行了模拟分析, 发现比例距离对柱子的侧移和失效模式均有显著的影响; 周晓青等^[5]对爆炸荷载下防爆墙的动态损伤进行

了模拟分析, 发现该种墙体的固端端先发生破坏, 然后该处钢筋屈服被拉断; 刘健榕^[6]对后张无粘结预应力装配式框架结构的爆炸响应与破坏进行系统的模拟分析, 并提出相应的加固措施。对于装配式框架-剪力墙结构的抗震性能的研究已相对系统, BOURNAAS 等^[7]完成了1个3层装配式框架-剪力墙结构模型的拟静力试验研究; NEGRO 等^[8]完成了1个3层装配式框架-剪力墙结构模型的拟动力试验研究; 高强^[9]对灌浆套筒连接的装配式框架-剪力墙提出了几种拆分方案, 并根据经济技术指标确定出一种最优方案; 马军卫等^[10-11]通过低周反复荷载试验对灌浆套筒连接的装配式框架-剪力墙抗震性能进行了系统的研究; 杨霖^[12]对装配式框架-剪力墙结构的抗震性能进行了理论分析研究。然而, 从已有研究来看, 对于装配式框架-剪力墙结构抗爆性能的研究却相对较少。

本文运用 LS-DYNA 软件建立了普通现浇框架-剪力墙和采用灌浆套筒连接的装配式框架-剪力墙结构的数值分析模型, 分析了炸药位于第一层框架中心和右柱正前方时框架-剪力墙结构的

* 收稿日期: 2020-06-17

修回日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51778276); 甘肃省重点研发计划项目(18YF1FA067)

第一作者简介: 杜永峰(1962-), 男, 汉族, 甘肃正宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构减震控制及健康监测研究。

E-mail: dooyf@lut.edu.cn

破坏过程及动态响应,评估了两种框架-剪力墙结构的抗爆性能。

1 数值模型的建立

1.1 几何模型及算法

运用 LS-DYNA 软件建立一榀两层的现浇框架-剪力墙和装配式框架-剪力墙模型,有限元模型如图 1、图 2 所示,其中钢筋混凝土梁的截面尺寸为 450 mm×300 mm,梁长 4 000 mm,梁的纵筋为 4C16,箍筋为 C10@200;钢筋混凝土柱的截面尺寸为 600 mm×600 mm,柱高 3 000 mm,柱的纵筋为 8C20,箍筋为 C10@200;钢筋混凝土剪力墙的截面尺寸 2 600 mm×200 mm,墙高 3 000 mm,竖向分布钢筋为 C12@200,水平分布钢筋为 C10@200,其中暗梁高 400 mm,暗梁的纵筋为 4C16,箍筋为 C10@200;柱-墙现浇带的截面尺寸为 300 mm×200 mm,高 3 000 mm,配有两排直径 12 mm 竖向钢筋;混凝土的保护层厚度为 25 mm;坐浆层处采用 20 mm 厚的高强混凝土砂浆,其强度接近 C80 混凝土;预制构件之间不考虑套筒拼接的影响,认为套筒的连接性能和强度可靠,且连接钢筋连续,可直接传力,因此将灌浆套筒等效为长 200 mm 直径为 30 mm 的钢筋^[13-14]。现浇结构、预制构件及后浇带的混凝土采用 C40 普通混凝土,炸药形状为正方体。

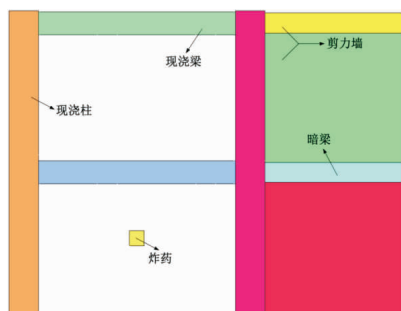


图 1 现浇框架-剪力墙模型

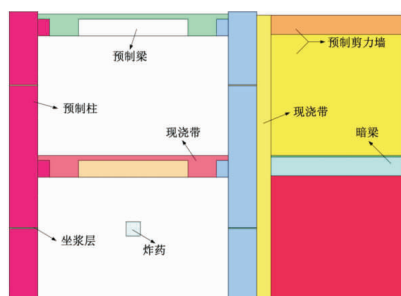


图 2 装配式框架-剪力墙模型

混凝土、炸药和空气均采用 SOLID164 实体单元,套筒和钢筋均采用 BEAM161 梁单元,网格尺寸均为 25 mm。炸药和空气进行共节点处理,采用欧拉网格,混凝土均采用拉格朗日网格。钢筋和混凝土之间不考虑其粘结滑移,采用分离式共节点的建模方式,试件与空气之间的相互作用使用流固耦合算法计算^[15]。建立适当的空气域,并在空气域边界设置无反射边界条件。

预制构件界面和坐浆层界面、现浇带界面之间采用固连失效接触。该种接触方式的失效是基于失效方程的法向应力或切向应力,粘结面在失效前,接触面的节点粘结在目标面上,接触面会跟随目标面一起变形;达到失效方程的失效条件后,接触面的节点会从目标面分离或滑移,固连接触将自动退化为自动面接触。

在 LS-DYNA 中采用关键字 *TIED_SURFACE_TO_SURFACE_FAILURE 将接触面与目标面连接起来,通过设置关键字中的变量 FS 来控制粘结面失效时的法向拉伸应力,设置变量 FD 来控制粘结面失效时的切向剪应力,以此实现新旧混凝土界面的粘结失效。新旧混凝土粘结面的抗拉强度和抗剪强度分别根据刘健^[16]、叶果^[17]建议的公式进行计算。

1.2 材料模型及参数

1.2.1 混凝土材料模型

混凝土选用综合考虑材料大变形、高应变率以及高压效应的 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 模型,该模型能够充分考虑混凝土在弹性和塑性阶段的力学性能,可较好的预测钢筋混凝土结构在爆炸冲击荷载下的动态响应^[18-19],但该种混凝土模型无法定义材料的失效条件,模拟时难以观察到混凝土的破坏形态,使得模拟结果与实际结果不相符,因此需要引进失效准则,对混凝土的失效进行判定,取失效拉应变 0.001 作为混凝土的失效判据^[20]。混凝土材料模型各参数见表 1。

表 1 混凝土材料参数

参数	RO/ (kg/m ³)	G/ GPa	FC/ MPa	T/ MPa	A	C	N
普通混凝土	2.4×10 ³	14.86	40	4	0.79	0.007	0.6
高强混凝土	2.5×10 ³	18.70	80	8	0.93	0.008	0.8

1.2.2 钢筋和套筒材料模型

钢筋和套筒选用非线性塑性随动强化模型 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC,该模型充分考虑了钢材的各项同性塑性随动强化及材料的应变率效应,常用于模拟爆炸和冲击荷载等高应变率下金属材料的变形及响应^[21]。钢筋和套筒材料各参数见表 2。

表 2 钢筋和套筒材料参数

材料	RO/ (kg/m ³)	E/GPa	PR	SIGY/ GPa	ETAN/ GPa	FS
钢筋	7850	210	0.28	0.440	4.7	0.12
套筒	7850	206	0.31	0.345	2.1	0.20

1.2.3 空气和炸药材料模型及状态方程

认为空气是无粘性的理想气体,选用空白材料 *MAT_NULL 模型和状态方程 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 进行模拟;TNT 炸药选用高能炸药 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型和 *EOS_JWL 状态方程进行模拟,JWL 状态方程表达式为:

$$P_{CJ} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}. \quad (1)$$

式中: P_{CJ} 为压力; $A = 371$ GPa、 $R_1 = 4.15$ 、 $B = 3.23$ GPa、 $R_2 = 0.95$ 和 $\omega = 0.3$ 均为材料常数; $V = 1$ 为相对体积, $E_0 = 7$ kJ/m³ 为单位体积内能,炸药密度为 1 630 kg/m³。

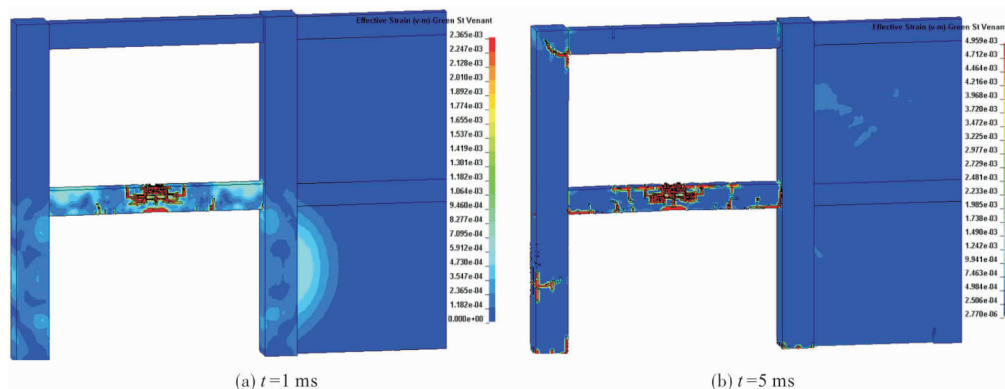


图3 现浇框架-剪力墙的破坏及裂纹发展示意图

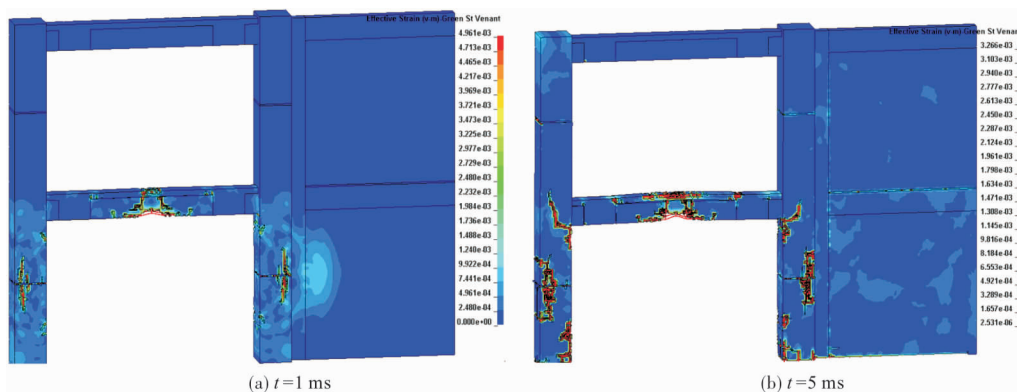


图4 装配式框架-剪力墙的破坏及裂纹发展示意图

2 结构爆炸分析

为了探究现浇框架-剪力墙结构和装配式框架-剪力墙结构的抗爆性能,在两种框架-剪力墙结构中选取了2个具有代表性的位置,并施加爆炸荷载。分别分析不同位置处发生爆炸时对两种框架-剪力墙结构整体的影响,并获得了两种框架-剪力墙结构在爆炸荷载下的破坏过程及动态响应。

2.1 炸药位于一层框架中心

当炸药被放置在一层框架中心时,炸药质心距离地面的垂直距离为1.5 m,距离两侧柱子垂直距离为2 m,TNT炸药当量为44 kg,炸药起爆方式为中心点起爆。炸药在一层框架中心爆炸时,现浇框架-剪力墙的破坏情况如图3所示。从图3中可以看出,现浇框架-剪力墙的破坏过程为:首先,当爆炸冲击波接触到结构构件时,距离炸药最近的一层现浇梁下部的混凝土在强烈地压缩应力波作用下被压碎,其上部的混凝土在强烈地拉伸波作用下被拉裂,一层现浇梁发生压弯破坏。接着,一层现浇梁两端发生严重的剪切破坏,使得现浇梁的梁端丧失了对现浇柱的水平约束支撑;与此同时,一层左侧现浇柱与炸药同一水平位置发生弯曲破坏,并且在结构底部的约束端处发生剪切破坏,这是因为左侧现浇柱的侧边无约束,在冲击波作用下发生了侧向弯曲,导致其背爆面的混凝土被拉裂。最后,二层左侧现浇柱的柱顶

发生剪切破坏,这是因为柱子顶端有约束,并且爆炸冲击力作用于现浇梁、柱的方向和大小不同,使得梁、柱发生位移的方向和大小也不同,且现浇梁的水平位移会导致其对左侧现浇柱有较大的拉伸作用。

炸药在一层框架中心爆炸时,装配式框架-剪力墙的破坏如图4所示。从图4可以看出,装配式框架-剪力墙的破坏过程:首先,一层预制梁下部的混凝土被大面积压碎,钢筋外露,并向爆炸冲击力方向发生弯曲;一层预制梁的上界面与其现浇带界面的接触失效,界面发生分离,现浇带中部微微向上拱起。接着,一层两侧的预制柱坐浆层处混凝土失效,并且其附近预制柱的混凝土失效,产生竖向裂纹;与此同时,一层两侧预制柱的柱顶混凝土被拉裂,并各产生一条斜裂纹,且结构底部约束处发生剪切破坏,这是因为该处在爆炸冲击力和梁的纵向钢筋作用下产生较大的拉应力,并且一层预制梁端部和牛腿端部均未发生严重破坏,因此对该处的预制柱有较强水平约束。最后,一层预制柱在坐浆层附近的竖向裂纹不断增多加宽,并延伸至其背爆面,导致一层预制柱逐渐丧失其竖向承载力;而且二层两侧的预制柱和剪力墙的坐浆层处混凝土也逐渐失效。

以两种结构的左侧柱子为研究对象,分别沿其高度方向每隔0.5 m取一个观测单元,图5为两种结构的左侧柱子不同高度处的水平(X向)峰值位移曲线。然后,分别沿左柱高度方向距地面1.5 m、3 m、4.5 m取一个观测单元,图6、图7

分别为两种结构的左侧柱子不同高度处的水平(X 向)位移时程曲线。从图5可以看出, 由于炸药中心距地面1.5 m处, 因此左侧柱子底部发生严重的剪切破坏, 并产生较大的位移。左侧现浇柱(ZRCZ)在柱子高度高于2 m之后, 其峰值位移沿柱子高度方向基本呈线性减小; 而左侧预制柱(ZPCZ)的峰值位移沿柱子高度方向有两个拐点, 分别为2 m处和4.5 m处, 这是因为在爆炸冲击荷载下预制柱界面与坐浆层界面的接触发生断开, 使得爆炸冲击力在结构内的传递效率降低, 且部分爆轰能量损耗在坐浆层混凝土的失效方面, 导致结构局部破坏严重, 位移发生突变。由图6、图7可以看出, 现浇柱爆心处峰值位移为10.13 mm, 预制柱爆心处峰值位移为13.85 mm, 增幅为36.72%。现浇柱4.5 m处, 在2.75 ms时位移由正向转变为负向, 说明此时现浇梁两端发生了严重的剪切破坏, 一层现浇梁丧失了对左侧现浇柱的水平约束; 而预制柱在该处一直发生正向位移, 其位移走势趋于平缓且有下降趋势, 说明梁对预制柱的水平约束在整个响应过程中一直存在, 并且随时间推移其对柱子的约束作用在逐渐减弱。

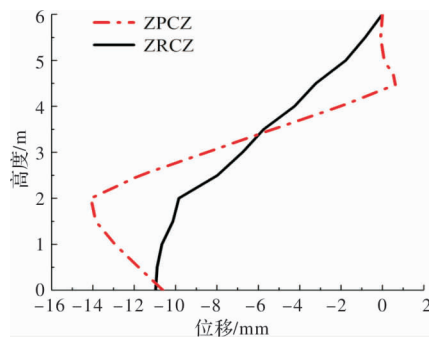


图5 柱子的不同高度处水平峰值位移

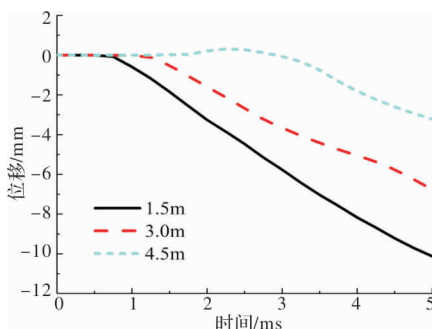


图6 现浇柱子水平位移时程曲线

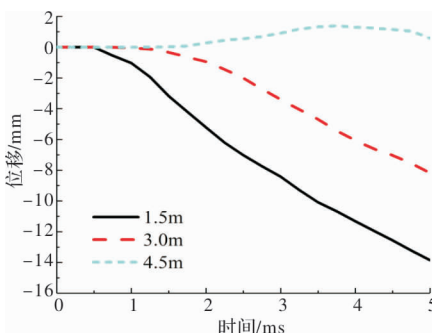


图7 装配式柱子水平位移时程曲线

以两种结构的一层梁为研究对象, 分别沿梁长度方向每隔0.5 m取一个观测单元, 图8为两种结构一层梁的不同长度处竖向(Y 向)峰值位移曲线。从图8可以看出, 两种结构一层梁的峰值位移, 由爆心向两端呈对称分布, 一层现浇梁(XRCL)爆心处峰值位移为26.37 mm, 一层预制梁(XPCL)爆心处峰值位移为34.51 mm, 增幅为30.87%。现浇梁的位移分布呈现拱形, 而预制梁的位移分布呈锥形, 说明现浇梁变形较为均匀, 受力性能良好; 而预制梁变形较为集中, 易造成局部集中破坏。

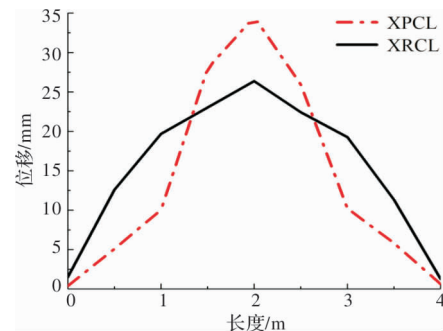


图8 梁的不同长度处竖向峰值位移

2.2 炸药位于右柱正前方

当炸药被放置在右柱正前方时, 炸药质心距离地面的垂直距离为3 m, 距离右侧柱子前表面的垂直距离为0.5 m, TNT炸药当量为44 kg, 炸药起爆方式为中心点起爆。

炸药在右柱正前方发生爆炸时, 现浇框架-剪力墙的破坏情况如图9所示。从图9中可以看出, 现浇框架-剪力墙的破坏过程为: 首先, 右侧现浇柱的迎爆面混凝土被压碎, 钢筋被压弯, 而且距离爆心约1.5 m处分别在现浇柱和现浇梁上产生裂纹, 这是因为近爆荷载较大, 并在现浇柱和现浇梁上发生冲切作用; 与此同时, 现浇柱的背爆面混凝土被拉裂, 裂纹主要产生在柱子迎爆面混凝土被压碎的周边区域在其背爆面的映射位置, 且剪力墙背面混凝土被拉裂, 产生竖向和横向裂纹, 这是因为预制柱迎爆面混凝土大量失效, 损耗了较多的爆轰能量, 而剩余应力波在其背爆面发生反射, 不足以使混凝土被大面积拉裂。接着, 剪力墙背面的横向裂纹蔓延至剪力墙中心, 竖向裂纹进一步增多并向墙体上下边缘处延伸。最后, 右侧现浇柱和剪力墙的约束处发生剪切破坏。

炸药在右柱正前方发生爆炸时, 装配式框架-剪力墙的破坏情况如图10所示。从图10中可以看出, 装配式框架-剪力墙的破坏过程为: 首先, 右侧预制柱迎爆面混凝土的破坏情况与现浇柱类似, 其背爆面的混凝土被拉裂, 产生横向和竖向的裂纹, 且其坐浆层的混凝土大面积失效。接着, 一层剪力墙与其左侧现浇带连接界面的接触失效, 粘结界面发生分离, 使得预制柱背爆面的裂纹延伸至现浇带与剪力墙连接处发生终止。最后, 结构的约束处与现浇相同, 发生剪切破坏, 剪力墙坐浆层的混凝土发生失效。

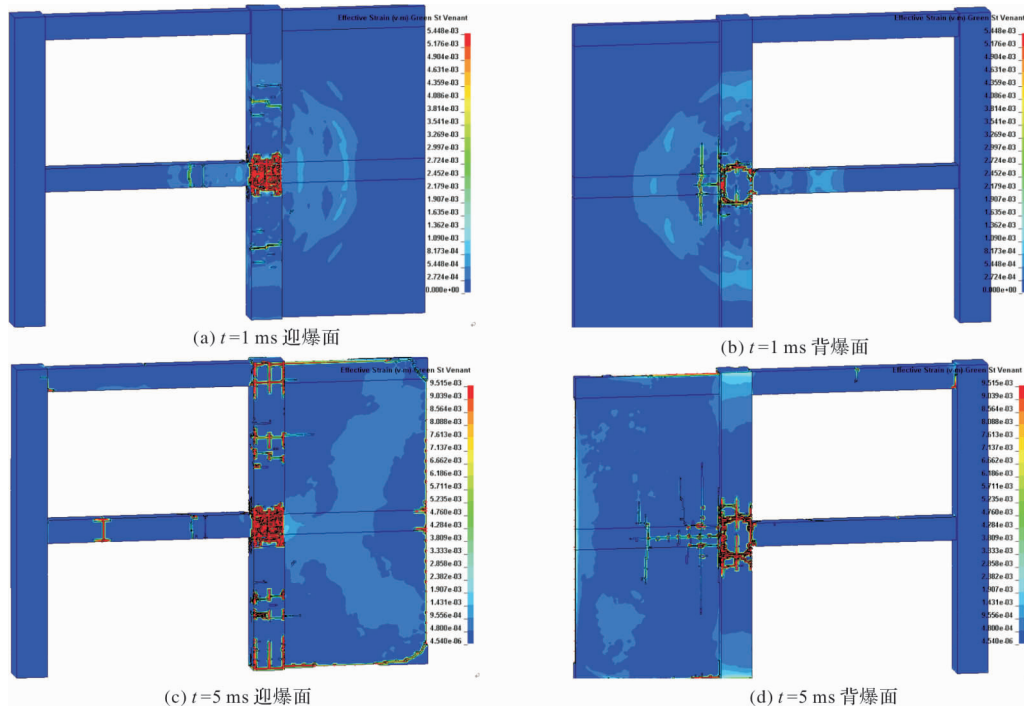


图9 现浇框架-剪力墙的破坏及裂纹发展示意图

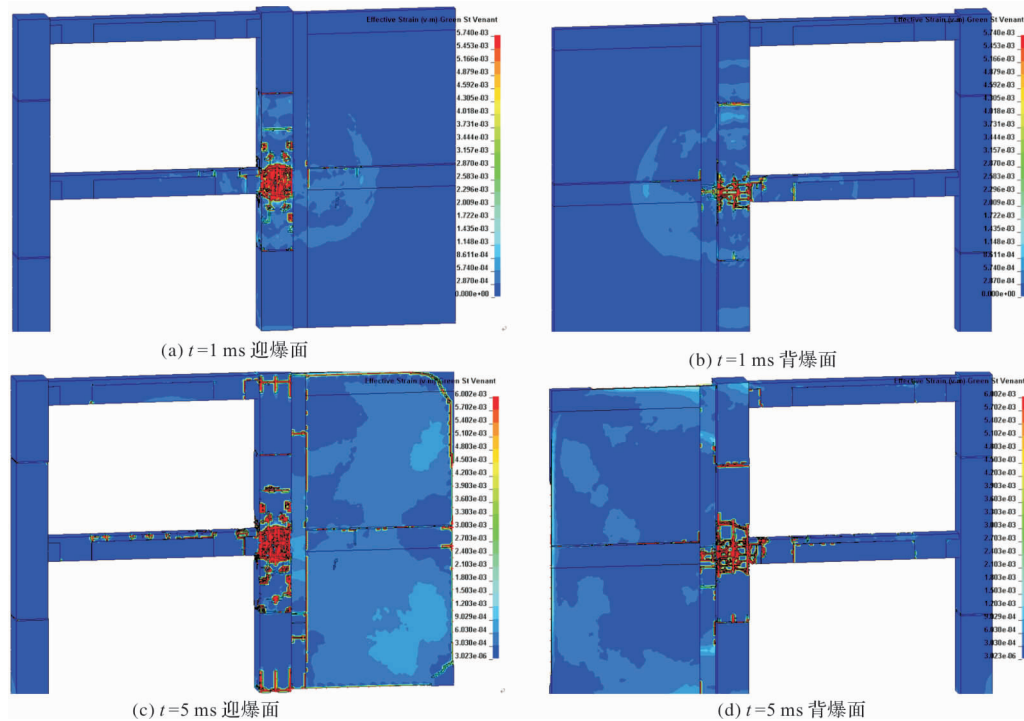


图10 装配式框架-剪力墙的破坏及裂纹发展示意图

以两种结构的右侧柱子为研究对象,分别沿其高度方向每隔0.5 m取一个观测单元,图11为两种结构的右侧柱子不同高度处的Z向峰值位移曲线。从图11可以看出,右侧现浇柱(YRCZ)的峰值位移为13.11 mm,右侧预制柱(YPCZ)的峰值位移为26.81 mm,增幅为104.73%。说明右侧预制柱在爆心附近与其连接构件的界面接触发生失效后,使得右侧预制柱所受的约束力明显减弱,爆心在遭受爆炸冲击力的作用后,位移发生了陡增。

以两种结构的右侧柱子为研究对象,图12为两种结构的右侧柱子内能变化时程曲线。从图12中可以看出,爆炸冲击波作用于柱子时,使得其内部内能迅速增大又减小,在约0.5 ms之后,内能会维持在一个相对稳定且缓慢波动的状态,现浇柱的残余内能相比预制柱较高,根据能量守恒定律,两种构件的动能恰好相反,说明预制柱相较于现浇柱塑性变形耗能较差,变形集中,其抗爆性能较差。

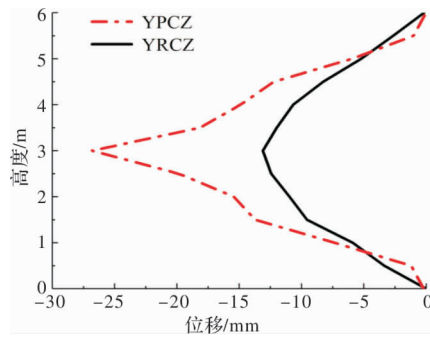


图 11 柱子的不同高度处 Z 向峰值位移

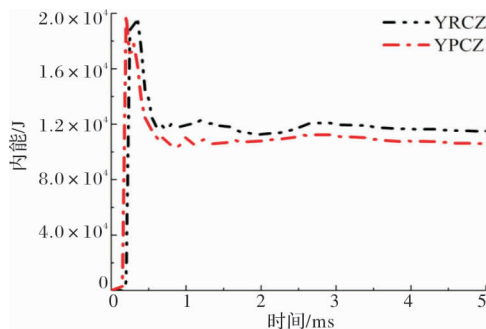


图 12 右侧柱子内能变化时程曲线

综上所述,现浇结构损伤及裂纹发展较为对称,裂纹呈现“多而散”的特点,而装配式结构的损伤比较集中,裂纹呈现“少而聚”的特点。这说明在爆炸冲击荷载作用下,装配式框架-剪力墙的预制构件和与其连接的坐浆层及现浇带的界面接触断开后,使得爆炸应力波在结构局部区域发生大量聚集,且爆炸冲击力在结构中的传递效率降低,结构表面的裂纹发展受阻,进而导致爆轰能量未能及时释放而发生集聚。爆炸所产生的爆轰能量,其中一部分能量使得结构主要受力构件的局部混凝土单元失效,造成结构局部严重损坏;另一部分能量转化为结构的动能,使得结构局部产生较大的变形;剩余的能量逸散在空气中,促使周围空气的温度和压强急剧上升,极易诱发火灾等次生灾害。装配式结构整体性较差,其抗爆性能较弱。现浇框架-剪力墙结构具有良好的整体性,爆炸冲击力在结构内能有效地进行传递,且构件之间具有良好的协同作用,结构受力性能较好,变形较为均匀。

3 结论

本文基于 LS-DYNA 分别模拟分析了炸药位于第一层框架中心和右侧柱子中心正前方时,两种框架-剪力墙结构的破坏过程及动态响应,同时对两种结构的抗爆性能进行了评估,得出以下结论:

(1)炸药在两种框架-剪力墙结构的不同位置发生爆炸时,爆炸冲击波直接作用的构件发生了较为严重的损坏,其它构件的损伤程度较轻;并且现浇结构变形和裂纹发展较为均匀对称,而装配式结构的变形和损伤相对集中。

(2)在爆炸距离和炸药当量相同的情况下,装

配式框架-剪力墙爆心的峰值位移大于现浇框架-剪力墙;预制构件的残余内能低于现浇构件,说明预制构件的塑性变形耗能较差。

(3)在爆炸冲击荷载作用下,现浇框架-剪力墙结构整体性好,爆炸冲击力传递有效,构件间协同作用良好,变形较为均匀;而装配式框架-剪力墙结构整体性较差,爆炸冲击力容易在结构的薄弱部位聚集,使得结构变形较为集中,容易造成结构局部严重损坏,其抗爆性能较弱。

参考文献:

- [1] 丁阳,刘卫宗.爆炸荷载下高层钢筋混凝土结构连续倒塌机制与模式研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(10):881-887.
- [2] 杜永峰,曾晓虹.隔震结构在地下室内爆炸荷载作用下的连续倒塌模拟[J].兰州理工大学学报,2019,45(2):113-120.
- [3] 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.
- [4] 焦焯峰,赵果,侯延利,等.爆炸荷载下不同约束钢筋混凝土柱的响应分析[J].建筑科学,2015,31(5):60-64,68.
- [5] 周晓青,洪家柱.爆炸荷载作用下钢筋混凝土墙的动态响应模拟[J].防灾减灾工程学报,2016,36(1):153-158.
- [6] 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.
- [7] DIONYSIOS A Bourmas, PAOLO Negro, FRANCISCO J, et al. Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: behavior of the mechanical connections and floor diaphragms[R]. EUR 25496 EN Joint Research Centre - Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2012.
- [8] PAOLO Negro, DIONYSIOS A Bourmas, FRANCISCO J Molina. Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: global response[J]. Engineering Structures, 2013, 57(4): 594-608.
- [9] 高强.装配式框架-剪力墙结构形式和拼装技术研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2014.
- [10] 马军卫,潘金龙,尹万云,等.灌浆套筒连接全装配式框架-剪力墙结构抗震性能试验研究[J].工程力学,2017,34(10):178-187.
- [11] 马军卫,潘金龙,莫创,等.半装配式框架-剪力墙结构抗震性能试验[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(2):313-319.
- [12] 杨霖.装配式框架-剪力墙的抗震性能分析及加固措施的研究[D].成都:成都理工大学,2019.
- [13] 赵唯坚,钟全,贾连光,等.装配式混凝土框架-剪力墙结构低周往复加载分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(2):276-285.
- [14] 李骥天.装配式结构中半灌浆套筒钢筋连接的本构关系研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [15] 孙加超,陈小伟,邓勇军,等.爆炸荷载下基于细观建模的素/钢筋混凝土板破坏模式[J].爆炸与冲击,2019,39(11):32-42.
- [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.
- [18] 常永奎,常凯,许超.对 LS-DYNA 中混凝土 HJC 模型的探讨[J].吉林建筑工程学院学报,2013,30(2):27-29.
- [19] TAI Y S, CHU T L, HU H T, et al. Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load[J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2011, 56(3): 140-147.
- [20] 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.
- [21] LS-DYNA. Keyword user's manual[M]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.

(下转第 133 页)

Insurers and Insurance-linked Securities During COVID-19

TAO Zhengru

(*Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China*)

Abstract: The outbreak of COVID-19 in late 2019 has caused far-reaching effects on the whole world, and has severely hit all economies, and major changes appeared in production and lifestyle. Even six months passed, the situation is still not clear, a large number of people are confined every day, and the global economic prospect is full of uncertainty. By observing the impact of COVID-19 on the insurance sector, it is believed its future coverage will be expanded to pandemic, under the circumstances of policy promotion and increased demand. By calculating the beta values of an insurance-linked securities index and the global stock indices, zero beta characteristics remains during the pandemic. By adding the index to the portfolio of the stock indices, the effective boundary has been expanded, which implies the advantages as a risk management instrument. A triggered CAT bond is analyzed, and the cooperation with the capital market will greatly expand insurers' capacity and scope.

Key words: COVID-19; insurance; insurance-linked securities; zero beta; CAT bonds

(上接第 111 页)

Explosion Response and Failure Modes of Prefabricated Frame-shear Wall Connected by Grouting Sleeve

DU Yongfeng^{1,2} and JIN Zhenfei¹

(1. *Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*; 2. *International Research Base of Seismic Mitigation and Isolation of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: In order to study the explosion response and failure modes of the prefabricated frame-shear wall connected by grouting sleeve. A two-layer finite element model of cast-in-place frame-shear wall and assembled frame-shear wall was established by using software LS-DYNA. The dynamic response and failure modes of two kinds of frame-shear wall structures were simulated and analyzed, and the anti-explosion performance of the prefabricated frame-shear wall connected by grouting sleeve was evaluated. The results showed that the performance frame-shear wall connected by grouting sleeve was poor in the integral performance. The main reason is that there are some weak bonding surfaces of the old and new concrete between prefabricated components, slurry layer and cast-in-place area. The interface contact of the bonding surface is broken at first, and the explosion impact force is concentrated in the local area of the structure, and the deformation of the structure is relatively concentrated, which is easy to cause serious brittle failure in the local area of the structure. The cast-in-place frame-shear wall structure has a good integral performance. The explosion impact force can be transferred effectively within the structure and there is a good synergy between the components, which makes the deformation of the structure more uniform. The cast-in-place frame-shear wall occur ductile failure. When the explosives explode at different positions in the structure, the components directly affected by the blast wave are seriously damaged, while the other components are less damaged.

Key words: prefabricated frame-shear wall structure; blast load; grouting sleeve; LS-DYNA; dynamic response