DOI: 10.11883/bzycj-2018-0284

泡沫铝防护钢筋混凝土板的抗爆性能*

高海莹[1],刘中宪[1],杨烨凯[2],吴成清[3],耿佳莹[1]
(1. 天津城建大学天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室,天津 300384;
2. 天津大学建筑工程学院,天津 300072;
3. 悉尼科技大学,澳大利亚 悉尼 2007)

摘要: 为研究多孔吸能材料泡沫铝板对工程结构的抗爆防护作用,开展室外爆炸破坏实验,分别对设置不同泡沫铝防护层的钢筋混凝土(reinforced concrete,RC)板在爆炸荷载下的动态响应及破坏模式进行了研究,并运用 LS-DYNA 软件建立了有限元模型。通过与实验对照,验证了模型的可行性,对比分析了有、无泡沫铝防护层钢筋混凝土板的损伤破坏规律,并讨论了泡沫铝密度梯度分布和纵筋配筋率的影响。结果表明:有限元模型能够有效分析含泡沫铝防护层 RC 板的动态响应及其破坏形态;泡沫铝防护层能够有效减小钢筋混凝土板的挠度变形,降低试件的破坏程度;泡沫铝密度由下到上递增情况对 RC 板的减爆效果最好;增大配筋率可以提升泡沫铝防护 RC 板整体抗爆性能。

关键词: 泡沫铝;钢筋混凝土板;爆炸荷载;抗爆性能;密度梯度
中图分类号: O383;TU398.9 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

近年来爆炸事故和恐怖袭击等突发事件频繁发生造成了恶劣的社会影响。因此,如何防护建筑结构在爆炸荷载作用下的破坏,最大程度地降低生命财产损失,引起了众多学者的关注。泡沫层常用作防护层,通过牺牲自身结构特性来保护结构、设备等免受爆炸和冲击的破坏[1]。泡沫铝具有自重轻、造价低、可循环利用及减震吸能性良好等优点,因此可以将其应用到混凝土结构的抗爆减爆方面。很多学者针对泡沫铝的动态冲击特性进行了理论分析、实验研究与数值模拟研究[2-6]。王永刚等[7]通过实验和数值模拟对泡沫铝中冲击波传播特性进行了研究,认为泡沫铝的本构黏性效应是导致冲击波被吸收和弥散的主要原因。边小华等[8]利用有限元软件对坑道中有、无泡沫铝缓冲层两种情况进行了数值模拟,比较了空气单元冲击波峰值,发现泡沫铝有利于爆炸冲击波的衰减。袁林等[9]对含泡沫铝防护层 RC 板在 5 kg Pentolite 炸药空气爆炸下的动力响应进行了数值模拟,发现在一定厚度范围内,泡沫铝防护层厚度越大,其防护效果越好,而当超过此范围后,泡沫铝厚度变化对爆炸冲击波的衰减效果不再明显。王曦浩等[10]通过对钢板夹泡沫铝组合板进行接触爆炸实验和模拟研究,发现适当增大泡沫铝夹芯层厚度可提高其组合板的抗爆性能。Dong 等[11]开展实验和数值模拟对钢筋混凝土和泡沫铝夹芯板在爆炸载荷下的动态行为进行了研究。Li 等[12]通过实验和有限元模拟对具有密度梯度的蜂窝铝金属夹芯板在爆炸荷载下的动力响应进行了研究,发现相对密度递减的结构具有更好的抗爆性。另外,一些学者对分层梯度泡沫金属的力学性能及闭孔泡沫铝的能量吸收方面做了大量的研究[13-15]。目前关于在爆炸荷载下多层泡沫铝的动态响应研究较少,因此,本文中首先通过设置不同泡沫铝防护层 RC 板的室外爆炸实验,进一步验证泡沫铝对结构构件优异的抗爆防护性能,并分析不同密度分布的泡沫铝防护层对 RC 板抗爆性能的影响;然后运用 LS-DYNA 软件建立含泡沫铝防护层的 RC 板三维有限元模型,并通过与实验数据对比验证所建立模型的有效性,进而进行参数化分析,对含泡沫铝防护层的 RC 板与普通 RC 板的抗爆性能进行研究,分析泡沫铝防护层密

* **收稿日期**: 2018-08-08; **修回日期**: 2018-11-19
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)重点项目(2015C13058002);
国家自然科学基金项目(51578362);天津市科技支撑计划项目(17YFZCSF01140)
第一作者: 高海莹(1993—),女,硕士研究生,2549314304@qq.com;
通信作者: 刘中宪(1982—),男,博士,教授,zhongxian1212@163.com。

度梯度、RC 板配筋率对 RC 板抗爆性能的影响，以期研究结果能够为泡沫铝防护层在工程结构抗爆方面的推广应用提供一定的理论参考。

1　爆炸实验

1.1　试件设计

实验共制作 5 块 RC 板，其尺寸均为 2 000 mm×800 mm×120 mm，混凝土强度等级为 C35，钢筋强度等级为 HRB335，钢筋采用双层双向布筋，其中纵向钢筋直径为 12 mm，间距为 95 mm，横向钢筋直径为 10 mm，间距为 196 mm，如图 1 所示。泡沫铝防护板的尺寸为 2 000 mm×800 mm×80 mm，不同型号泡沫铝板所对应的试件编号以及泡沫铝板的密度分布情况见表 1、图 2。由于泡沫铝材料含有孔洞，承受直接爆炸载荷作用会使防护层受力不均匀[16]，所以在泡沫铝板上层粘贴 1.1 mm 厚的钢制薄板。钢板、泡沫铝板、RC 板之间均通过环氧树脂粘结，如图 3 所示。

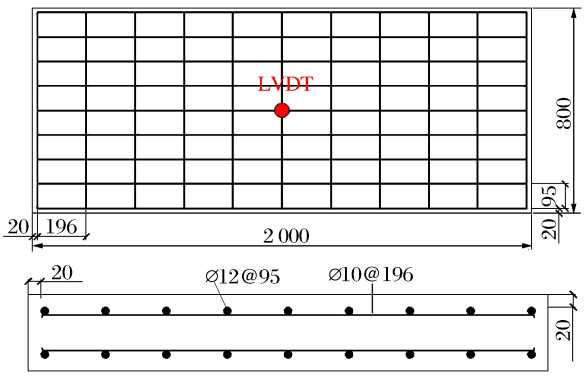


图 1　混凝土板尺寸及钢筋布置(单位为 mm)

Fig. 1　Size of RC slab and reinforcement layout in it (uint in mm)

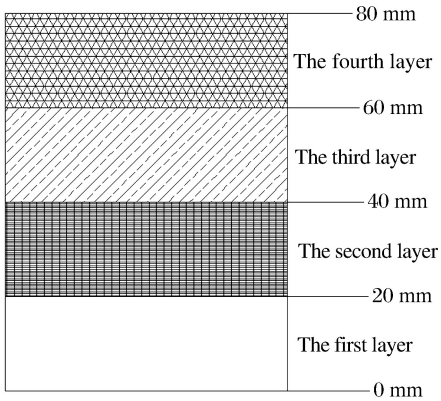


图 2　泡沫铝分层示意图

Fig. 2　Configuration of graded aluminum foam

表 1　试件编号及密度分布

Table 1　Number of test specimens and their density distribution

试件编号	泡沫铝类型	密度/(kg·m^{-3})				
		平均	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
N1						
NF2	密度均匀	300				
NF3	密度线性变化	300	225	275	325	375
NF4	密度线性变化	300	375	325	275	225
NF5	密度无序变化	300	325	275	225	375



图 3　含泡沫铝保护层的钢筋混凝土板

Fig. 3　Reinforced concrete slab with aluminum foam protective layer

1.2　实验设置

本实验采用 8 kg TNT 炸药，直径为 225 mm，高度为 120 mm，炸药垂直悬挂距铁板中心 1.5 m 处。支座由凹槽形钢板组成，并通过高强螺栓将试件短边固定，如图 4 所示。为测得爆炸荷载作用下的压力时程曲线，浇筑前在试件板的跨中预留圆柱形孔洞，并放置压力传感器。试件背爆面位移计布置见图 1，其中 LVDT 为位移传感器。

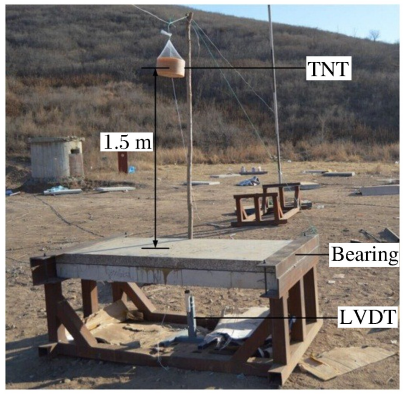


图 4　实验布置

Fig. 4　Layout of blast test

1.3　实验结果及分析

在爆炸荷载作用下，由压力传感器测得的压力时程曲线如图 5 所示。LS-DYNA 中爆炸载荷所采用的 CONWEP 算法是基于 UFC (unified facilities criteria) 的，参照文献[17]计算得到的峰值压力为11.72 MPa，持时为 0.67 ms，而实测值分别为 11.36 MPa 和 0.51 ms，峰值超压计算值与实测值相差 3.2%，差距较小。

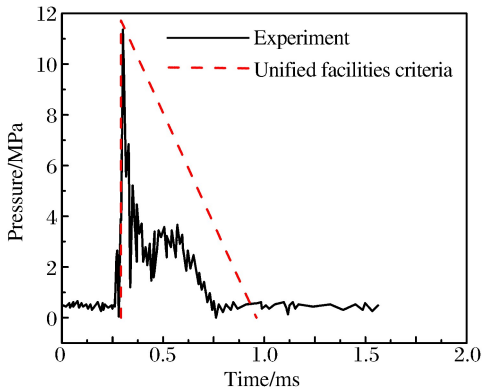


图 5　爆炸波压力时程曲线

Fig. 5　Pressure-time curves of blast

由于爆炸冲击波强度较高，部分 LVDT 损坏，未能测得完整的实验数据。虽然试件 NF3、NF5 的位移曲线不完整，但是仍然可以看出爆炸过程中的位移峰值。为使各试件实验结果对比更清晰，截取 0.10 s 以前的位移时程曲线，如图 6(a)所示。完整的位移时程曲线如图 6(b)所示，其中对试件 NF2 测得的位移出现负值表明试件板发生了回弹。实验完毕后，手工测量其残余位移，位移峰值和残余位移的测量结果见表 2。从表 2 可以看出，试件 N1 的位移峰值和残余位移均为最大；试件 NF3 的位移减小最显著，残余位移和位移峰值相对试件 N1 分别减小 47%和 51%；试件 NF2 和 NF5 的残余位移相同，相对试件 N1 减小 37%，位移峰值相差不大，相对试件 N1 分别减小 43%和 37%；试件 NF4 的位移峰值和残余位移较大，试件 NF3 的位移峰值和残余位移相对其分别减小 27%和 23%。这说明泡沫铝密度由下到上线性递增情况可以提高泡沫铝的吸能性，减小结构构件的位移，但泡沫铝密度由下到上递减情况下其吸能效果并不是很好，另外密度无序变化相对于密度均匀的泡沫铝防护板的防护效果没有明显提高。

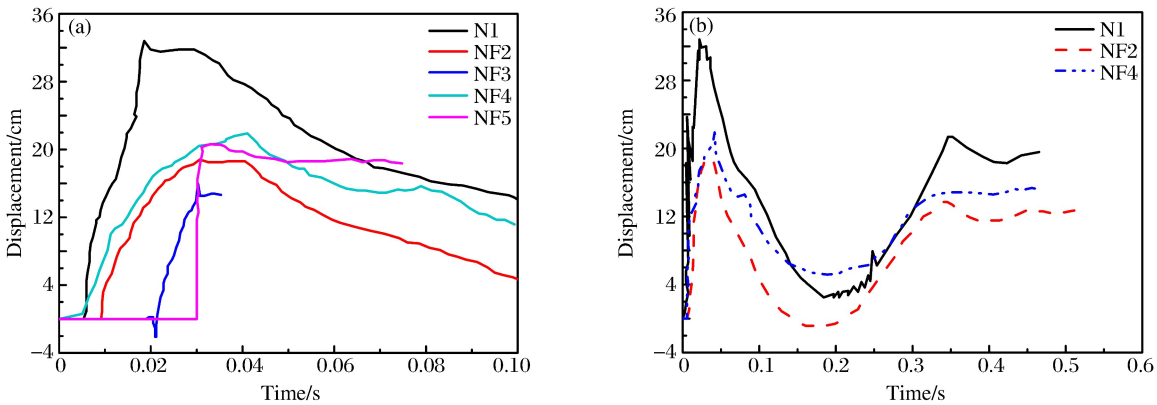


图 6　RC 试件板的位移时程曲线

Fig. 6　Displacement-time curves of RC slabs

表 2 位移峰值和残余位移的测量结果

Table 2 Measured results of displacement peaks and residual displacements

试件编号	位移峰值/cm	残余位移/cm	试件编号	位移峰值/cm	残余位移/cm
N1	32.8	19	NF4	21.9	13
NF2	18.7	12	NF5	20.6	12
NF3	16.0	10			

图 7 给出了各个试件的损伤破坏形态。由图 7 可以看出，试件 N1 的破坏情况最严重：跨中受压区混凝土完全压碎，受拉区混凝土裂缝开展过大，钢筋暴露在外面，部分受拉钢筋已被拉断，混凝土裂缝集中在跨中位置，主裂缝周围没有细小裂缝生成。而在泡沫铝板防护层的作用下，RC 板的破坏程度均明显减轻：混凝土没有崩落，裂缝宽度明显减小，且主裂缝周围有许多细小均匀裂缝产生，并向板两端分散，如图 8 所示。这说明泡沫铝防护板能够有效地吸收并分散能量，从而减小爆炸荷载的破坏作用。实验测得试件 NF2、NF3、NF4、NF5 的裂缝宽度分别为 15、5、10、12 mm，且试件 NF3 的裂缝分布更均匀，进一步说明泡沫铝密度由下到上线性递增情况可以改善泡沫铝防护板的防爆性能，且这种密度线性递增情况的泡沫铝防护板的防护效果优于密度无序变化的泡沫铝防护板。

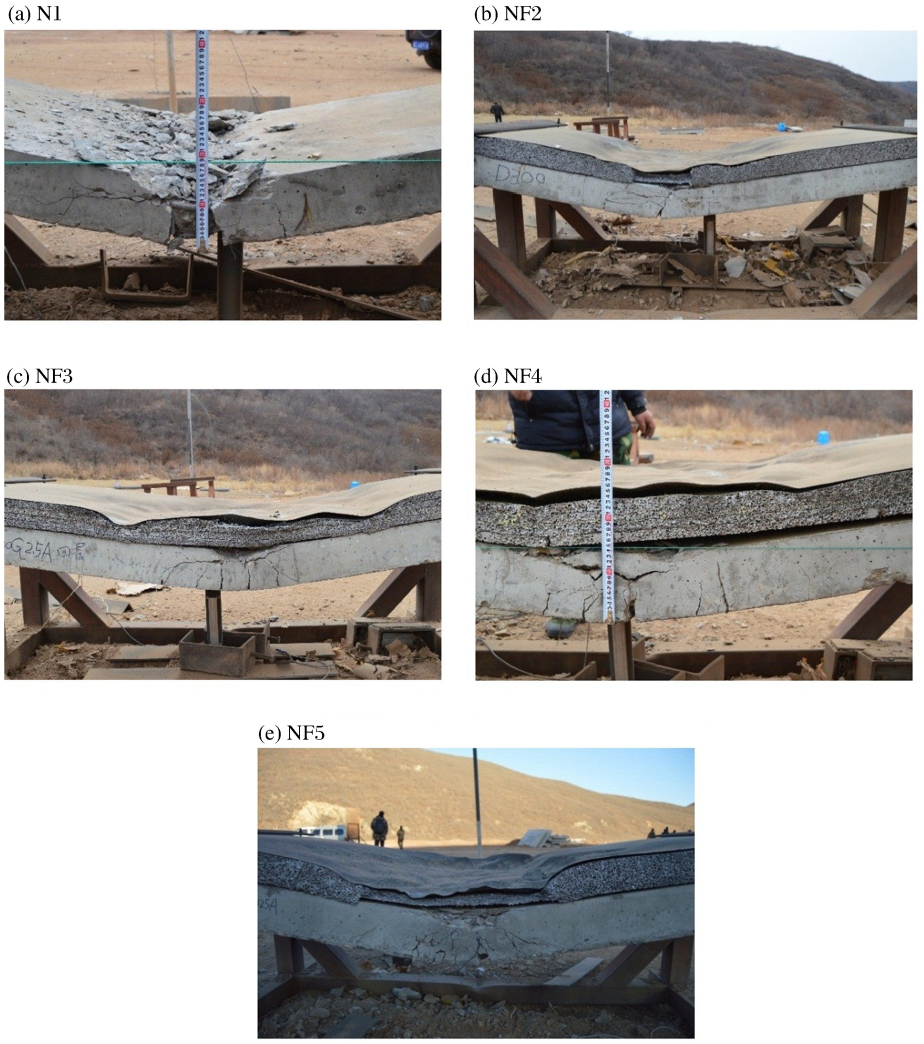


图 7 试件破坏情况

Fig. 7 Damage of specimens

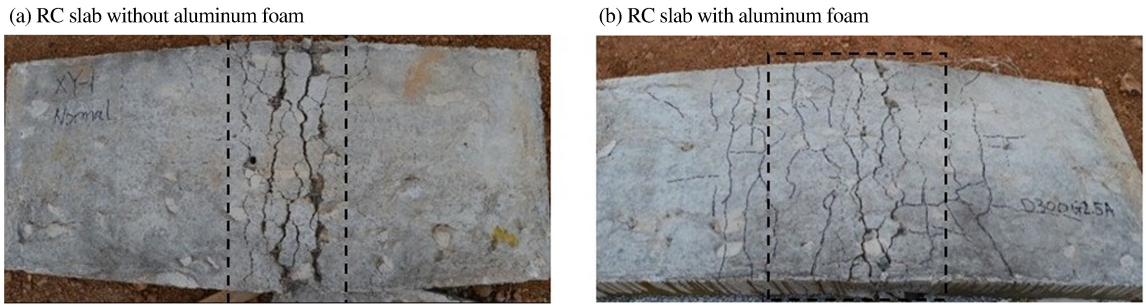


图 8　RC 板背爆面裂缝对比

Fig. 8　Comparison of cracks on the back blast surfaces of the RC slabs

2　数值模拟

2.1　有限元模型

有限元模型如图 9 所示。钢筋采用双层双向布筋，平行钢筋间隔 80 mm。通过网格收敛性分析确定所有部件网格尺寸为 10 mm，混凝土和泡沫铝采用单积分点正六面体单元进行模拟，纵向钢筋和横向钢筋均采用梁单元进行模拟。支撑与板之间采用自动单面接触算法，钢筋与混凝土之间以及泡沫铝与钢板之间通过共用节点连接。本文通过 CONWEP 算法将爆炸荷载施加于泡沫铝板的迎爆面上。

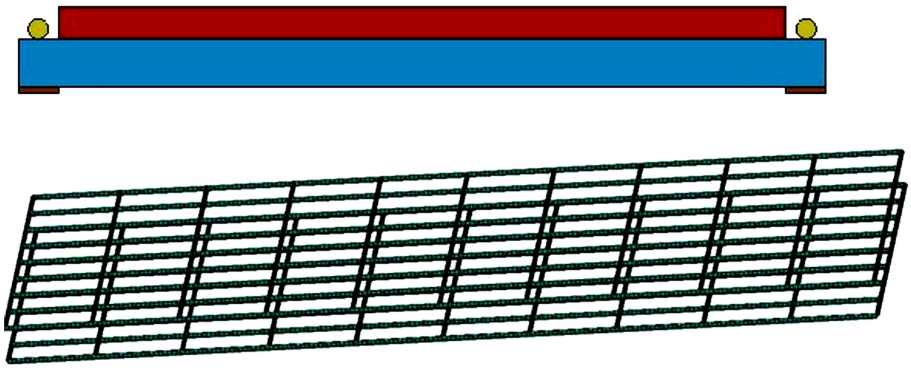


图 9　有限元模型

Fig. 9　Finite element model

2.2　材料模型

泡沫铝材料采用 * MAT_CRUSHABLE_FOAM 本构模型[18]，本构关系需要输入材料的应力应变曲线。选择密度为 300 kg/m^3 的泡沫铝进行了单轴压力实验，得到其在准静态压力作用下的应力应变曲线，如图 10 所示。泡沫铝材料密度为 300 kg/m^3，弹性模量为 142 MPa，泊松比为 0.03。

钢筋材料采用双线性弹塑性模型(MAT_PLASTIC_KINEMATIC)[19]，该模型可以近似模拟钢筋的弹塑性阶段，还可以考虑材料的应变率效应和其在强烈荷载作用下的失效问题，如图 11 所示。其中，屈服面具有固定的中心，而半径与塑性应变相关的称之为同向强化，反之，屈服面半径为定值而中心位置与塑性应变相关的称之为随动强化。屈服面以及塑性应变由以下方程确定：

$$\varphi=\frac{1}{2}s_{ij}s_{ij}-\frac{\sigma_y^2}{3}=0 \tag{1}$$

式(1)是一个服从 Mises 屈服函数的塑性势函数，其中应力偏张量 $s_{ij}=\sigma_{ij}-\sigma_m$，$s_{ij}=\sigma_{ij}-\sigma_m$，$\sigma_{ij}$ 为应力张量，σ_m 为应力球张量；屈服应力 $\sigma_y=\sigma_0+\beta E_p\varepsilon_{eff}^p$，其中 σ_0 为初始屈服强度，β 为硬化系数，E_p 为塑性硬化模量，ε_{eff}^p 为有效塑性应变。

材料的抗拉强度和抗压强度与材料的应变率有着密切联系，而钢筋的应变率效应可通过 Cowper-

Symonds[20-21]公式考虑，该公式如下：

$$\sigma_{\mathrm{y}}=\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}}\right](\sigma_0+\beta E_{\mathrm{p}}\varepsilon_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{p}}) \tag{2}$$

式中：$\dot{\varepsilon}$ 为应变率，可由 $\dot{\varepsilon}=\sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}$ 求得，σ_0 为材料(准)静态屈服应力，对于普通钢筋应变率参数 p、C 的具体取值分别为 5、40，有效塑性应变 $\varepsilon_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{p}}=\int_0^t\left(\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^{\mathrm{p}}\dot{\varepsilon}_{ij}^{\mathrm{p}}\right)^{\frac{1}{2}}\mathrm{d}t$，$E_{\mathrm{p}}$ 为塑性硬化模量；β 为硬化系数，在[0,1]取值。

本文钢筋材料的密度为 7 850 kg/m^3，屈服强度为 300 MPa，弹性模量为 200 GPa，泊松比为 0.3。

混凝土材料选用 72R3(MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3)材料模型[22]，该模型考虑了混凝土的损伤效应、应变率效应和应变强化，能够有效模拟混凝土结构在爆炸及冲击荷载作用下的动力响应。

此模型中，混凝土的塑性性能可以通过 3 个剪切失效面来确定，它们分别为最大剪切失效面、初始屈服面及残余失效面。材料状态依靠静水压力在 3 个失效面之间转换[23]。这 3 个失效面的定义公式如下：

$$\Delta\sigma_{\mathrm{m}}=a_0+\frac{p}{a_1+a_2p},\quad \Delta\sigma_{\mathrm{y}}=a_{0\mathrm{y}}+\frac{p}{a_{1\mathrm{y}}+a_{2\mathrm{y}}},\quad \Delta\sigma_{\mathrm{r}}=\frac{p}{a_{1\mathrm{f}}+a_{2\mathrm{f}}p}$$

式中：$\Delta\sigma_{\mathrm{m}}$、$\Delta\sigma_{\mathrm{y}}$ 和 $\Delta\sigma_{\mathrm{r}}$ 分别为 3 个面各自的有效偏应力($\Delta\sigma=\sqrt{3J_2}$)，J_2 为应力偏量第二不变量，压力值 $p=-(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$；$a_0$、$a_1$、$a_2$、$a_{0\mathrm{y}}$、$a_{1\mathrm{y}}$、$a_{2\mathrm{y}}$、$a_{1\mathrm{f}}$、$a_{2\mathrm{f}}$ 这些材料常数通过无约束受压实验和三轴受压实验确定。本文混凝土材料的密度为 2 300 kg/m^3，抗压强度为 45 MPa，弹性模量为 31.5 GPa，泊松比为 0.19。

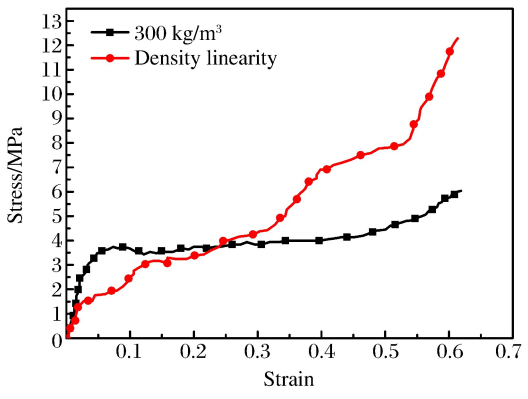


图 10　泡沫铝的应力应变曲线

Fig. 10　Stress-strain curves of aluminum foam

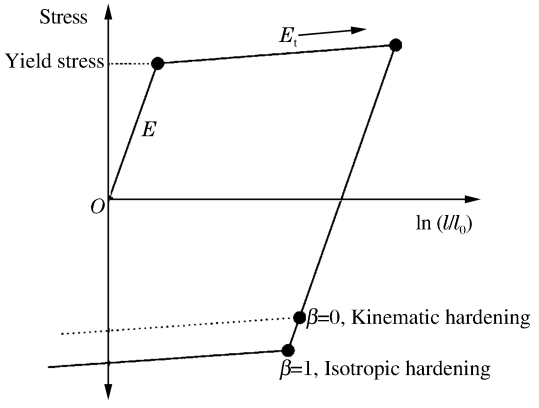


图 11　钢筋强化模型

Fig. 11　Hardening model of reinforcement

3　模型验证

图 12 为试件板 NF2 跨中位移时程曲线的实验结果与模拟结果。由图 12 可知，模拟曲线与实验曲线吻合较好，峰值位移的模拟值(18.82 cm)与实验值(18.70 cm)的相对误差仅为 0.6%。因此，本文所建立的有限元模型是较合理的。

在爆炸荷载作用下 RC 板跨中产生明显的弯曲裂缝，混凝土裂缝集中在跨中位置，且主裂缝周围有许多细小均匀裂缝产生，并向板两端分散。图 13 比较了实际试件与模拟结果的破坏形态。由图 13 可以看出，实验 RC 板的残余位移为12 cm，模拟 RC 板的残余位移为11.53 cm，且均在 RC 板跨中产生弯曲裂缝。模拟结果与试件破坏形态吻合较好，再次验证了本文所建模型的有效性。

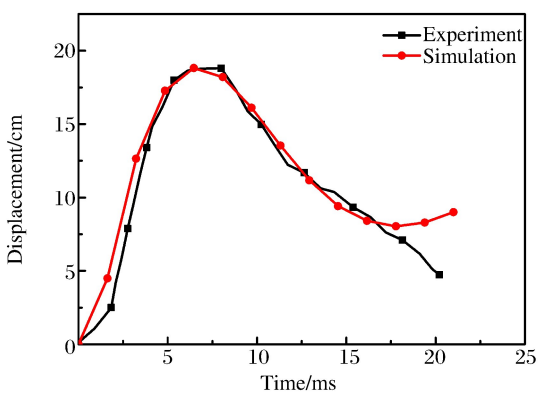


图 12　试件板 NF2 跨中位移时程曲线

Fig. 12　Mid-span displacement-time curves of specimen NF2

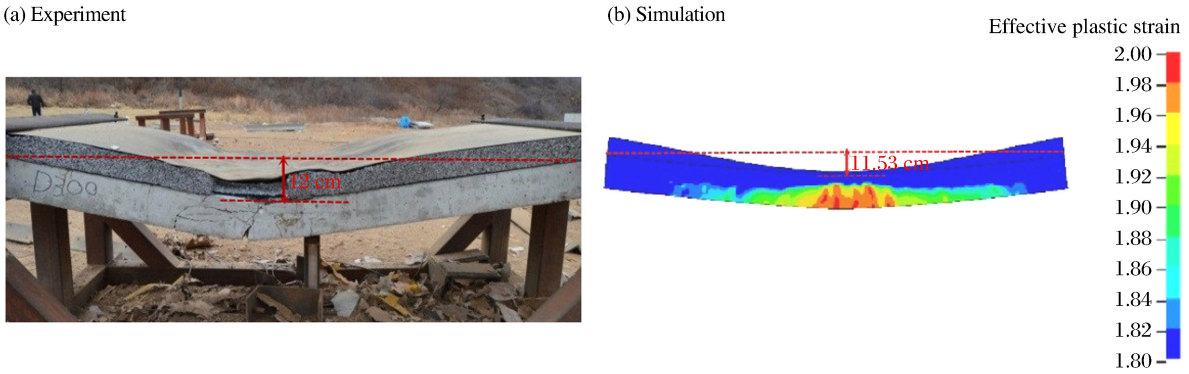


图 13　试件破坏形态

Fig. 13　Specimen failure modes

4　参数分析

4.1　有、无泡沫铝防护层的对比

图 14 为有、无泡沫铝防护层情况下 RC 板的跨中位移时程曲线。由图 14 可知：无泡沫铝防护层 RC 板的峰值位移为 33.43 cm，残余位移为 17.85 cm；有泡沫铝防护层 RC 板的峰值位移为 18.82 cm，残余位移为 11.53 cm。由此可知，设置泡沫铝防护层的 RC 板的峰值位移和残余位移明显减小，峰值位移减小 44%，残余位移减小 35%。图 15 为有、无泡沫铝防护层 RC 板的破坏形态。由图 15 可知：无泡沫铝防护层 RC 板的裂缝主要集中在跨中位置，裂缝明显不均匀且 RC 板的变形较大；在泡沫铝防护层的作用下，RC 板周围有许多细小均匀的裂缝产生，并由板的跨中向板的两端分散。这说明泡沫铝防护板能够有效地吸收并分散能量，使能量更均匀地作用在结构表面，从而达到减小爆炸荷载破坏作用的效果。因此，泡沫铝板防护层能够有效缓解 RC 板的爆炸效应。

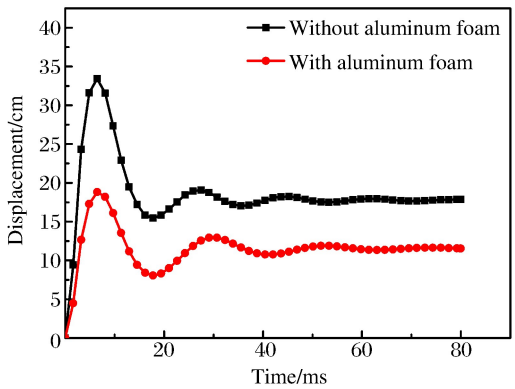


图 14　有无泡沫铝防护层情况下 RC 板的跨中位移时程曲线

Fig. 14　Mid-span displacement-time curves of RC slabs with or without aluminum foam protective layer

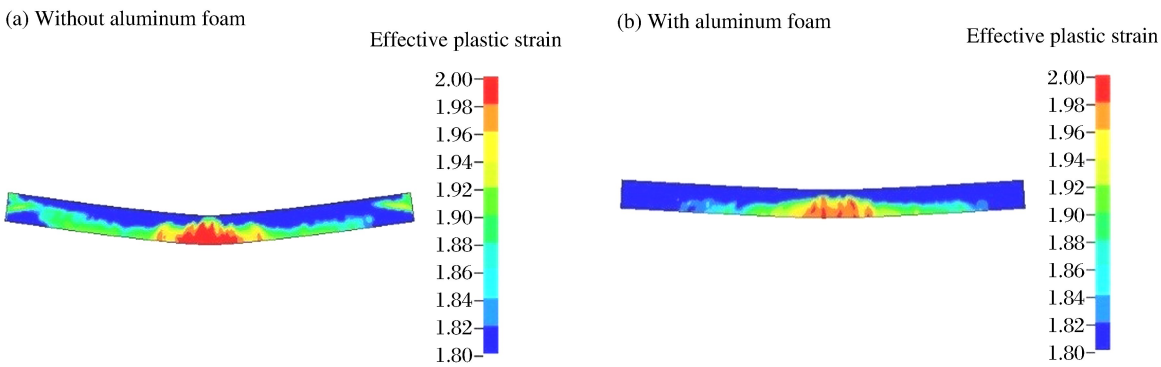


图 15　有、无泡沫铝防护层 RC 板的破坏形态对比

Fig. 15　Comparison of failure modes of RC slabs with or without aluminum foam protective layer

4.2　泡沫铝密度分层变化的影响

泡沫铝吸收冲击能的性能和抗爆性能与它的密度密切相关，田杰[18]发现低密度泡沫铝的冲击波衰减系数比高密度泡沫铝的小。密度梯度变化也会对泡沫铝防护 RC 板的动态响应造成影响。本文模拟中建立平均密度相同、密度分布不同的泡沫铝板对 RC 板进行抗爆防护的模型，泡沫铝板的密度分布情况见表 3。图 16 为不同密度分布的泡沫铝防护层 RC 板在爆炸荷载作用下 RC 板跨中竖向位移时程曲线的比较。由图 16 和表 3 可知，D1、D2、D3 这 3 种情况泡沫铝的平均密度一致，模型 D2 的峰值位移和残余位移分别比 D1 的减小了 6%和 9%，D3 的峰值位移和残余位移分别比 D1 的减小了 11%和 22%。虽然泡沫铝的平均密度越大可使 RC 板跨中变形越小，但是综合考虑泡沫铝造价和吸能性能，本文中采用平均密度均为 300 kg/m^{3}的泡沫铝进行研究。D4 和 D5 均为密度线性变化结构，D4 情况下 RC 板跨中峰值位移和残余位移分别比 D5 情况减小了 20%和 26%，这表明泡沫铝的密度线性变化对其吸能效果有一定的影响：泡沫铝板密度由下到上线性增大的情况相对于递减情况可以提高 RC 板的抗爆性。另外，模型 D6 的峰值位移和残余位移相对于 D2 的分别都仅减小 2%，模型 D7 的峰值位移和残余位移相对于 D2 的分别减小 5%和 8%，模型 D8 的峰值位移和残余位移相对于 D2 的分别减小 4%和 5%，可知 D6、D7、D8 情况表明密度无序变化相对于密度均匀的泡沫铝防护板的防护效果没有明显提高；而模型 D4 的峰值位移和残余位移分别比 D2 的减小 15%和 19%。综上可知，所有模型中模型 D4 的峰值位移最小，对爆炸载荷的防护效果最好。这说明泡沫铝密度由上到下递减结构可以提高泡沫铝的吸能性，减小结构构件的位移。此外，还可以看出底层采用较低密度泡沫铝材料时，由于其屈服强度小，吸收的能量多，因此爆炸荷载下 RC 板峰值位移小，其防护效果最好。出现上述现象的主要原因有以下几点：(1)如图 10 所示，由实验测得的密度为 300 kg/m^3 和密度为线性变化(由下到上线性增大)的泡沫铝应力应变曲线可知，受压时密度线性变化的泡沫铝虽初始屈服应力略小于密度均匀的泡沫铝，但随着泡沫铝不断被压实，密度线性变化的泡沫铝的应力仍会持续升高，吸收的能量远大于密度均匀的泡沫铝，因此密度线性变化泡沫铝防护层的 RC 板残余位移更小。(2)通过模拟可以看出泡沫铝均被压实了，由于泡沫铝密度越大，平台应力越大，能量吸收能力越强[24]，因此，泡沫铝板密度由下到上线性递增情况相较由下到上递减情况吸收的能量多，从而线性递增情况的 RC 板位移峰值较小。

表 3 泡沫铝板密度分布

Table 3 Density distributions of aluminum foam slabs

模型编号	泡沫铝密度分布	密度/(kg·m^{-3})				
		平均	第 1 层 (0～20 mm)	第 2 层 (20～40 mm)	第 3 层 (40～60 mm)	第 4 层 (40～60 mm)
D1	密度均匀	200				
D2		300				
D3		400				
D4	密度线性变化	300	225	275	325	375
D5		300	375	325	275	225
D6	密度无序变化	300	325	275	225	375
D7		300	275	225	325	375
D8		300	375	275	325	225

表 4 关键参数对比

Table 4 Comparison of key parameters

模型编号	位移峰值/cm	残余位移/cm	模型编号	位移峰值/cm	残余位移/cm
D1	20.09	12.69	D5	20.01	12.61
D2	18.82	11.53	D6	18.42	11.32
D3	17.81	9.88	D7	17.84	10.54
D4	16.02	9.31	D8	19.68	12.13

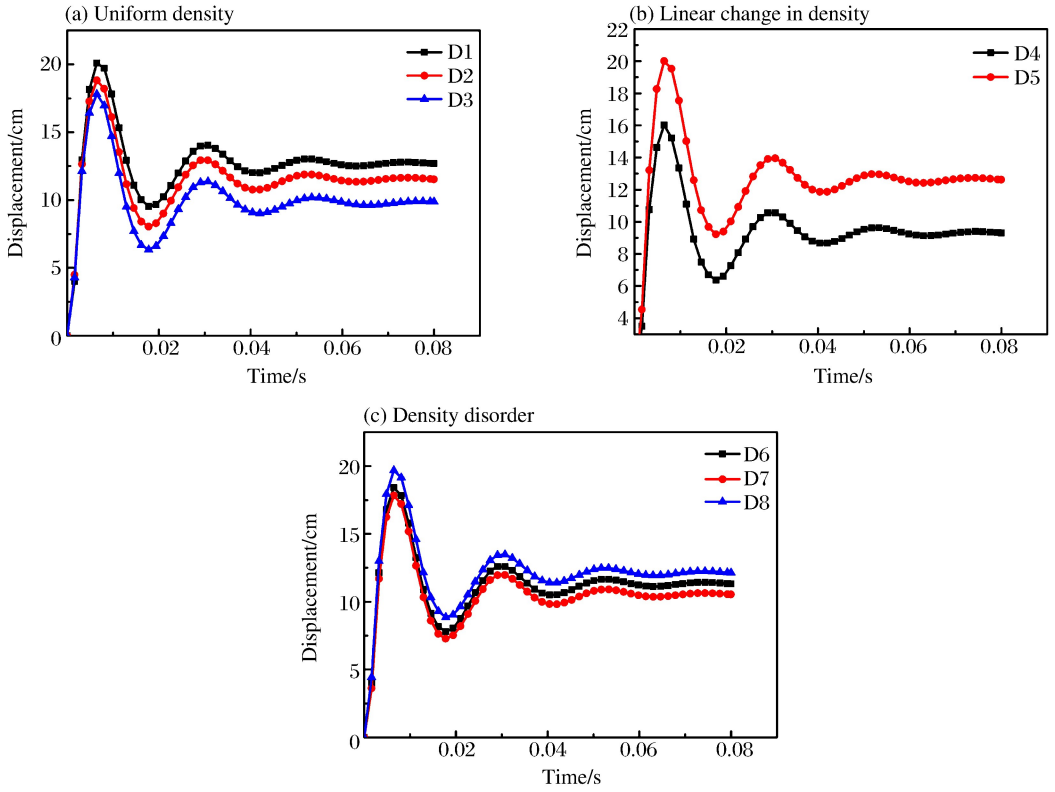


图 16　不同密度泡沫铝的 RC 板中竖向位移时程曲线

Fig. 16　Mid-span displacement-time curves of RC slabs with aluminum foam layers of different densities

4.3　配筋率的影响

保持其他参数不变，分别对纵向受拉钢筋配筋率(ρ)为 0.90%、1.35%和 1.86%的 3 个含 300 kg/m^3 泡沫铝防护层的 RC 板在同一爆炸荷载作用下的动力响应进行分析。图 17 为 3 个板在爆炸荷载作用完全时的塑性应变云图。由图 17 可知，随着配筋率的增大，板的损伤破坏逐渐减轻。图 18 为这 3 个板的跨中竖向位移时程曲线，表 5 给出了每个板的峰值位移和残余位移。由图 18 和表 5 可知，随着配筋率的增大，板的峰值位移和残余位移均减小。这说明增大配筋率可以提高含泡沫铝防护层 RC 板的抗爆性能。综上所述，增大配筋率可以降低 RC 板的损伤破坏程度，提高其抗爆能力。

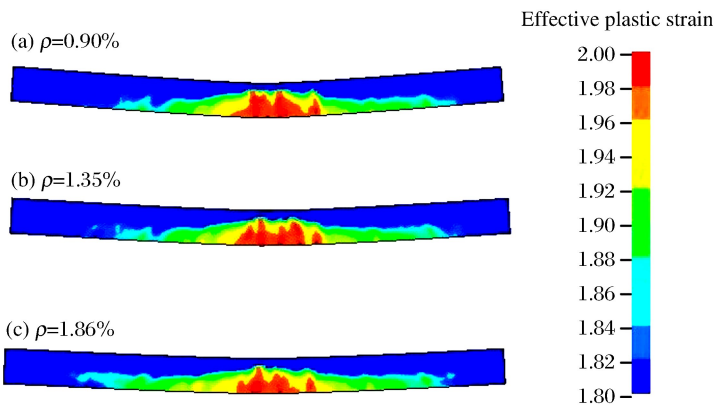


图 17　不同纵筋配筋率下 RC 板的塑性应变云图

Fig. 17　Plastic strain cloud diagrams of RC slabs at different longitudinal reinforcement ratios

表 5 关键参数对比

Table 5 Comparison of key parameters

配筋率/%	峰值位移/cm	残余位移/cm
0.90	20.64	13.97
1.35	18.82	11.53
1.86	17.30	9.40

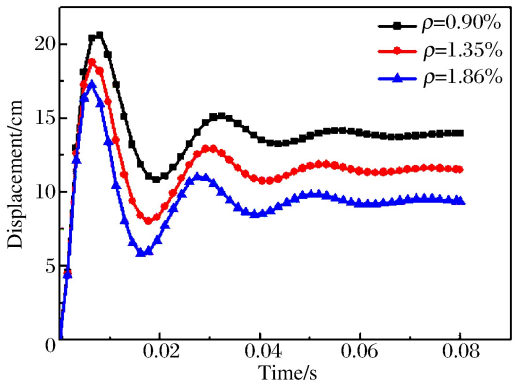


图 18 不同配筋率 RC 板跨中位移时程曲线

Fig. 18 Displacement-time curves of RC slabs with different reinforcement ratios

5 结　论

通过泡沫铝防护层 RC 板的抗爆性能实验和数值模拟分析得到如下结论：

(1)所建立的有限元模型能够有效分析泡沫铝防护 RC 板在爆炸荷载作用下的动态响应。含泡沫铝防护层的 RC 板破坏比无泡沫铝时均匀，泡沫铝材料的吸能性可以有效地降低爆炸荷载对 RC 板的破坏程度，如设置 300 kg/m^3 密度均质泡沫铝防护层使 RC 板峰值位移可减小 40%以上，还可减小 RC 板的动态响应，并有效降低 RC 板的破坏程度。因此可将泡沫铝材料贴至结构构件外表面，以提高建筑物的抗爆性能。

(2)泡沫铝板的平均密度相同时，泡沫铝防护板密度线性变化对其防护作用有一定影响，密度由下到上线性增大的泡沫铝板吸能效果比线性递减的泡沫铝板吸能效果好。由实验可知，泡沫铝密度线性递增情况下 RC 板的峰值位移较泡沫铝密度线性递减情况下减小 27%。

(3)泡沫铝板密度由下到上线性递增情况比密度均匀分布泡沫铝防护层的 RC 板抗爆防护效果好。由有限元分析可知，泡沫铝板密度由下到上线性递增的情况相较均匀分布情况，RC 板峰值位移减少 15%，残余位移下降 19%。

(4)目前可知泡沫铝板密度无序变化对整体吸能效果有一定影响，分析可知底层泡沫铝密度相对较小情况下抗爆防护效果较好，但整体变化规律还不得而知，因此能够高效提高防护性能的最优无序密度分布仍需要继续研究。

(5)增大配筋率可以减小泡沫铝防护 RC 板的峰值位移和残余位移，提高其抗爆性能。

目前为止，泡沫铝的高效制备工艺还不够成熟，由于造价较高，尚不能实现大规模工业应用，其中梯度泡沫铝结构中不同层泡沫铝之间如何有效粘结是重点需要解决的问题。

参考文献：

[1] ZHOU Hongyuan, WANG Xiaojuan, ZHAO Zhiye. High velocity impact mitigation with gradient cellular solids [J]. Composites Part B: Engineering, 2016,85:93-101. DOI:10.1016/j.compositesb.2015.09.042.

[2] 庞宝君，郑伟，陈勇. 基于 Taylor 实验及理论分析的泡沫铝动态冲击特性研究[J]. 振动与冲击，2013,32(12):154-158. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2013.12.030.

PANG Baojun, ZHENG Wei, CHEN Yong. Dynamic impact behavior of aluminum foam with a Taylor impact test and a theoretical analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(12):154-158. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2013.12.030.

[3] 康建功，石少卿，陈进. 泡沫铝衰减冲击波压力的理论分析[J]. 振动与冲击，2010,29(12):128-131;243. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2010.12.029.

KANG Jiangong, SHI Shaoqing, CHEN Jin. Analysis of cladding aluminum foam attenuating blasting pressure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(12):128-131;243. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2010.12.029.

[4] 李忠献，张茂轩，师燕超. 闭孔泡沫铝的动态压缩性能试验研究[J]. 振动与冲击，2017,36(5):1-6. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.001.

LI Zhongxian, ZHANG Maoxuan, SHI Yanchao. Tests for dynamic compressive performance of closed-cell aluminum foams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(5):1-6. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.001.

[5] 张健，赵桂平，卢天健. 梯度泡沫金属的冲击吸能特性[J]. 工程力学，2016，33(8)：211-220.
ZHANG Jian, ZHAO Guiping, LU Tianjian. Energy absorption behaviour of density-graded metallic foam under impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2016,33(8):211-220.

[6] 倪小军，马宏昊，沈兆武，等. 泡沫铝爆炸冲击特性的数值研究[J]. 爆炸与冲击，2013，33(2)：120-125. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.02.002.
NI Xiaojun, MA Honghao, SHEN Zhaowu, et al. Numerical study on impact properties of Al foam under explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(2):120-125. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.02.002.

[7] 王永刚，胡时胜，王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(6)：516-522. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2003.06.006.
WANG Yonggang, HU Shisheng, WANG Lili. Shock attenuation in aluminum foams under explosion loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):516-522. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2003.06.006.

[8] 边小华，石少卿，康建功，等. 泡沫铝对坑道口部爆炸冲击波的衰减特性初步研究[J]. 四川建筑科学研究，2006，32(6)：31-33. DOI:10.3969/j.issn.1008-1933.2006.06.009.
BIAN Xiaohua, SHI Shaoqing, KANG Jiangong, et al. Research on attenuation characteristic of tunnel exit's blast wave in aluminum foam[J]. Sichuan Building Science, 2006,32(6):31-33. DOI:10.3969/j.issn.1008-1933.2006.06.009.

[9] 袁林，龚顺风，金良伟. 含泡沫铝防护层钢筋混凝土板的抗爆性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版)，2009，43(2)：376-379.
YUAN Lin, GONG Shunfeng, JIN Liangwei. Investigation on anti-explosion performance of reinforced concrete slab with composite protective aluminum foam[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009,43(2):376-379.

[10] 王曦浩，夏志成，孔新立，等. 钢板夹泡沫铝组合板抗接触爆炸性能研究[J]. 振动与冲击，2017，36(13)：86-91. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.13.013.
WANG Xihao, XIA Zhicheng, Kong Xinli, et al. Anti-contact blast performance of steel-aluminum foam-steel sandwich panels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(13):86-91. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.13.013.

[11] DONG Yongxiang, FENG Shunshan, XIA Changjing, et al. Dynamic behaviour of concrete sandwich panel under blast loading[J]. Defence Science Journal, 2009,59(1):22-29. DOI:10.14429/dsj.59.1480.

[12] LI Shiqiang, LI Xin, WANG Zhihua, et al. Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016,80:1-12. DOI:10.1016/j.compositesa.2015.09.025.

[13] ZHANG Jinhua, ZHANG Yadong, FAN Junyu, et al. Mesoscopic investigation of layered graded metallic foams under dynamic compaction[J]. Advances in Structural Engineering, 2018(10):11-18.

[14] FANG Qin, ZHANG Jinhua, ZHANG Yadong, et al. Mesoscopic investigation of closed-cell aluminum foams on energy absorption capability under impact[J]. Composite Structures, 2015,124:409-420. DOI:10.1016/j.compstruct.2015.01.001.

[15] KARAGIOZOVA D, ALVES M. Stress waves in layered cellular materials: dynamic compaction under axial impact[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015,101/102:196-213. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2015.07.024.

[16] 顾文彬，徐景林，刘建青，等. 多层泡沫铝夹芯板的抗爆性能[J]. 含能材料，2017，25(3)：240-247. DOI:10.11943./j.issn.1006-9941.2017.03.011.
GU Wenbin, XU Jinglin, Liu Jianqing, et al. Blast-resistance performances of multilayers aluminum foam sandwich panels[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017,25(3):240-247. DOI:10.11943./j.issn.1006-9941.2017.03.011.

[17] JAMES C, PAUL A, JOSEPH E, et al. Structures to resist the effect of accidental explosions: UFC-3-340-02

[S]. US Department of the Army, 2008:240. DOI:10.1061/41171(401)127.

[18] 田杰.泡沫铝的冲击波衰减和抗爆震特性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2006:103-121. DOI:10.7666/d.y919001.

[19] 赵方成.应用 LS-DYNA 对钢筋混凝土柱破坏的仿真[D].兰州:兰州理工大学,2009.:33-40. DOI:10.7666/d.Y1464296.

[20] 苏子星,何继业.基于 Cowper-Symonds 方程的相似理论修正方法[J].爆炸与冲击,2018,38(3):654-658. DOI:10.11883/bzycj-2016-0308.
SU Zixing, HE Jiye. Modified method for scaling law based on Cowper-Symonds equation[J]. Explosion and Shock Waves, 2018,38(03):654-658. DOI:10.11883/bzycj-2016-0308.

[21] JONES N. Structural impact[M]. New York: Cambridge University Press, 1997:93-107.

[22] 邓昭金.钢筋混凝土防爆墙的抗爆性能数值分析[D].长沙:湖南大学,2012:45-50.

[23] 李晓琴,陈建飞,陆勇.K&C 局部损伤混凝土材料模型在精细有限元模拟中的应用[J].云南大学学报(自然科学版),2015,37(4):541-547.
LI Xiaoqin, CHEN Jianfei, LU Yong. Numerical applications of K&C concrete damage model in meso-scale finite element modelling[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences), 2015,37(4):541-547.

[24] 杜金晶,王斌,曹卓坤,等.镀铜碳纤维增强铝基泡沫材料准静态压缩力学性能及吸能特性[J].有色金属工程,2016,6(3):1-4. DOI:10.3969/j.issn.2095-1744.2016.03.001.
DU Jinjing, WANG Bin, CAO Zhuokun, et al. Quasi-static compressive mechanical properties and energy absorption characteristics of Al-based foam reinforced by copper-coated carbon fibers[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016,6(3):1-4. DOI:10.3969/j.issn.2095-1744.2016.03.001.

Blast-resistant performance of aluminum foam-protected reinforced concrete slabs

GAO Haiying[1], LIU Zhongxian[1], YANG Yekai[2], WU Chengqing[3], GENG Jiaying[1]

(1. *Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement*, *Tianjin Chengjian University*, *Tianjin* 300384, *China*;
2. *School of Civil Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*;
3. *University of Technology Sydney*, *Sydney* 2007, *Australia*)

Abstract: n order to study the blast-resistant protective effect of the aluminum foam slab as porous energy absorbing material on the engineering structure, using an outdoor explosion test, the dynamic response and failure modes of reinforced concrete (RC) slabs with different aluminum foam protective layers under blast loading were studied, and the finite element model was established by using the LS-DYNA software. Through comparison with the test, the feasibility of the model was verified. The dynamic responses of RC slabs with or without aluminum foam protective layers were compared and analyzed, and the effects of aluminum foam density gradient distribution and longitudinal reinforcement ratio were analyzed. The results show that the finite element model can accurately describe the dynamic response of RC slabs with aluminum foam protective layers. Aluminum foam protective layers can effectively reduce the deflection of reinforced concrete slabs and reduce the damage of specimens. The aluminum foam density increases from bottom to top, which has the best blast-resistant performance on RC slabs. Moreover, increasing the reinforcement ratio can improve the blast-resistant performance of aluminum foam-protected RC slabs.

Keywords: aluminum foam; reinforced concrete slab; blast loading; blast-resistant performance; density gradient　　(责任编辑　张凌云)