

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0463

主体结构荷载可控的新型组合式防护结构(II): 影响因素及设计理念*

方 秦¹, 高 矗^{1,2}, 孔祥振¹, 杨 亚¹

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 内蒙古财经大学财政税务学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要: 为明确泡沫混凝土厚度和强度对组合式防护结构抗爆性能的影响, 充分发挥和合理利用泡沫混凝土良好的消波特性, 首先通过试验及数值模拟探讨不同泡沫混凝土厚度和强度对组合式防护结构抗爆性能的影响, 并分析分层梯度泡沫混凝土在爆炸波作用下的消波特性。然后将组合式防护结构与采用中粗砂为分配层的传统成层式结构进行对比分析验证其优越性, 在此基础上, 总结凝练出组合式防护结构的主体结构荷载可控的设计理念。结果表明, 利用泡沫混凝土材料较长的屈服平台和较低的波阻抗, 以泡沫混凝土作为能量调控层, 通过设计泡沫混凝土强度等级(密度等级)和厚度以及采用多层梯度泡沫混凝土, 可使得作用于主体结构上的爆炸荷载峰值恰为泡沫混凝土屈服强度, 实现对主体结构上荷载的可控设计, 有效解决了中粗砂为分配层的传统成层式结构不易控制作用于主体结构上荷载的问题。研究结果可为抗新型钻地弹的防护设计提供重要参考。

关键词: 泡沫混凝土; 组合式防护结构; 可控设计; 爆炸波; 消波

中图分类号: O382

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

A new composite protective structure based on controllability of blast load on structure layer (II): influence factors and design concept

FANG Qin¹, GAO Chu^{1,2}, KONG Xiangzhen¹, YANG Ya¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. School of Public Finance and Taxation, Inner Mongolia University of Finance and Economics,

Hohhot 010070, Inner Mongolia, China)

Abstract: The experimental and numerical investigation was carried out to clarify the influence of thickness and strength of foam concrete layer on blast resistance of the new composite protective structure. And the multilayer graded foam concrete was applied to adequately and rationally use the good wave dissipation performance of foam concrete. Then the advantage of new composite protective structure is verified by the comparison with the traditional layered structure with medium/coarse sand as the distribution layer. Finally, the design concept of composite protective structure based on controllability of blast load on structure layer is summarized. The foam concrete can be used as energy control layer of composite protective structure, which is mainly due to its long yield plateau and low wave impedance. The blast load acting on the structure layer can be exactly equal to the yield strength of foam concrete by choosing the appropriate thickness and strength (density) of foam concrete layer, as well as the use of the multilayer graded foam concrete. Based on the controllable design concept of blast load on structure layer in the new composite protective structure, the defects of traditional layered protective structure with

* 收稿日期: 2023-12-23; 修回日期: 2024-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(52178515)

第一作者: 方 秦(1962—), 男, 教授, fangqinjs@139.com

通信作者: 孔祥振(1988—), 男, 副教授, ouckxz@163.com

medium/coarse sand as the distribution layer can be solved thoroughly, all of which can provide important reference for design of protective structure against new earth penetration weapons.

Keywords: foam concrete; composite protective structure; controllable design; blast load; wave dissipation

组合式防护结构的抗爆性能与泡沫混凝土层密切相关, 泡沫混凝土层与高强混凝土遮弹层形成强波阻抗失配关系, 通过“调控”爆炸能量的分配, 使得爆炸能量大部分耗散在遮弹层中, 大幅减少经泡沫混凝土层到达主体结构上的荷载和能量^[1]。根据文献 [1] 中爆炸波在组合式防护结构中的传播衰减规律(图 1), 由遮弹层透射进入泡沫混凝土层的爆炸波仅使得端部 0~0.08 m 范围内的泡沫混凝土产生塑性变形, 其余范围均处于弹性状态, 泡沫混凝土的消波特性未得到充分发挥。泡沫混凝土具有较长的屈服平台, 密实应变远大于屈服应变, 当泡沫混凝土的应变峰值未达到密实应变时, 泡沫混凝土中爆炸荷载峰值不超过平台应力(即屈服应力)。为充分发挥泡沫混凝土自身良好的消波特性, 有必要探讨泡沫混凝土层厚度对组合式防护结构抗爆性能的影响, 从而为合理确定泡沫混凝土层厚度提供依据。

另外值得关注的一点是泡沫混凝土强度的影响, 注意到新型组合式防护结构不仅适用于地下坑道等小跨度结构, 亦适用于飞机洞库、地下指挥所等大跨度结构^[2]。对于小跨度结构, 在爆炸波作用下通常按照局部破坏作用设计, 并以主体结构层内表面不发生震塌为原则确定厚度^[3]。对于地下浅埋的大跨度结构, 往往要求其能够同时抵抗爆炸应力波的局部破坏作用和整体破坏作用, 整体破坏与结构的跨度、截面尺寸、材料性能等特征均有关^[4]。一定厚度的泡沫混凝土层可使得作用于主体结构层的爆炸荷载峰值不超过泡沫混凝土材料的屈服应力^[1]。对于组合式防护结构而言, 同等条件下小跨度结构抗力通常高于大跨结构, 此时可选取强度标号相对较高(屈服应力较大)的泡沫混凝土, 而对于大跨结构, 可选取强度标号较低的泡沫混凝土从而避免主体结构层发生整体破坏。

已有研究表明^[5-7], 与均匀密度材料相比, 梯度多孔材料(如泡沫金属、泡沫聚合物和泡沫陶瓷等)在冲击爆炸荷载下具有更好的力学性能。Wang 等^[8]和 Gardner 等^[9]通过试验研究了梯度泡沫金属夹芯梁的力学性能, 发现由于层间不连续性的削弱作用, 随着芯层层数的增加, 结构的抗冲击性能逐渐增加。Gupta 等^[10]针对分层梯度泡沫材料的压缩性能开展了试验研究, 发现在一定的压缩范围内, 用多层不同密度泡沫铝代替单层结构可以显著提高能量吸收性能。Zeng 等^[11]通过试验与数值模拟研究了层状梯度空心金属球的冲击响应, 研究表明合理的密度分布可有效地增大能量吸收能力, 并显著降低透射波的强度。可以看出, 冲击和爆炸等强动载作用下, 已有研究相对较多关注分层梯度延性泡沫金属材料(如泡沫铝)的能量吸收性能, 对分层梯度脆性泡沫混凝土材料的消波特性关注相对较少, 而泡沫混凝土力学性能与延性泡沫金属材料存在明显区别。

郝逸飞等^[12]研发的粉煤灰-矿渣碱激发泡沫混凝土, 以固废基微粉、碱激发剂、水和发泡剂为原料, 生产过程不使用水泥, 所需原材料种类少, 制备工艺简单, 充分考虑泡沫在混合浆体中的受力, 有效抑制气泡合并上浮趋势, 在提高材料的强度的同时可明显减少塌模和干缩等现象。碱激发泡沫混凝土密度等级在 200~1 200 kg/m³之间, 强度等级在 0.5~40 MPa 之间, 密度与强度之间呈一一对应的关系, 现场通过调试发泡速率与泵送速率, 可控制碱激发泡沫混凝土的密度等级, 从而控制碱激发泡沫混凝土的强度等级。利用碱激发泡沫混凝土施工方便且性能可控的特点, 可为研究泡沫混凝土厚度、强度以及

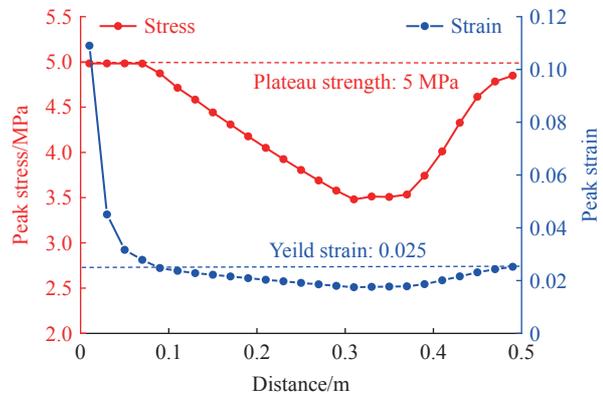


图 1 0.5 m 厚泡沫混凝土层沿中心轴线方向的爆炸波应力、应变峰值分布情况^[1]

Fig. 1 Peak stress and peak strain along the central axis of foam concrete layer with a thickness of 0.5 m^[1]

分层梯度泡沫混凝土对组合式防护结构抗爆性能的影响提供条件。

基于此,本文中通过试验及数值模拟研究泡沫混凝土层厚度和强度等因素对组合式防护结构抗爆性能的影响,并分析分层梯度泡沫混凝土在爆炸波作用下的消波特性。在此基础上,将组合式防护结构与采用中粗砂为分配层的传统成层式结构进行对比分析验证其优越性,最后提炼总结出组合式防护结构的主体结构荷载可控的设计理念。

1 泡沫混凝土层厚度的影响规律

文献 [1] 中当 C5 泡沫混凝土层厚度为 0.5 m 时,作用在主体结构层的爆炸荷载峰值为 4.73 MPa,而泡沫混凝土层远端(0.49 m 处)应变峰值尚未达到屈服应变 0.025^[1],泡沫混凝土的消波特性尚未得到充分发挥。因此,有必要探讨泡沫混凝土层厚度对组合式防护结构抗爆性能的影响。为分析不同厚度泡沫混凝土层的消波耗能特性,特设置 0.5、0.3 和 0.2 m 等 3 种不同厚度 C5 泡沫混凝土层进行数值模拟。需要强调的是,除改变 C5 泡沫混凝土层厚度(从 0.5 m 分别改为 0.3 和 0.2 m)以外,数值模型几何尺寸、边界条件和材料模型等与文献 [1] 中组合式防护结构预制孔装药爆炸数值模型完全相同,如图 2 所示,从上到下各层依次编号为 1~3,层 1 和层 2 界面、层 2 和层 3 界面依次编号 A 和 B。

图 3(a) 给出厚 0.3 m 的泡沫混凝土层沿中心轴线方向的应力和应变峰值分布。可以看出在 0.15~0.30 m 范围内应力峰值和应变峰值出现反射增强现象,其中在 0.22~0.30 m 范围内应力峰值与 C5 泡沫混凝土的屈服应力相当;注意到泡沫混凝土层远端(0.29 m 处)应变峰值为 0.039,远低于 C5 泡沫混凝土的密实应变 0.236^[1],即仍可以降低泡沫混凝土层厚度使得作用于主体结构上应力峰值不增加。图 3(b) 给出 0.2 m 厚泡沫混凝土层沿中心轴线方向的应力和应变峰值分布。此时各处泡沫混凝土均处于屈服状态(应变峰值大于屈服应变 0.025),应力峰

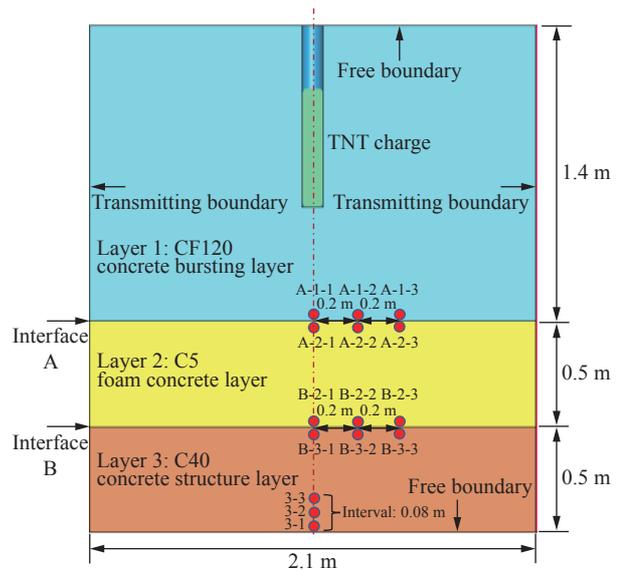


图 2 组合式防护结构数值模型及测点布置示意图^[1]
Fig. 2 Numerical model of composite protective structure subjected to explosion and locations of the gauge^[1]

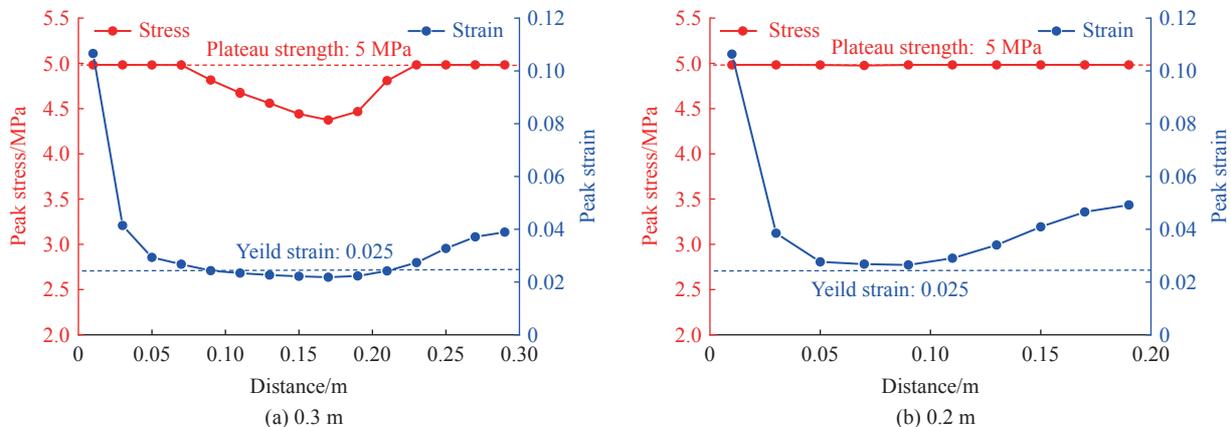


图 3 爆炸波在不同厚度泡沫混凝土层中的传播衰减
Fig. 3 Propagation of blast waves in foam concrete layers with different thicknesses

值均与屈服应力 5 MPa 相当; 在 0.07~0.20 m 范围内泡沫混凝土出现反射增强现象, 泡沫混凝土层远端(0.19 m 处)应变峰值为 0.05, 仍低于 C5 泡沫混凝土的密实应变。

图 4 给出 3 种不同泡沫混凝土层厚度(0.5、0.3 和 0.2 m)时主体结构层上表面中心位置(图 2 中测点 B-3-1)的应力时程曲线, 可以看出 0.2 和 0.3 m 厚对应的应力峰值与泡沫混凝土屈服应力相当, 而 0.5 m 厚时略小于屈服应力。若继续减小泡沫混凝土层厚度, 由于反射增强现象可能会使得下端泡沫混凝土进入密实阶段, 从而使得作用于主体结构上荷载出现荷载增强效应, 即经过泡沫混凝土层传递至主体结构层的荷载超过初始荷载, 该现象已在一维波在泡沫混凝土中的传播试验中得到证实^[13]。也即泡沫混凝土层存在一个临界厚度, 使得作用于主体结构层的爆炸荷载峰值不超过泡沫混凝土材料的屈服应力, 该临界厚度已在文献 [16] 中进行细致讨论分析并给出临界厚度计算方法。

2 泡沫混凝土强度的影响规律

由前文分析可知, 一定厚度的泡沫混凝土可使得作用于主体结构层的爆炸荷载峰值不超过泡沫混凝土材料的屈服应力。通常而言, 不同跨度的防护结构抗爆炸荷载能力不同, 同等条件下小跨度结构抗力通常高于大跨结构, 根据跨度大小选取与之相匹配的泡沫混凝土强度等级, 可在确保组合式防护结构具有良好抗爆性能的同时优化组合式防护结构的整体厚度。

关于泡沫混凝土强度对组合式防护结构抗爆性能的影响。首先根据《泡沫混凝土规范》(JG/T266-2011)^[14], 制备工程中常用的 C1、C3、C5 和 C10 等 4 种强度等级泡沫混凝土(配合比见表 1)开展组合式防护结构预制孔装药爆炸试验(试验基本情况见文献 [1]), 然后利用数值模拟详细研究泡沫混凝土强度对组合式防护结构抗爆性能的影响规律。

表 1 泡沫混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of foam concrete

强度等级	设计密度/(kg·m ⁻³)	粉煤灰/(kg·m ⁻³)	矿渣/(kg·m ⁻³)	硅酸钠溶液/(kg·m ⁻³)	氢氧化钠固体/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	泡沫/(L·m ⁻³)
C1	500	202	202	188	14	72	600
C3	900	362	362	339	25	133	406
C5	1200	484	484	452	33	182	108
C10	1400	564	564	528	38	213	65

2.1 爆炸试验

为探讨泡沫混凝土强度对组合式防护结构抗爆性能的影响规律, 除文献 [1] 中采用的 0.5m 厚 C5 泡沫混凝土层外, 分别采用 0.5 m 厚的 C1、C3 和 C10 泡沫混凝土层开展组合式防护结构预制孔装药爆炸试验。试验基本情况与文献 [1] 相同, 仅改变泡沫混凝土强度, 在此不赘述。

图 5 给出爆炸试验后不同靶体的损伤破坏情况, 可以看出, 对于遮弹层的损伤破坏, 除 C3 泡沫混凝土靶体(以下简称 C3 靶体, 见图 5(b))外, C1、C5 和 C10 靶体遮弹层的损伤破坏均可分为 4 个区域, 即顶部成坑区、装药附近破碎区、底部震塌区和侧面径向裂缝区。对于 C3 靶体, 其遮弹层的损伤破坏程度

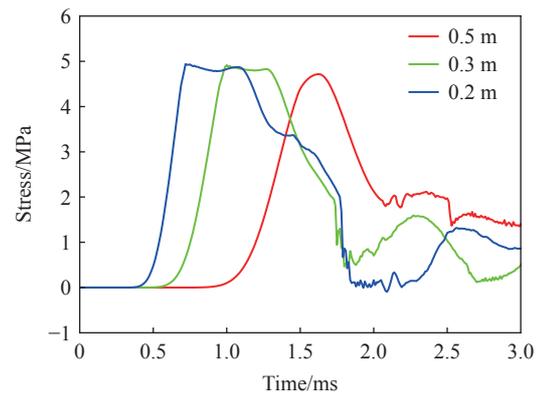


图 4 不同厚度泡沫混凝土层时主体结构层测点的应力时程曲线

Fig. 4 Stress-time histories of gauges in structural layer with different thicknesses of foam concrete layer

明显偏小, 结合试验中高速摄像采集的炸药爆轰图像可以判定其主要由 TNT 药柱铸药质量较差导致 TNT 有效当量不足引起。

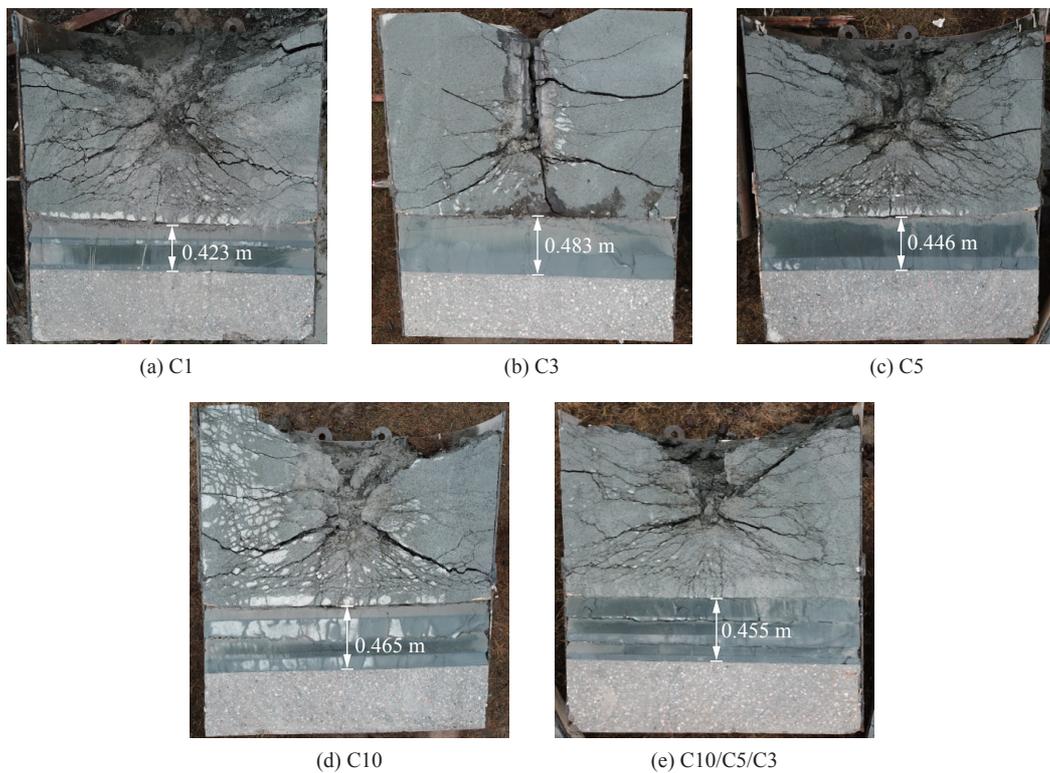


图 5 试验后不同靶体损伤破坏情况的剖面图

Fig. 5 Sectional view of post-test failure in composite protective structures with different foam concrete layers

爆炸试验后 4 种强度的泡沫混凝土层中均出现少量竖向裂纹; 泡沫混凝土层厚度较试验前 (0.5 m) 均有所降低, 试验后经测量 C1、C3、C5 和 C10 泡沫混凝土层沿中心轴线方向的厚度分别为 0.423、0.483、0.446 和 0.465 m, 即在爆炸波作用下泡沫混凝土层出现塑性变形, 且同等厚度下泡沫混凝土强度等级越低塑性变形越大 (C3 靶体除外); 4 种类型靶体的主体结构层均完好无损, 由此说明, 具有一定厚度的强度等级为 C1、C3、C5 和 C10 的泡沫混凝土层均能有效削弱爆炸波, 避免主体结构层发生损伤破坏。

为得到爆炸波在组合式防护结构中的传播衰减规律, 在 4 种靶体的主体结构层上表面中心位置均预埋 PVDF 应力传感器。图 6 给出了实测的 C3 和 C5 靶体对应测点的应力时程曲线, 可以看出应力峰

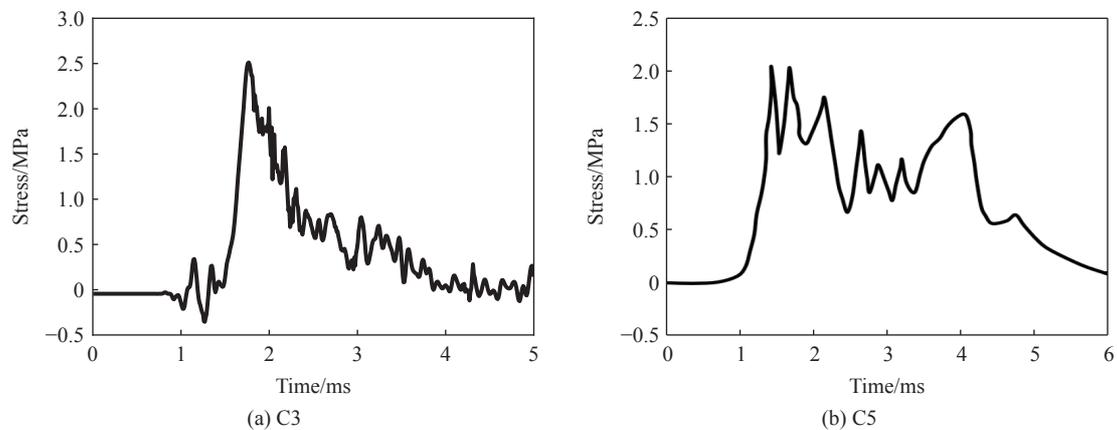


图 6 主体结构层上表面中心位置测点实测应力时程曲线

Fig. 6 Tested stress-time histories of gauges at the upper surface of the structure layer

值分别为 2.6 和 2.1 MPa。由此说明, 一定厚度的不同强度泡沫混凝土层能够有效衰减弹药爆炸产生的爆炸荷载, 且作用于主体结构上爆炸荷载峰值不超过对应强度泡沫混凝土的屈服平台。

2.2 数值模拟

由第 2.1 节中的试验结果可知, 具有一定厚度的不同强度泡沫混凝土层均能够有效衰减弹药产生的爆炸荷载, 避免主体结构层发生损伤破坏。然而, 仅利用有限的试验数据, 尚不能明确泡沫混凝土强度对组合式防护结构抗爆性能的影响规律, 基于此, 本节开展泡沫混凝土强度对组合式防护结构抗爆性能影响的数值模拟研究。为研究强度等级为 C1、C3、C5 和 C10 的泡沫混凝土层对组合式防护结构抗爆性能的影响规律, 建立了组合式防护结构预制孔装药爆炸数值模型, 模型与图 2 所示相同, 仅改变泡沫混凝土层厚度(由 0.5 m 改为 0.3 m)和强度等级(C1、C3、C5 和 C10)。

图 7 给出了数值模拟预测的不同靶体遮弹层损伤云图, 可以看出不同泡沫混凝土强度下遮弹层损伤破坏仅在底部震塌区存在差异, 且泡沫混凝土强度越低, 遮弹层底部震塌破坏区域越大, 该现象与图 5 中试验得到的遮弹层底部震塌区损伤破坏情况基本相符(C3 靶体除外)。这是由于泡沫混凝土层的存在使爆炸波在遮弹层和泡沫混凝土层的界面处反射拉伸波, 进而使爆炸能量向上部遮弹层转移造成震塌破坏; 且强度等级越低的泡沫混凝土与高强混凝土遮弹层的波阻抗失配程度越高, 从而使更多的爆炸能量随反射拉伸波转移至遮弹层, 从而造成遮弹层底部更大程度的震塌破坏。

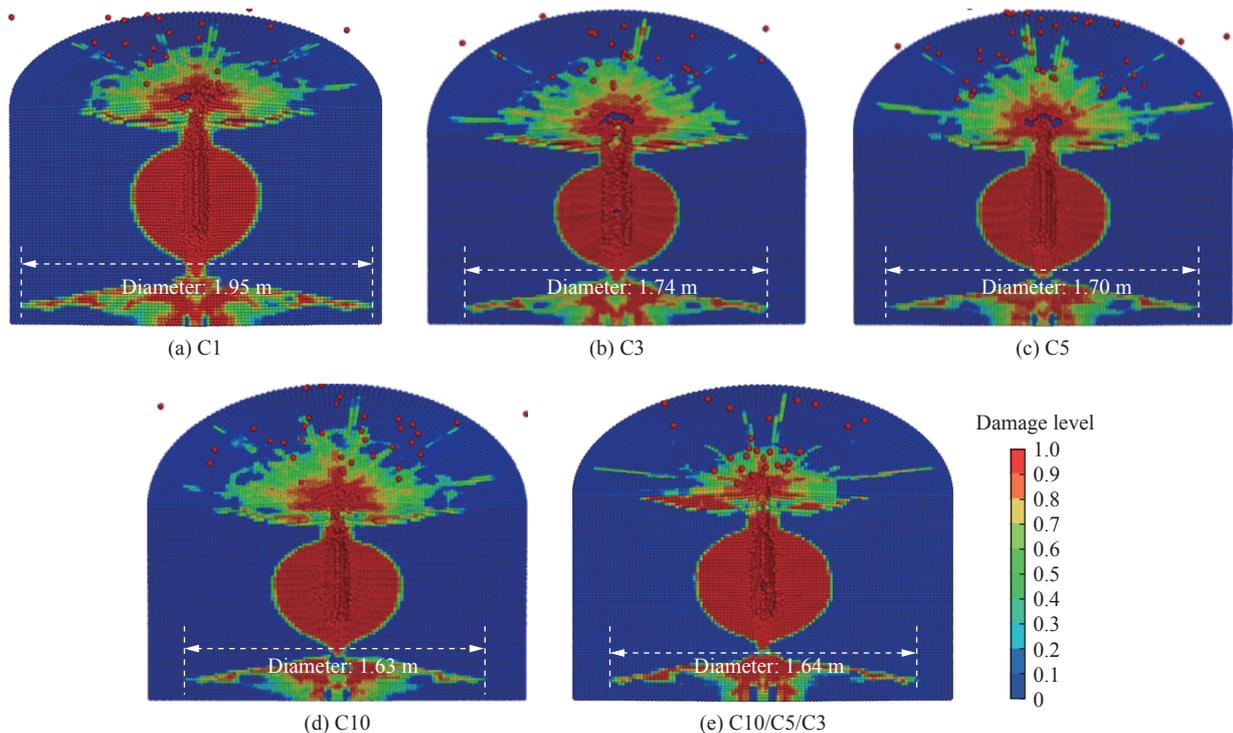


图 7 不同靶体的遮弹层损伤云图

Fig. 7 Numerically predicted damage of concrete shelter in composite protective structures

图 8 给出不同类型靶体主体结构层上表面中心位置测点(图 2 中 B-3-1 测点)的应力时程曲线。可以看出, 应力峰值均不超过泡沫混凝土材料的屈服应力, 对于 C1、C3 和 C5 靶体, 测点应力峰值与其屈服应力相当, 而 C10 靶体低于屈服应力, 为 9.1 MPa。由此进一步说明, 一定厚度的不同强度泡沫混凝土层均能将作用在主体结构上的荷载峰值衰减至不超过泡沫混凝土的屈服平台, 且可通过调整泡沫混凝土强度等级来实现对主体结构上荷载的可控设计。

为探讨爆炸波在不同强度泡沫混凝土中的传播衰减规律, 图 9 分别给出 0.3 m 厚不同强度泡沫混凝土层沿中心轴线方向的应力、应变峰值分布情况。

由图 9(a) 可以看出, C1 泡沫混凝土内各测点的应变峰值均超过屈服应变 0.028, 应力峰值均为 C1 泡沫混凝土的屈服应力 1 MPa^[1]; 在 0.13~0.3 m 范围内应变峰值出现反射增强, 泡沫混凝土远端(0.29 m 处)应变峰值为 0.060, 远低于 C1 泡沫混凝土的密实应变 0.552^[1]。

由图 9(b) 可以看出, 在 0.09~0.21 m 范围内泡沫混凝土的应力峰值和应变峰值均未达到 C3 泡沫混凝土的屈服应力 3 MPa 和屈服应变 0.026^[1], 即该范围内的泡沫混凝土处于弹性状态; 而在 0.17~0.3 m 范围内应变峰值出现反射增强, 泡沫混凝土的远端应变峰值为 0.044, 远低于 C3 泡沫混凝土的密实应变 0.373^[1]。

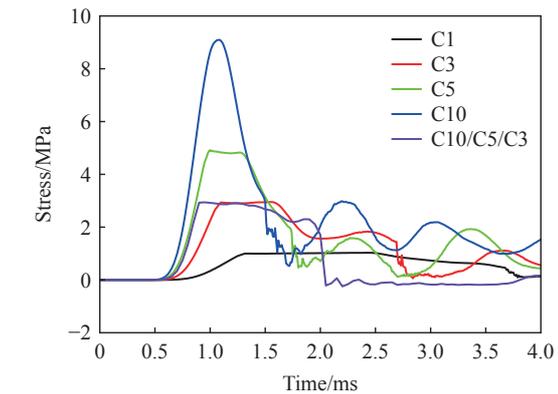
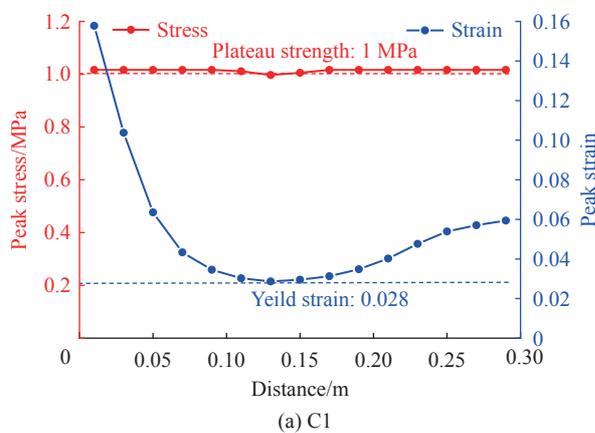


图 8 数值模拟预测的不同靶体 B-3-1 测点的应力历程曲线
Fig. 8 Numerically predicted stress-time histories of Gauge B-3-1 in composite protective structures

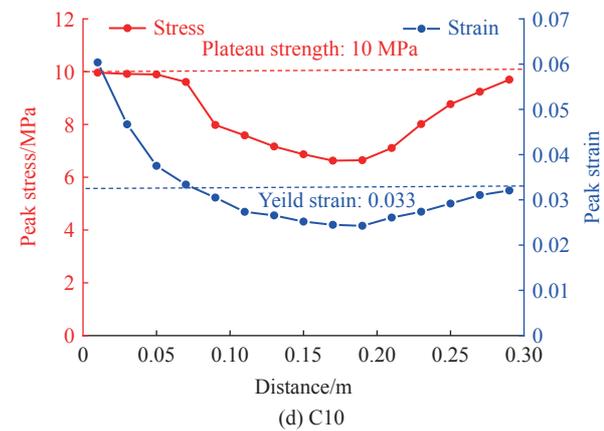
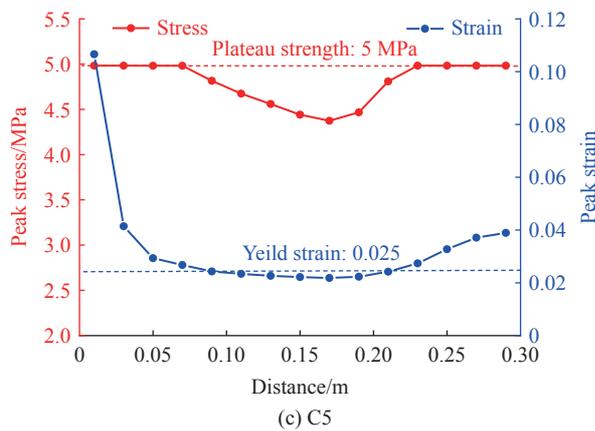
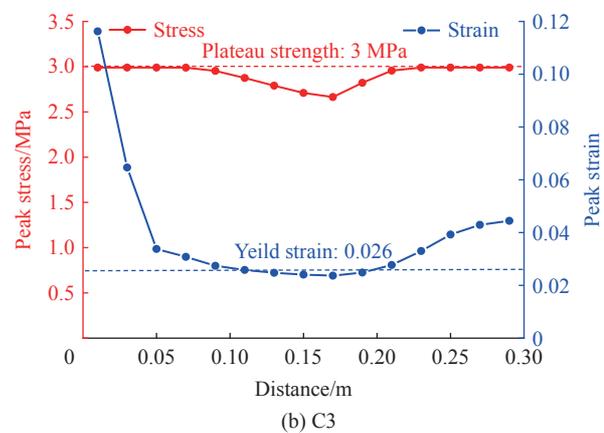


图 9 爆炸波在不同强度的泡沫混凝土层中的传播衰减

Fig. 9 Propagation of blast wave in foam concrete layer with different strengths

由图 9(c) 可以看出, 在 0.09~0.23 m 范围内泡沫混凝土的应力峰值和应变峰值均未达到 C5 泡沫混凝土的屈服应力 5 MPa 和屈服应变 0.025^[1]; 而在 0.17~0.3 m 范围内应变峰值出现反射增强, 泡沫混凝土的远端应变峰值为 0.039, 远低于 C5 泡沫混凝土的密实应变 0.256^[1]。

由图 9(d) 可以看出, 在 0.05~0.3 m 范围内泡沫混凝土的应力峰值和应变峰值均未达到 C10 泡沫混凝土的屈服应力 10 MPa 和屈服应变 0.033^[1]; 而在 0.19~0.3 m 范围内应变峰值出现反射增强, 泡沫混凝土

土远端应变峰值为 0.032, 低于 C10 泡沫混凝土的屈服应变 0.170^[1], 此时应力峰值为 9.7 MPa。

由上述分析可知, 相同厚度的泡沫混凝土层, 泡沫混凝土强度越高, 泡沫混凝土层塑性变形越小, 这与 2.1 节中的试验结果一致。泡沫混凝土强度越高, 弹性区(承受爆炸荷载后未破坏且仍处于弹性阶段的泡沫混凝土区域)的范围越大, 即相比于低强度泡沫混凝土, 同等条件下高强度泡沫混凝土具有更大的应变富余(较大范围的泡沫混凝土未达到屈服应变), 基于第 1 节分析结果, 此时可进一步降低泡沫混凝土层厚度。也即在满足作用于主体结构上的荷载峰值不超过泡沫混凝土屈服应力的前提下, 利用高强度泡沫混凝土可降低泡沫混凝土层的厚度。

图 10 给出不同类型靶体主体结构层上表面沿径向的应力峰值分布。可以看出, 主体结构层上表面沿径向的应力峰值呈梯形分布, 选用低强度等级的泡沫混凝土不仅能降低作用在主体结构上的爆炸荷载幅值, 还能使其分布更为均匀。

由图 9 可知, 选用低强度等级的泡沫混凝土虽然能显著降低作用在主体结构上的荷载幅值, 但荷载作用时间延长, 仅依据荷载幅值尚不能准确评估不同强度等级的泡沫混凝土层对主体结构层的防护效果。主体结构层的损伤破坏与爆炸能量在该层的分布密切相关^[1], 图 11 给出不同靶体的主体结构层总能量对比, 可以看出, 选用低强度等级的泡沫混凝土能显著降低透射进入主体结构层的爆炸能量, 从而起到更好的防护效果。

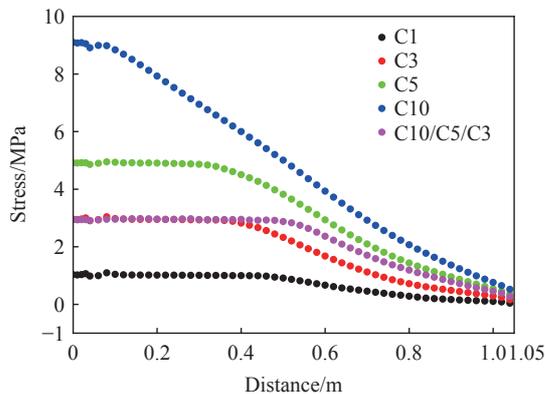


图 10 主体结构层上表面沿径向的应力峰值分布

Fig. 10 Peak stress distribution along the radial direction on the upper surface of the structure layer

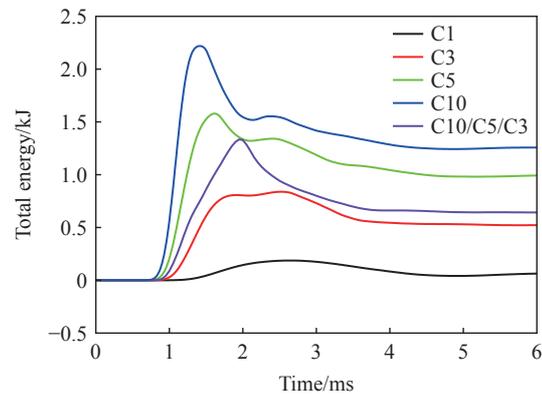


图 11 主体结构层能量对比

Fig. 11 Comparison of energy in structure layer

对于组合式防护结构而言, 同等条件下小跨度结构抗力通常较大跨结构高, 基于上述分析, 此时可选取强度等级相对较高的泡沫混凝土从而适当降低泡沫混凝土层的厚度; 而对于大跨结构, 可选取低强度等级低的泡沫混凝土可使作用于主体结构层上的荷载更小且更均匀, 从而避免其发生局部和整体破坏。

3 分层梯度泡沫混凝土的抗爆性能

由第 2 节分析可知, 选取低强度等级的泡沫混凝土虽能够使作用于主体结构层的爆炸荷载幅值更小且分布更为均匀, 但同时会使遮弹层底部发生更为严重的震塌破坏, 强度等级过低的泡沫混凝土层在遮弹层震塌碎块的冲击作用下容易引起局部应力集中可能导致泡沫混凝土层发生破裂或贯穿, 从而对主体结构层造成不利影响^[3]。

从可靠防护主体结构层的角度, 若存在一种分层梯度泡沫混凝土, 其上层泡沫混凝土具有较高强度等级从而使其在降低遮弹层底部震塌破坏程度的同时能有效抵抗震塌碎块的冲击作用, 其余层泡沫混凝土具有较低强度等级从而使其能够降低作用在主体结构上的荷载幅值且分布更为均匀, 这对防护结构抗爆设计十分有意义。基于此, 本节首先开展分层梯度泡沫混凝土的组合式防护结构预制孔装药爆炸试验, 然后利用数值模拟分析分层梯度泡沫混凝土对组合式防护结构抗爆性能的影响。

3.1 爆炸试验

分层梯度泡沫混凝土组合式防护结构预制孔装药爆炸试验基本情况同文献 [1] 所述, 仅将厚 0.5 m 的 C5 泡沫混凝土层改为由 C10、C5 和 C3 泡沫混凝土组成的分层梯度泡沫混凝土层(0.2 m/0.15 m/0.15 m)。

图 5(e) 给出了试验后分层梯度泡沫混凝土的组合式防护结构靶体(简称 C10/C5/C3 靶体)损伤破坏情况, 可以看出, 其遮弹层损伤破坏情况与图 5(d) 所示的 C10 靶体遮弹层几乎完全相同。试验后经测量分层梯度泡沫混凝土层沿中心轴线方向的总厚度为 0.455 m, 塑性变形大于 C10 靶体(厚度为 0.465 m), 而主体结构层试验后仍完好无损, 由此初步说明, 具有一定厚度的分层梯度泡沫混凝土层能有效削弱爆炸波, 避免主体结构层发生损伤破坏。

3.2 数值模拟

为分析分层梯度泡沫混凝土对组合式防护结构中爆炸波传播衰减规律的影响, 同时便于与单一强度泡沫混凝土进行对比, 特建立 0.3 m 厚分层梯度泡沫混凝土组合式防护结构预制孔装药爆炸数值模型, 模型与图 2 所示相同, 仅将 C5 沫混凝土层改为由 C10、C5 和 C3 组成的分层梯度泡沫混凝土层(0.1 m/0.1 m/0.1 m)。

图 7(e) 给出数值模拟预测的 C10/C5/C3 靶体遮弹层损伤云图, 可以看出其损伤破坏情况与图 7(d) 所示单一 C10 靶体几乎完全相同, 底部震塌区范围明显小于 C5 和 C3 靶体(图 7(b)~(c))。由此说明分层梯度泡沫混凝土上部较高强度等级泡沫混凝土层(C10 层)的存在能有效降低遮弹层底部震塌破坏程度。由图 10 给出的 C10/C5/C3 靶体与单一强度泡沫混凝土靶体主体结构层上表面沿径向的应力峰值分布对比, 可以看出 C10/C5/C3 靶体主体结构层上表面应力峰值及其分布与单一 C3 靶体几乎相同。由此说明下部较低强度等级泡沫混凝土层(C3 层)的存在使主体结构层上的爆炸荷载幅值更小且分布更为均匀。

图 11 进一步给出了 C10/C5/C3 靶体与单一泡沫混凝土强度靶体主体结构层总能量对比, 可以看出 C10/C5/C3 靶体主体结构层总能量与单一 C3 靶体比较接近, 远低于单一 C10 和 C5 靶体。图 12 给出了分层梯度泡沫混凝土层与单一强度混凝土层中的总能量对比, 可以看出分层梯度泡沫混凝土层中的总能量明显高于单一 C10、C5 和 C3 泡沫混凝土层。由此说明分层梯度泡沫混凝土能充分发挥泡沫混凝土良好的消波特性, 使更多的爆炸能量耗散在分层梯度泡沫混凝土层中。

为分析爆炸波在分层梯度泡沫混凝土各层中的传播衰减规律, 图 13 分别给出了分层梯度泡沫混凝土层沿中心轴线方向的应力、应变峰值分布。可以看出, 分层梯度泡沫混凝土中顶部 C10 层近端(0.01 m 处)的应力峰值为 C10 泡沫混凝土平台应力 10 MPa, 中间 C5 层 0.10~0.15 m 范围内应力峰值为 5 MPa, 底部 C3 泡沫混凝土层各点应力峰值均为 3 MPa, 即分层梯度

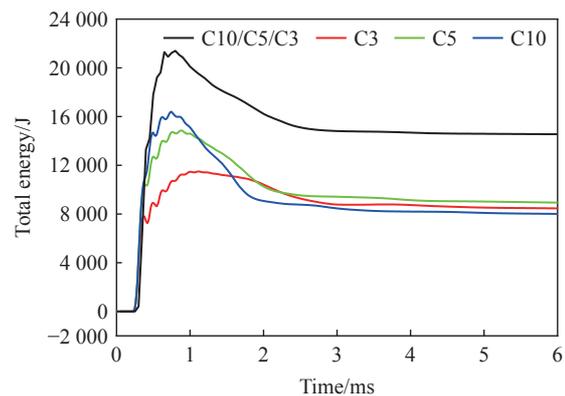


图 12 泡沫混凝土层能量对比

Fig. 12 Comparison of total energy in different foam concrete layers

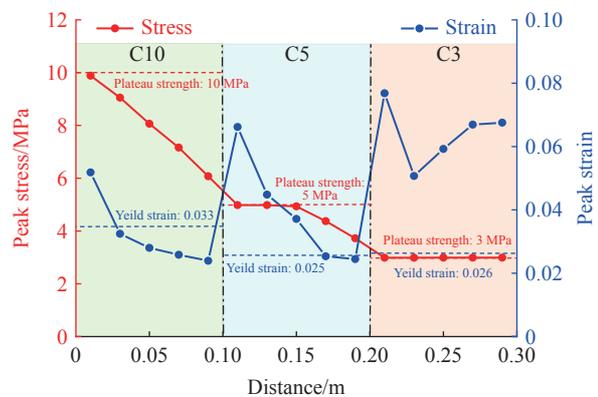


图 13 爆炸波在分层梯度泡沫混凝土中的传播衰减

Fig. 13 Propagation of blast wave in layered graded foam concrete

泡沫混凝土中应力峰值沿中心轴线方向呈多级阶梯形下降趋势。C5 层和 C3 层近端(0.11 m 和 0.21 m 处)应变峰值最大, 远大于 C5 和 C3 泡沫混凝土的屈服应变; C10 层和 C5 层远端(0.09 m 和 0.19 m 处)应变峰值最小, 小于 C10 和 C5 泡沫混凝土的屈服应变; 即分层梯度泡沫混凝土内部各层界面处在爆炸波作用下应变峰值发生显著变化。

由上述数值模拟结果可知, 相较于单一低强度泡沫混凝土层, 分层梯度泡沫混凝土可在不显著增加主体结构层总能量的情况下降低遮弹层底部震塌破坏程度, 且使主体结构层上的爆炸荷载幅值及分布与单一低强度泡沫混凝土层基本相同; 相较于单一高强度泡沫混凝土层, 分层梯度泡沫混凝土可在不提高遮弹层底部震塌破坏程度的前提下显著降低作用在主体结构层上的爆炸荷载幅值, 且使爆炸荷载在主体结构层上的分布更为均匀, 从而满足组合式大跨度防护结构的使用要求。

分层梯度泡沫混凝土组合式防护结构与单一强度泡沫混凝土相比具有良好抗爆性能的实质在于其多层梯度递减的排列方式增加了泡沫混凝土软夹层中的界面数量并形成爆炸波从波阻抗较大介质中向波阻抗较小介质中的逐级传播, 波阻抗较大一侧介质在反射拉伸波的作用下发生剥离等破坏现象, 波阻抗较小一侧介质在透射压缩波的作用下产生较大塑性变形, 使爆炸波在通过分层梯度泡沫混凝土中界面时消耗较大比例能量, 显著降低透射波的强度, 从而充分发挥泡沫混凝土良好的消波特性。

综上所述, 多层梯度泡沫混凝土不仅能实现对主体结构上荷载的可控设计, 还可避免因遮弹层底部发生震塌破坏给下部泡沫混凝土层和主体结构层带来不利影响。

4 与传统成层式结构的对比分析

为明确组合式防护结构相比采用中粗砂为分配层的传统成层式结构的优越性, 将 0.5、0.3 和 0.2 m 厚泡沫混凝土层替换为相同厚度的中粗砂并保证其他参数不变, 开展了相应的数值模拟, 其中干燥中粗砂采用 Soil and Foam 模型描述, 具体参数见文献 [15]。

图 14 给出了上述 3 种工况下主体结构层上表面中心位置(图 2 中测点 B-3-1)的应力时程曲线, 可以看到随着中粗砂层厚度减小, 荷载峰值明显增大, 主体结构层上的荷载随着中粗砂层厚度的变化而变化。对比图 4 可知, 3 种不同厚度泡沫混凝土层时主体结构层上的荷载均与泡沫混凝土屈服强度相当, 且当厚度较小时, 含泡沫混凝土层的组合式防护结构主体结构层上的荷载峰值明显低于以中粗砂为分配层的传统成层式结构主体结构层上的荷载。另外, 传统成层式结构采用的中粗砂通常就地取材, 材料力学性能不易控制且差异大, 导致传统成层式结构主体结构荷载的准确确定难。

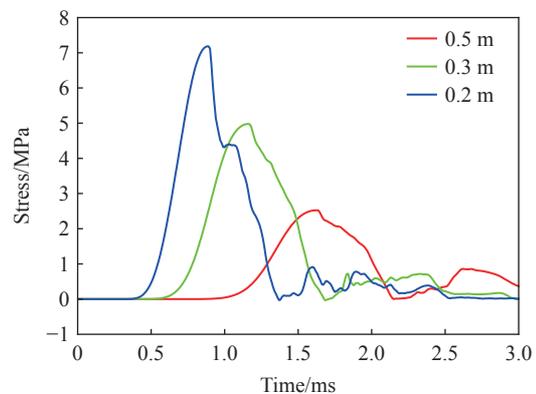


图 14 不同厚度中粗砂层分配层主体结构层测点的应力时程曲线

Fig. 14 Stress-time histories of gauges in structural layer with different thicknesses of medium-coarse sand layer

5 主体结构荷载可控的设计理念

在上述抗爆机制分析、泡沫混凝土厚度和强度影响规律及与传统成层式结构对比分析的基础上, 可总结归纳出含泡沫混凝土层的组合式防护结构的设计理念及优势。

(1) 泡沫混凝土层作用。传统成层式结构中分配层主要起分散爆炸荷载, 不使主体结构发生局部破坏的作用。而组合式防护结构中泡沫混凝土层主要起波阻抗失配和消波作用, 通过合理配置泡沫混凝土层厚度和强度, 可“调控”爆炸能量的分配, 使得大部分爆炸能量消耗在遮弹层, 大幅度减小作用主

主体结构上的能量和荷载。从该角度出发,宜定义泡沫混凝土层为能量调控层。

(2) 主体结构荷载可控的理念。传统成层式结构中分配层通常采用就地取材的中粗砂,材料力学性能不易控制且差异大,不易控制作用于主体结构上的荷载。而组合式防护结构采用泡沫混凝土,通常按照 JG/T266-2011《泡沫混凝土》规范^[14]施工,材料力学性能可得到可靠保证。这样,利用泡沫混凝土材料较长的屈服平台,通过设计泡沫混凝土强度等级(或密度等级,与强度呈一一对应关系)和厚度,可使得作用于主体结构上的爆炸荷载峰值恰为泡沫混凝土屈服强度,实现对主体结构上荷载的可控设计。

(3) 针对不同跨度主体结构的应用。工程实际中,可首先根据主体结构跨度选取能量调控层泡沫混凝土强度,如针对小跨度结构,其抗力通常较高,可选取强度标号相对较高的泡沫混凝土;而对于大跨度结构,可选取强度标号较低或梯度泡沫混凝土。然后可根据爆炸荷载和选定的泡沫混凝土强度对能量调控层厚度进行设计,工程应用非常方便。

(4) 分层梯度泡沫混凝土良好的消波吸能特性。利用碱激发泡沫混凝土施工方便且性能可控的特点,以分层梯度泡沫混凝土作为能量调控层,可充分发挥泡沫混凝土良好的消波耗能特性,可在实现对主体结构上荷载的可控设计的同时避免因遮弹层底部发生较为严重的震塌破坏给下部泡沫混凝土层和主体结构层带来不利影响。

注意到组合式防护结构设计理念中的关键在于泡沫混凝土能量调控层,其强度和厚度的设计是能量调控和主体结构荷载可控设计的基础,该问题已在文献[16]中进行细致讨论分析并给出厚度的设计计算方法。

6 结 论

为明确泡沫混凝土厚度和强度对组合式防护结构抗爆性能的影响,充分发挥和合理利用泡沫混凝土良好的消波特性,本文首先通过试验及数值模拟探讨泡沫混凝土厚度和强度对组合式防护结构抗爆性能的影响,并分析了分层梯度泡沫混凝土在爆炸波作用下的消波特性。然后将组合式防护结构与采用中粗砂为分配层的传统成层式结构进行对比分析验证其优越性,在此基础上,总结凝练出组合式防护结构的主体结构荷载可控的设计理念。主要结论如下:

(1) 泡沫混凝土层应用于组合式防护结构时,存在一个临界厚度,当泡沫混凝土层厚度大于该临界厚度时,作用于主体结构层的爆炸荷载峰值均不超过泡沫混凝土材料的屈服应力。

(2) 在满足作用于主体结构上的荷载不超过泡沫混凝土的屈服应力的前提下,利用高强度泡沫混凝土可降低泡沫混凝土层的厚度;选用低强度等级的泡沫混凝土不仅能降低作用在主体结构上的爆炸荷载幅值,还可使其分布更为均匀。

(3) 分层梯度泡沫混凝土可充分发挥泡沫混凝土良好的消波吸能特性,在实现对主体结构上荷载的可控设计的同时避免因遮弹层发生较为严重的震塌破坏给泡沫混凝土层和主体结构层带来的不利影响。

(4) 新型组合式防护结构设计理念的关键在于泡沫混凝土能量调控层,利用泡沫混凝土材料较长的屈服平台和较低的波阻抗,通过设计泡沫混凝土强度等级(密度等级)和厚度,可使得作用于主体结构上的爆炸荷载峰值恰为泡沫混凝土屈服强度,实现对主体结构上荷载的可控设计,有效解决了中粗砂为分配层的传统成层式结构不易控制作用于主体结构上荷载的问题。

参考文献:

- [1] 方秦,高鑫,孔祥振,等. 主体结构荷载可控的新型组合式防护结构(I): 抗爆机制[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(11): 111001. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0459.
FANG Q, GAO C, KONG X Z, et al. A new composite protective structure based on the controllability of blast load on the structure layer (I): blast resistance mechanism [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(11): 111001. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0459.

- [2] 张博一, 王伟, 周威. 地下防护结构 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2021: 212–218.
- [3] 颜海春, 艾德武, 袁正如, 等. 空气隔层成层式结构抗常规武器设计荷载分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(4): 802–806,856. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2012.04.025.
YAN H C, AI D W, YUAN Z R, et al. On the load analysis of resistance to conventional weapons under the circumstances of air buffer application [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(4): 802–806,856. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2012.04.025.
- [4] 颜海春, 方秦, 陈力. 遮弹层震塌碎块对成层式结构顶板的冲击破坏效应 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 9(1): 52–56. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.01.011.
YAN H C, FANG Q, CHEN L. Damage effect on top plate of layered structure under impact of falling mass from blast layer [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(1): 52–56. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.01.011.
- [5] ZHANG J X, ZHOU R F, WANG M S, et al. Dynamic response of double-layer rectangular sandwich plates with metal foam cores subjected to blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122(10): 265–275. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.016.
- [6] ZHANG J H, CHEN L, WU H, et al. Experimental and mesoscopic investigation of double-layer aluminum foam under impact loading [J]. *Composite Structures*, 2020, 241(6): 110859. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.04.031.
- [7] ZHANG J H, ZHANG Y D, FAN J Y, et al. Mesoscopic investigation of layered graded metallic foams under dynamic compaction [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(14): 2081–2098. DOI: 10.1177/1369433218766941.
- [8] GARDNER N, WANG E H, SHUKLA A. Performance of functionally graded sandwich composite beams under shock wave loading [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1755–1770. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.12.006.
- [9] WANG E H, GARDNER N, SHUKLA A. The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(18/19): 3492–3502. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.06.004.
- [10] GUPTA N. A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(4/5): 979–982. DOI: 10.1016/j.matlet.2006.06.033.
- [11] ZENG H B, PATTOFATTO S. Impact behaviour of hollow sphere agglomerates with density gradient [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, 52(5): 680–688. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.012.
- [12] 郝逸飞, 梁恺康, 杨光照. 一种常温养护保温隔热材料的制备方法 [P]. 天津市: CN114149219B, 2022-04-26.
- [13] NIAN W, SUBRAMANIAM K, ANDREOPOULOS Y. Experimental investigation on blast response of cellular concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 105–115. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.021. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.021.
- [14] 泡沫混凝土规范: JG/T266-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 2–11.
- [15] LAINE L, SANDVIK A. Derivation of mechanical properties for sand [C]//4th Asian-Pacific conference on Shock and Impact Loads on Structures. Singapore, 2001: 1–8.
- [16] 杨亚, 孔祥振, 方秦, 等. 爆炸荷载下泡沫混凝土分配层最小厚度的计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(11): 114201. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0047.
YANG Y, KONG X Z, FANG Q, et al. A calculation method for the minimum thickness of a foam concrete distribution layer under blast load [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2023, 43(11): 114201. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0047.

(责任编辑 王易难)