

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0174

超高性能混凝土临空板接触爆炸 破坏效应实验研究*

魏久淇^{1,2}, 李磊^{1,2}, 王世合^{1,2}, 张春晓^{1,2}, 曹少华^{1,2}, 高杰³

1. 军事科学院国防工程研究院工程防护研究所, 河南 洛阳 471023;
2. 军事科学院国防工程研究院工程防护研究所河南省特种防护材料重点实验室, 河南 洛阳 471023;
3. 河南东骏建材科技有限公司, 河南 信阳 464200)

摘要: 为了研究超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 的抗接触爆炸性能, 开展了 C120、C150 和 C180 等 3 种强度等级共 24 块 UHPC 临空板的接触爆炸实验, 定量分析了不同药量时典型配筋与不配筋靶板的局部破坏特征, 得到了 UHPC 的爆炸临界震塌系数、压缩系数和成坑系数。结果表明: 相同药量下, UHPC 板的正面破坏程度随材料强度的提升而减轻; 强度越高, 爆炸成坑系数和压缩系数越小, 抗爆性能越好; 配筋率较低时, 钢筋对 UHPC 板正面爆坑尺寸及背面震塌破坏程度影响较小, 但对板的整体变形起到了一定的减轻作用, 能够减小板底的剩余挠度和裂缝宽度; C150 靶板的爆炸临界震塌系数最小, 不大于 $0.251 \text{ m/kg}^{1/3}$, C120 和 C180 靶板的爆炸临界震塌系数相近, 不大于 $0.285 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。在设计、使用纤维含量较高的大尺寸 UHPC 构件时, 应特别关注由纤维分布方向性引起的材料各向异性和结构力学性能的变化。

关键词: 超高性能混凝土; 接触爆炸; 局部破坏; 临界震塌; 压缩破坏

中图分类号: O383.2; TU928 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental study on local damage effect of ultra-high performance concrete slabs under contact explosion

WEI Jiuqi^{1,2}, LI Lei^{1,2}, WANG Shihe^{1,2}, ZHANG Chunxiao^{1,2}, CAO Shaohua^{1,2}, GAO Jie³

1. Institute of Engineering Protection, Institute of Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Luoyang 471023, Henan, China;
2. Henan Key Laboratory of Special Protective Materials, Institute of Engineering Protection, Institute of Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Luoyang 471023, Henan, China;
3. Henan Dongjun Building Materials Technology Company, Xinyang 464200, Henan, China)

Abstract: In order to study the contact explosion resistance of ultra-high performance concrete (UHPC), 24 contact explosion experiments were conducted. The target slabs were cast in UHPC with or without reinforcement, and the compressive strength grades of the UHPCs were C120, C150 and C180. The slabs were laid on supporting ring beams and the back faces of the slabs were free. The TNT was placed on the center of the front face. The size of the target slab was $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$, and the main reinforcements were $\varnothing 12$ HRB400 with $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ grid distance. Based on the experiments, the local failure characteristics of typical reinforced and unreinforced target slabs under the shock of different explosive weights were quantitatively analyzed, and the critical collapse coefficient, compression coefficient and explosion crater coefficient of the UHPC slabs were obtained. The results show that, at the same explosive weight, the damage degree of the UHPC slabs

* 收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(52078361)

第一作者: 魏久淇(1990—), 男, 硕士, 工程师, weijiuqi61489@163.com

通信作者: 李磊(1980—), 男, 博士, 助理研究员, lileikf@163.com

decreases with the compressive strength. The higher the compressive strength, the smaller the compression coefficient and the explosion crater coefficient. When the reinforcement ratio is low, it has little effect on the front crater size and the back collapse damage degree of the UHPC slab, but has a certain role in reducing the residual deflection and crack width at the bottom of the slab. For the UHPCs in this paper, the critical collapse coefficient of the C150 slab is the smallest, no more than $0.251 \text{ m/kg}^{1/3}$; and the C120 slab and C180 slab are similar, no more than $0.285 \text{ m/kg}^{1/3}$. The critical collapse coefficients of the C180 UHPC is not the smallest because there are more steel fibers in the horizontal direction than in the vertical direction. When designing or using large size UHPC structures with high fiber content, special attention should be paid to the material anisotropy and the changes in structural mechanical properties due to the directivity of the fiber distribution.

Keywords: ultra-high performance concrete; contact explosion; local failure effect; critical collapse; compression failure

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种新型水泥基复合材料^[1], 具有超高强度、超高韧性和超高耐久性等, 在高层建筑、跨海大桥、核反应堆安全壳及成层式防护结构中的应用越来越广泛。近年来, 对 UHPC 的制备理论、制备技术和静动态力学特性已展开了多方面的研究^[2-12], 取得了较大进步。而爆恐袭击、局部军事冲突和突发性爆炸事件的频繁发生, 使爆炸荷载下混凝土结构破坏效应研究越来越重要。

对非 UHPC 板的接触爆炸局部破坏效应, 已进行了一些研究。张想柏等^[13] 利用实验和数值模拟, 再现了钢筋混凝土板的爆炸成坑、爆炸震塌、爆炸贯穿和爆炸冲切等 4 种典型接触爆炸的局部破坏特征, 并利用量纲分析方法, 建立了新的震塌厚度计算公式, 确定了震塌破坏系数及破坏等级, 强调了震塌厚度与装药量和材料强度之间的关系; 王明洋等^[14] 基于单自由度, 提出一种钢板-钢纤维混凝土接触爆炸作用下的极限分析方法, 并验证了该方法的实用性及可靠性; 胡金生等^[15] 对比研究了钢纤维增强混凝土、聚丙烯纤维混凝土和 C40 钢筋混凝土的局部破坏效应, 发现钢纤维增强混凝土的压缩系数最小, 聚丙烯纤维混凝土次之, C40 钢筋混凝土最大, 靶板支撑方式对靶板抗局部破坏效应有一定的影响, 砂土垫层有利于减小靶板的破坏效应; 岳松林等^[16] 基于钢塑性模型, 将介质接触爆炸问题转化为初始冲击体撞击周围介质问题, 利用质量守恒、边界和不可压缩等 3 个条件, 提出了临界震塌厚度和贯穿厚度的新计算公式, 揭示了传统经验公式的物理本质。这些研究成果有助于认识 UHPC 接触爆炸作用下的局部破坏特征。Li 等^[17] 对比研究了普通混凝土和 UHPC 接触爆炸下的破坏效应, 通过对剥落碎片和爆坑尺寸的定量分析, 发现 UHPC 的抗爆性能更强。葛涛等^[18] 进行了超高性能混凝土抗爆性能的实验研究, 发现钢纤维体积分数 5% 的超高性能混凝土的压缩系数约为 $0.042 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、抗爆能力约为 C30 钢筋混凝土的 3 倍, 但未考虑药心距对压缩系数的影响。戎志丹等^[19] 进行了超高性能混凝土抗接触重复爆炸能力的实验研究, 发现: 强度越高, 超高性能混凝土的抗爆性能越好, 压缩系数越小; 靶体背面支撑方式对超高性能混凝土的压缩系数有一定影响, 相比临空, 置地方式的压缩系数较小; 超高性能混凝土的抗重复爆炸性能较好, 相同药量下第 2 次接触爆炸坑深仅比第 1 次增加约 79%。Wu 等^[20] 进行了聚能炸药射流对 UHPC、普通混凝土、45 钢及 UHPC-45 钢复合材料的局部破坏效应的实验和数值模拟研究, 发现: 在相同条件下, 聚能炸药射流的穿孔深度从小到大依次为 UHPC-45 钢复合材料、45 钢、UHPC 和普通混凝土; 而在相同总质量下, UHPC 对聚能炸药的抵抗能力最强。目前, 受制于经费和场地等, UHPC 板接触爆炸局部破坏效应研究还不充分, 尤其是相关爆炸临界震塌的研究。

本文中, 针对 C120、C150 和 C180 等 3 种强度的 UHPC 临空板, 开展 24 炮次的接触爆炸实验, 定量分析不同药量时典型配筋与不配筋试验板的局部破坏特征, 给出各种条件下 UHPC 板的爆炸临界震塌系数、压缩系数和成坑系数, 分析强度、配筋等对 UHPC 抗爆性能的影响, 合理解释 UHPC 试验板的爆炸临界震塌系数不一定随强度等级的提高而降低的现象, 拟为该材料的应用提供参考。

1 实验

1.1 材料

实验中 UHPC 板均为自行配制浇筑, 有 C120、C150 和 C180 等 3 种强度等级, 钢纤维体积分数分别

为 2%、3% 和 5%。考虑典型配筋与不配筋的情况, C120 和 C150 靶板有配筋和不配筋的, C180 靶板不配筋, 共 5 类板, 每类板有 4~5 个试件。靶板长、宽均为 1.5 m, 板厚为 0.3 m。配筋时钢筋双层双向配置, 采用 $\phi 12$ mm 的 HRB400 钢筋, 网格尺寸为 200 mm \times 200 mm, 此时体积配筋率为 0.75%, 截面配筋率为 0.38%。两层钢筋间采用梅花拉筋, 拉筋为 $\phi 6$ mm 的 HRB400 钢筋, 钢筋的混凝土保护层厚度为 25 mm。浇筑过程中, 同时制备了 UHPC 试块, 并进行力学性能参数测试, 见表 1。

表 1 UHPC 板的参数

Table 1 Parameters of the UHPC slabs

材料	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	数量
C120	125.2	7.12	5
PC120	125.2	7.12	5
C150	157.7	8.18	5
PC150	157.7	8.18	5
C180	182.8	9.34	4

1.2 方法

临空板接触爆炸实验装置如图 1 所示。试件直接放置在支撑圈梁上形成四边支撑的临空板, 支撑圈梁截面尺寸为 200 mm \times 200 mm, 外表面为厚 5 mm 的钢板, 内部用 C50 混凝土密实填充, 支撑圈梁放置在厚 240 mm 的砖墙上, 砖墙的一个侧面预留宽 80 cm 的观察口。集团装药位置在试件表面中心, 炸药为 TNT 药块, 每块质量为 0.2 kg, 尺寸为 100 mm \times 50 mm \times 25 mm, 如需要 0.1 kg 药量时将 TNT 药块用铜锯切为两半。采用电雷管起爆, 电雷管尽量放置在装药中心位置。重点考察 UHPC 临空板的临界震塌现象, 初步药量为 1.6~3.2 kg。用裂缝测宽仪和游标卡尺测量爆炸破坏的裂缝宽度。

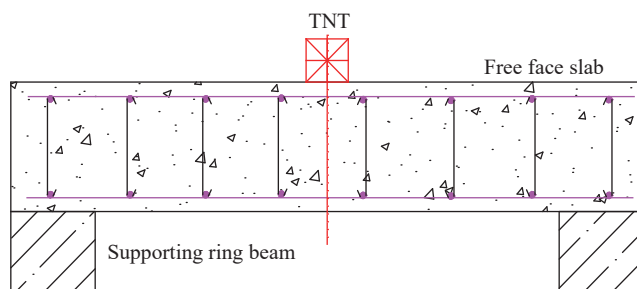


图 1 实验装置

Fig. 1 The experimental setup



2 结果与分析

2.1 局部破坏概况

集团装药爆炸瞬间产生了高温高压爆轰波冲击介质, 介质的迎爆面(正面)形成漏斗坑, 随着药量的增加, 介质的背爆面(背面)产生震塌坑, 甚至可能发生贯穿破坏。图 2 为 UHPC 临空板接触爆炸的典型局部破坏特征。正面局部破坏效应特征主要为成坑, 背面局部破坏效应主要包含裂纹隆起、临界震塌和震塌, 背面呈现多条由中心向四周的放射性裂缝, 中心附近具有明显的隆起, 说明 UHPC 靶板局部破坏宏观形态与钢纤维混凝土板基本一致。正面爆坑及背面震塌块破坏面凹凸不平, 部分碎块呈现了碎而不掉, 破坏面上的纤维大多拨出而非拔断, 形状不是很规则, 为了更好地反映实际破坏效果, 正面爆坑直径取最大和最小的平均值, 定义背面隆起高度为剩余挠度, 各组试件局部破坏情况见表 2。

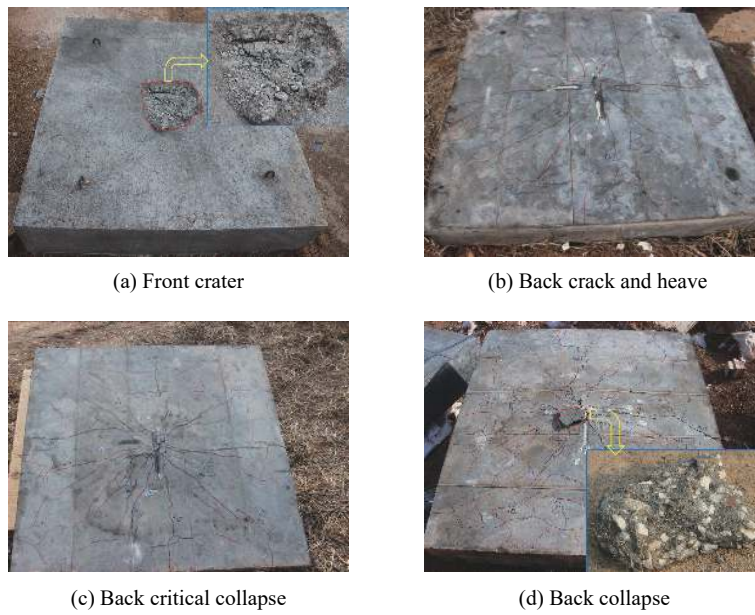


图 2 UHPC 板的典型局部破坏
Fig. 2 Typical local damage of the UHPC slabs

表 2 试件的破坏状况
Table 2 Damage states of the slabs

试件	药量/kg	正面		剩余挠度/mm	背面	
		直径/m	深度/m		震塌坑尺寸/mm	裂缝分布
C120-1	1.6	0.320	0.088	16	—	12条, 最宽3.5 mm
C120-2	1.8	0.315	0.092	28	—	14条, 最宽9.9 mm
C120-3	1.9	0.340	0.094	—	90×140深15	14条
C120-4	2.0	0.330	0.095	—	350×250深60	17条
C120-5	2.4	0.375	0.099	—	620×780深105	18条
PC120-1	1.6	0.328	0.092	10	—	11条, 最宽1.9 mm
PC120-2	2.0	0.360	0.098	28	—	13条, 最宽2.4 mm
PC120-3	2.1	0.355	0.100	—	40×50深30	15条
PC120-4	2.2	0.350	0.099	—	70×105深35	16条
PC120-5	2.4	0.360	0.102	—	100×200深60	16条
C150-1	1.6	0.285	0.076	8	—	6条, 最宽2.0 mm
C150-2	2.0	0.305	0.080	30	—	11条, 最宽3.6 mm
C150-3	2.4	0.360	0.084	49	—	13条, 最宽7.5 mm
C150-4	2.6	0.355	0.088	—	380×630深70	13条
C150-5	2.8	0.345	0.092	—	690×900深130	15条
PC150-1	1.6	0.273	0.079	9	—	8条, 最宽2.0 mm
PC150-2	2.0	0.320	0.080	15	—	11条, 最宽2.2 mm
PC150-3	2.4	0.343	0.083	22	—	14条, 最宽3.8 mm
PC150-4	2.7	0.360	0.088	—	230×470深55	14条
PC150-5	3.0	0.370	0.092	—	370×460深65	14条

表 2 (续)
Table 2 (Continued)

试件	药量/kg	正面			背面	
		直径/m	深度/m	剩余挠度/mm	震塌坑尺寸/mm	裂缝分布
C180-1	1.8	0.273	0.070	22	—	10条, 最宽3.54 mm
C180-2	2.0	0.285	0.075	—	150×145深50	12条
C180-3	2.4	0.305	0.078	—	650×735深95	13条
C180-4	2.8	0.340	0.086	—	705×895深110	15条

2.2 正面局部破坏状况分析

接触爆炸时, UHPC 临空板正面的爆坑直径 d 和深度 h 有经验公式^[15]:

$$d = k\sqrt[3]{C} \tag{1}$$

$$h = mK_a\sqrt[3]{C} - e \tag{2}$$

$$C = \eta C_r \tag{3}$$

式中: C 为 TNT 装药量; e 为装药中心至靶板表面的距离; C_r 为实际装药量; m 为堵塞因数, 在表面接触爆炸下, $m=1$; K_a 为压缩系数, k 为成坑系数, 均为反映介质抗爆炸性能系数, 两个系数越小介质的抗爆性能越强。装药形状势影响因数 η 为考虑了非球形或立方体形装药对接触爆炸破坏威力影响后确定的经验因数。根据文献 [21]: 装药形状为标准球形或立方体时, $\eta=1$; 装药形状为棱柱体或圆柱体(长度与边长(直径)的比为 λ)时, 当装药垂直于靶板表面时, λ 越大 η 越小, 当装药平行于靶板表面时, λ 越大 η 越大, $\lambda=1$ 时 $\eta=1$, $\lambda=2$ 时 $\eta=1.25$, 其中按照线性插值取值。当药量为 1.6 kg 时, 装药正好形成一个边长 100 mm 的立方体, 以此为基准, 在装药的一个侧面增加药块, 形成类似棱柱体, 开展不同药量的实验。如 $C_r=1.6$ kg 时 $\eta=1$, $C_r=2.4$ kg 时 $\eta=1.125$, $C_r=3.2$ kg 时 $\eta=1.25$ 。实验中, e 均为 5 mm。

用式 (1)~(2) 对表 2 中 UHPC 临空板正面爆坑实验数据进行拟合, 结果如图 3~4 所示, 其中所有拟合直线的相关系数均大于 0.995。相同药量下, UHPC 板的正面破坏程度随材料强度的提升而减轻; 随着 UHPC 板强度的提高, UHPC 板的压缩系数 K_a 和成坑系数 k 减小, 抗爆性能增强; 典型配筋与不配筋对 UHPC 板的压缩系数 K_a 和成坑系数 k 基本没有影响。其原因分析为: (1) UHPC 中本身掺有钢纤维, 能阻止裂缝形成、发展, 基体混凝土不会产生严重开裂, 且实验中装药量不大, 正面破坏程度较轻, 钢筋的作用难以发挥; (2) 配置的钢筋网格尺寸较大 (200 mm×200 mm), 且装药中心投影点位于两根钢筋中间(见图 1), 而爆坑直径一般为 300~400 mm, 深度不超过 100 mm, 通常观察不到配筋试件爆坑中的钢筋露出, 所以钢筋的作用还未体

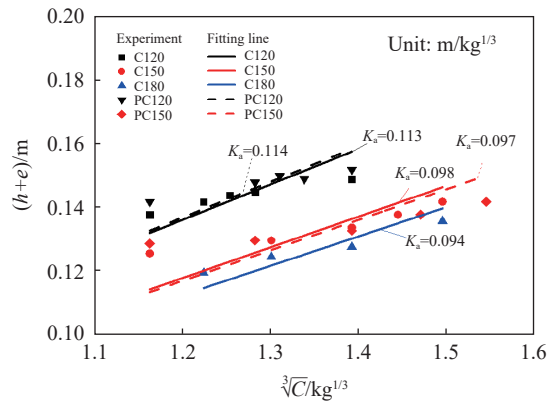


图 3 压缩系数的拟合结果

Fig. 3 Fitting results of the compressibility coefficients

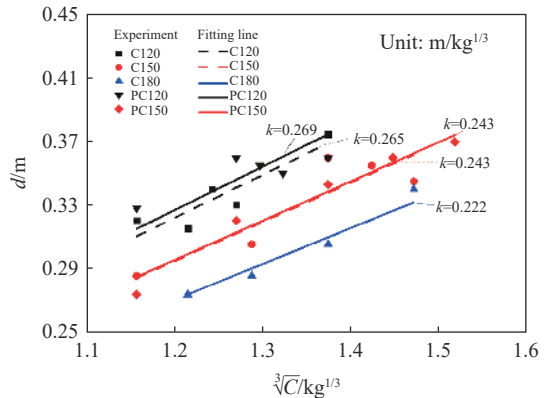


图 4 成坑系数的拟合结果

Fig. 4 Fitting results of the crater coefficients

现。由文献 [21-22] 和本文实验结果可得表 3, 可知超高性能混凝土的 k 和 K_a 远小于 C40 钢筋混凝土和 C100 钢纤维混凝土的, UHPC 的抗爆性能更强。

表 3 靶板正面的爆坑参数

Table 3 The front face anti-explosion parameters of the slabs

材料	$k/(\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3})$	$K_a/(\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3})$
C40钢筋混凝土 ^[21-22]	0.433	0.13
C100钢纤维混凝土 ^[21-22]	0.333	0.12
C120超高性能混凝土	0.265~0.269	0.113~0.114
C150超高性能混凝土	0.243	0.097~0.098
C180超高性能混凝土	0.222	0.094

2.3 背面局部破坏状况分析

接触爆炸时, UHPC 临空板的临界震塌系数有经验公式^[23-24]:

$$K_{z0} = (H + e) / \sqrt[3]{C_0} \quad (4)$$

式中: K_{z0} 为临界震塌系数, H 为靶板厚度, C_0 为临界震塌时的 TNT 药量。接触爆炸实验中, 当试验板背爆面出现碎块脱落的临界震塌现象时, 对应的震塌系数即为临界震塌系数。参照文献 [23] 中钢纤维混凝土的爆炸临界震塌系数 $0.32 \text{ m/kg}^{1/3}$, 设 UHPC 的爆炸临界震塌系数为 $0.3 \text{ m/kg}^{1/3}$, 此时对应的药量为 1.6 kg , 观察此装药量下 UHPC 临空板的破坏特征, 逐渐增加或减少药量, 逼近 UHPC 临界震塌破坏时对应的药量, 从而确定 UHPC 的爆炸临界震塌系数取值范围。

由表 2, 靶板的破坏情况都处于爆炸成坑和爆炸震塌破坏类型之间, 装药量越大破坏越严重。配筋对震塌破坏临界值的影响较小, 但对板的整体变形有一定的减轻作用, 减小了板的剩余挠度和裂缝宽度, 对降低板的整体动态响应起到一定的积极作用。

对于爆炸震塌临界状态, 可由表 2 中数据得出取值范围如下: C120 无配筋试件在 TNT 药量不大于 1.8 kg 接触爆炸时属于爆炸成坑破坏类型, 在 TNT 药量不小于 1.9 kg 接触爆炸时属于爆炸震塌破坏类型, 因此爆炸震塌临界破坏情况对应的 TNT 药量为 $1.8 \sim 1.9 \text{ kg}$, 由式 (1), 可得爆炸临界震塌系数 K_{z0} 为 $0.278 \sim 0.285 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。同样, 可得 C120 配筋靶板、C150 靶板、C150 配筋靶板和 C180 靶板的爆炸临界震塌系数, 见表 4。

表 4 UHPC 靶板的临界震塌系数

Table 4 Critical collapse factors of the UHPC slabs

材料	$K_{z0}/(\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3})$
C120	0.278~0.285
PC120	0.267~0.272
C150	0.243~0.251
PC150	0.238~0.251
C180	0.272~0.285

由表 4, C120、C150 和 C180 强度 UHPC 的爆炸临界震塌系数为 $0.238 \sim 0.285 \text{ m/kg}^{1/3}$, C150 超高性能混凝土的爆炸临界震塌系数最小, 不超过 $0.251 \text{ m/kg}^{1/3}$, 而 C120 和 C180 超高性能混凝土的爆炸临界震塌系数相近, 不超过 $0.285 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。强度更高的 C180 超高性能混凝土抗爆炸震塌性能并不是最好的, 其原因很难由材料强度等级解释, 经分析认为: C180 钢纤维体积分数(5%)较高, 在制作大尺寸试件时出现轻微的纤维结团现象, 因此用振动棒进行了较长时间的振捣, 振捣时振动棒大部分处于水平方向, 使试件内纤维分布方向更多地偏向于水平分布, 这对测量力学性能的小试块影响不大, 但对于抗爆大尺寸试件, 竖直方向的纤维分布更少, 该方向的抗拉强度就会降低, 使其抵抗竖直方向反射拉伸波的能力减弱, 抗爆炸震塌性能有所下降。在制作纤维含量较高(体积分数不小于 5%)的大尺寸 UHPC 构件时, 应特别关注由纤维分布的方向性带来的材料力学性能的各向异性, 以及由材料各向异性引起的结构力学性能的变化。

3 结 论

针对 C120、C150 和 C180 等 3 种混凝土强度等级共 24 块 UHPC 临空板开展了接触爆炸局部的破坏效应实验, 分析了不同药量下的局部破坏特征, 考虑了不配筋和配筋两种情况对破坏效应的影响, 给出了各种条件下 UHPC 的临界震塌系数、压缩系数和成坑系数, 分析了强度和配筋情况等因素对 3 个系数的影响。主要结论如下。

(1) 随着混凝土强度等级的提高, UHPC 的爆炸成坑系数 k 和压缩系数 K_a 越小, 靶板正面抗爆炸性能越强; 相比 C40 钢筋混凝土和 C100 钢纤维混凝土, UHPC 的成坑系数 k 和压缩系数 K_a 大幅减小, 抗接触爆性能增强。

(2) 配筋率较小时, 配筋对 UHPC 靶板正面爆坑及爆炸临界震塌系数影响较小, 但对板的整体变形起一定的减轻作用, 可减小板的剩余挠度、裂缝宽度和裂缝数量。

(3) 制备的 C150 靶板的爆炸临界震塌系数最小, 不超过 $0.251 \text{ m/kg}^{1/3}$, C120 和 C180 靶板的爆炸临界震塌系数相近, 不大于 $0.285 \text{ m/kg}^{1/3}$; 在制作纤维含量较高(体积分数不小于 5%)的大尺寸 UHPC 构件时, 应特别关注由纤维分布的方向性引起的材料各向异性和结构力学性能的变化。

参考文献:

- [1] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model [J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6): 997–1009. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90022-1.
- [2] SOBUZ H R, VISINTIN P, MOHAMED ALI M S, et al. Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 251–261. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.102.
- [3] YANG S L, MILLARD S G, SOUTSOS M N, et al. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC) [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(6): 2291–2298. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.012.
- [4] CAMILETTI J, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete [J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(6): 881–898. DOI: 10.1617/s11527-012-9940-0.
- [5] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A review on ultra high performance concrete: part II . hydration, microstructure and properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 368–377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095.
- [6] SHI C J, WANG D H, WU L M, et al. The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement-silica fume-slag binder [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 61: 44–52. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.013.
- [7] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWIL S, et al. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(3): 309–324. DOI: 10.1617/s11527-011-9767-0.
- [8] YAZICI H, YARDIMCI M Y, AYDIN S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(3): 1223–1231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003.
- [9] ABBAS S, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 429–441. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017.
- [10] KHOSRAVANI M R, WAGNER P, FRÖHLICH D, et al. Dynamic fracture investigations of ultra-high performance concrete by spalling tests [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109844. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109844.
- [11] GUO Y B, GAO G F, JING L, et al. Quasi-static and dynamic splitting of high-strength concretes-tensile stress-strain response and effects of strain rate [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 188–211. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.11.012.
- [12] 戎志丹, 孙伟. 粗集料对超高性能水泥基材料动态力学性能的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 361–366. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0361-06.

- RONG Z D, SUN W. Influences of coarse aggregate on dynamic mechanical behaviors of ultrahigh-performance cementitious composites [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 361–366. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0361-06.
- [13] 张想柏, 杨秀敏, 陈肇元, 等. 接触爆炸钢筋混凝土板的震塌效应 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2006, 46(6): 765–768. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2006.06.004.
- ZHANG X B, YANG X M, CHEN Z Y, et al. Explosion spalling of reinforced concrete slabs with contact detonations [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(6): 765–768. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2006.06.004.
- [14] 王明洋, 张胜民, 国胜兵. 接触爆炸作用下钢板钢纤维混凝土遮弹层设计方法(I) [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(1): 40–45.
- WANG M Y, ZHANG S M, GUO S B. Design method of steel and steel-fiber concrete shelter plate under contact detonation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(1): 40–45.
- [15] 胡金生, 杨秀敏, 周早生, 等. 接触爆炸对底部有土垫层纤维混凝土板破坏效应试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(2): 157–162. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)02-0157-06.
- HU J S, YANG X M, ZHOU Z S, et al. Experimental investigation on contact explosion damage effect to fiber reinforced concrete slab with soil bedding [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(2): 157–162. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)02-0157-06.
- [16] 岳松林, 王明洋, 张宁, 等. 混凝土板在接触爆炸作用下的震塌和贯穿临界厚度计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
- YUE S L, WANG M Y, ZHANG N, et al. A method for calculating critical spalling and perforating thicknesses of concrete slabs subjected to contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
- [17] LI J, WU C Q, HAO H, et al. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 93: 62–75. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.02.007.
- [18] 葛涛, 潘越峰, 谭可可, 等. 活性粉末混凝土抗冲击性能研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S1): 3553–3557. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.z1.148.
- GE T, PAN Y F, TAN K K, et al. Study on resistance of reactive powder concrete to impact [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S1): 3553–3557. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.z1.148.
- [19] 戎志丹, 孙伟, 张云升, 等. 超高性能钢纤维混凝土抗二次接触爆炸性能研究 [J]. *华北水利水电大学学报*, 2012, 33(6): 1–4. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2012.06.001.
- RONG Z D, SUN W, ZHANG Y S, et al. Study on the characteristics of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete under the second explosion [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2012, 33(6): 1–4. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2012.06.001.
- [20] WU H, HU F, FANG Q, et al. A comparative study for the impact performance of shaped charge JET on UHPC targets [J]. *Defence Technology*, 2019, 15(4): 506–518. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.005.
- [21] 王年桥. 防护结构计算原理与设计 [M]. 2 版. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2002.
- [22] 张云升, 张文华, 刘建忠. 超高性能水泥基复合材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [23] 郑全平, 牛小玲, 汪剑辉, 等. 不同钢纤维掺量 C30 RC 板爆炸震塌试验研究 [J]. *防护工程*, 2013, 35(1): 16–20.
- ZHENG Q P, NIU X L, WANG J H, et al. Experimental investigation into explosion spalling of C30 RC plates with different steel fiber content [J]. *Protective Engineering*, 2013, 35(1): 16–20.
- [24] 郑全平, 钱七虎, 周早生, 等. 钢筋混凝土震塌厚度计算公式对比研究 [J]. *工程力学*, 2003, 20(3): 47–53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.03.009.
- ZHENG Q P, QIAN Q H, ZHOU Z S, et al. Comparative analysis of scabbing thickness estimation of reinforced concrete structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(3): 47–53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.03.009.

(责任编辑 丁峰)