

AM 文章编号: 1001-1455(2009)04-0385-05

钢纤维钢筋混凝土板爆炸局部破坏效应*

李晓军^{1,2}, 郑全平², 杨 益²

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 在前人的实验基础上, 针对中高强钢纤维钢筋混凝土板接触爆炸破坏效应进行了 94 炮野外化爆实验, 详细介绍了实验参数设计, 系统分析了不同装药量及结构参数条件下钢纤维钢筋混凝土板接触爆炸破坏特征, 即爆炸成坑、临界震塌、爆炸震塌、临界贯穿和爆炸贯穿。得出了钢纤维钢筋混凝土板接触爆炸 5 种典型破坏形态及其相应的破坏参数指标值, 对爆炸成坑和结构震塌的主要影响因素得出了初步结论, 为爆炸局部破坏分级及结构抗局部破坏设计提供了实验依据。

关键词: 爆炸力学; 破坏参数; 接触爆炸; 钢纤维钢筋混凝土; 局部破坏

中图分类号: O383.2

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

1 引言

在爆炸荷载作用下, 钢筋混凝土结构将产生局部破坏。这种局部破坏现象一般发生在局部荷载作用点及其周围或结构背面局部作用处投影点周围, 具有明显的局部破坏特征, 涉及到爆炸波在钢筋混凝土结构内部非常复杂而难以确定的传播问题、混凝土应变率效应等。所以点爆炸作用下钢筋混凝土结构局部破坏效应问题理论研究进展较缓慢^[1-2], 野外交触爆炸实验是主要的研究方法。

近年来, 高强高性能混凝土得到迅速发展和日趋广泛的应用, 尤其是钢纤维混凝土已被证明具有良好的抗爆性能。从 20 世纪 80 年代开始进行的抗爆性能研究, 获得了丰富的实验资料^[3-4], 在我国也有有关的研究^[5-6]。本文中在前人的实验基础上, 针对中高强钢纤维钢筋混凝土板接触爆炸破坏效应进行 94 炮野外化爆实验, 详细介绍实验参数设计, 系统分析不同装药量及结构参数条件下钢纤维钢筋混凝土板接触爆炸破坏特征、典型破坏形态, 试图为钢纤维钢筋混凝土结构抗爆设计提供依据。

2 实验设计

主要研究中高强钢纤维钢筋混凝土板抗爆炸局部破坏效应, 实验设计包含构件尺寸、配筋参数、钢纤维混凝土掺量以及钢纤维混凝土强度等。

2.1 实验构件尺寸设计

图 1 是钢纤维钢筋混凝土板式构件接触爆炸实验示意图。实验时, TNT 集团装药放置在板构件正面中心处, 装药量为 0.2~16.0 kg, 每个试件爆炸一次。爆炸实验后详细记录每个试件对应的装药量, 以及试件破坏区域、爆坑尺寸、震塌坑尺寸、剩余板厚度、裂纹分布及走向规律、裂纹长宽等宏观破坏特征。试件厚度分为 5 种, 即 10、20、25、30 和 40 cm, 长宽为 210 cm×200 cm, 试件采用垫支方式支撑。试件参数见表 1, h 为板厚, f_c 为抗压强度。

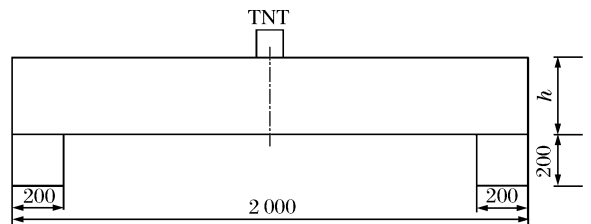


图 1 局部破坏效应实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of local damage effect

2.2 试件配筋参数

依据板厚度, 参考规范中的配筋要求以及以往实验总结结果, 对 10、20 和 25 cm 厚的板构件, 采用 1 层双向配筋,

* 收稿日期: 2008-02-22; 修回日期: 2008-09-28

作者简介: 李晓军(1969—), 男, 副研究员。

配筋间距 20 cm;对 30 cm 厚的板构件,采用 2 层双向配筋,配筋间距 20 cm;对 40 cm 厚的板构件,配筋层数有 2 层和 3 层 2 种,配筋间距有 7.5、10 和 15 cm 等 3 种,见表 2。钢筋直径均为 12 mm。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of test components

试件	h/cm	f_c/MPa
A1~A20	10	77.7~118.6
B1~B14	20	77.7~118.6
C1~C19	25	37.5~86.1
D1~D12	30	77.7~118.6
E1~E29	40	39.7~85.0

表 2 40 cm 试件配筋参数

Table 2 Distributed steel parameters

试件	配筋方式	配筋间距/cm
E7~E8	3 层双向	15
E19~E22	3 层双向	10
E17~E18	3 层双向	7.5
E1~E6, E9~E16	2 层双向	10
E23~E29	2 层双向	10

2.3 钢纤维掺量

重点研究了普通钢筋混凝土在成型施工工艺相同情况下钢纤维的掺量范围。通过预备实验研究表明,在 C30~C90 混凝土强度范围内钢纤维掺量宜在 3% 以下;钢纤维掺量达到 3% 以上时,不容易保证搅拌和振捣过程中钢纤维分布的随机性和均匀性,使得钢纤维钢筋混凝土强度出现不均匀甚至严重缺陷,导致结构整体强度显著下降。因此,选定的钢纤维掺量是 0~3%。

2.4 钢纤维混凝土强度

实验着眼于工程上常规施工工艺的高强高性能钢纤维混凝土,兼顾以往实验情况,因而设计的钢纤维混凝土强度为 C30~C90,并进行专门的配合比设计和实验。为了准确地获得每个试件的实际钢纤维混凝土强度,在每个试件浇筑同时制作标准立方体试件,并在相同条件下养护,然后在材料试验机上实验,获得对应于每个试件的实际立方体抗压强度。通过实验获得的钢纤维混凝土的实际立方体强度范围为 37.5~118.6 MPa。

3 实验结果与分析

部分实验结果如表 3 所示。实验结果表明,钢纤维钢筋混凝土结构接触爆炸破坏形态与结构厚度、装药量紧密相关,也与钢纤维掺量有关。总的来说,结构厚度不同,装药量不同,钢纤维掺量不同,破坏形态也不一样。归纳起来,有以下 5 种典型破坏形态。

表 3 钢纤维钢筋混凝土板爆后破坏宏观描述

Table 3 Macroscopic description of damage for steel fiber reinforced concrete plate after explosion

试件	$w_{\text{steel}}/\%$	Q_{TNT}/kg	迎爆面破坏宏观描述	背爆面破坏宏观描述
C1	0	0.2	爆坑深 6.6 cm、直径 33 cm	无可视裂纹出现;板无明显的整体变形
D6	3	0.6	爆坑深 5 cm、直径 28 cm	3 条放射状裂纹,长约 15 cm,宽不到 0.1 mm,锤击实声
E27	2	1.6	爆坑深 5.5 cm、直径 36 cm	3 条放射状微裂纹,长约 15 cm,宽约 1.5 mm,裂纹唇边有少量混凝土掉块,锤击实声
E7	0	1.6	爆坑深 9.5 cm、直径 51 cm,爆坑内 4 根钢筋裸露	1 个直径 180 cm 的半圆弧裂缝,裂缝唇边明显掉块,锤击空声,无明显变形
E22	0	1.6	爆坑深 9 cm、直径 50 cm,爆坑内 6 根钢筋裸露	1 个直径 116 cm 的半圆弧裂缝,裂缝唇边明显掉块,锤击空声,无明显变形
A16	2	0.064	爆坑深 2 cm、直径 12 cm	震塌坑深 1.1 cm、直径 10.5 cm,震塌坑四周出现 0.1~0.3 mm 可视放射状裂纹
A2	1	0.228	爆坑深 3.5 cm、直径 20 cm,底部轻敲空声,处于临界贯穿;清理后贯穿孔直径 2.5 cm,贯穿孔边缘深度 3.5 cm	震塌坑深 6.5 cm、直径 27 cm,震塌坑内可看到贯穿小孔透过的光线

第 1 种典型破坏形态为爆炸成坑现象(如图 2 所示)。集团装药爆炸作用下脆性材料很容易在爆炸处形成爆炸坑,钢纤维钢筋混凝土也不例外。在药量不大或板足够厚的情况下,钢纤维钢筋混凝土只在正面装药处产生局部爆炸成坑现象,其他部分没有宏观破坏现象,爆坑以外没有肉眼可视裂纹;板背面没有可视裂纹出现,锤击实声。

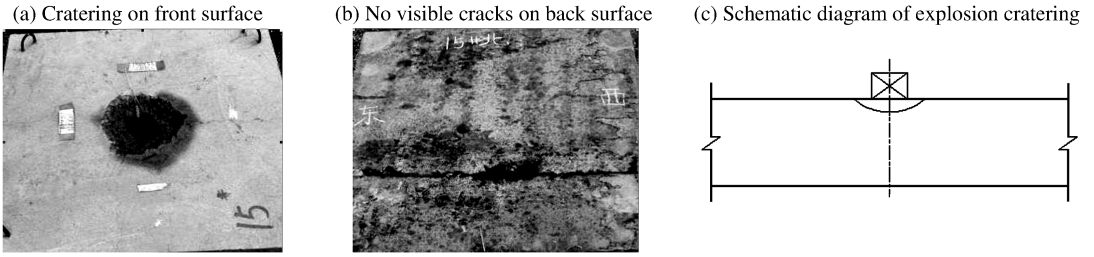


图 2 爆炸成坑现象

Fig. 2 Explosion cratering phenomena

第 2 种典型破坏形态为临界震塌现象(如图 3 所示)。随着药量增加,或者板厚度减小,爆炸不但在爆炸处爆炸成坑,而且爆炸波在结构内部传播至板背面形成反射拉伸波,拉伸波强度刚好为钢纤维混凝土材料的动态抗拉强度,这时钢纤维钢筋混凝土板背爆面爆心投影点附近可以看到放射状微小的裂纹,裂纹宽度 4 mm 以下,裂纹唇边无明显掉块,锤击实声。



图 3 临界震塌现象

Fig. 3 Critical spalling phenomena

第 3 种典型破坏形态为爆炸震塌现象(如图 4 所示)。当反射拉伸波强度稍高于(钢纤维)混凝土材料动态抗拉强度时,(钢纤维)钢筋混凝土板在背爆面以爆心投影点为中心出现环形裂缝,裂缝宽度大于 4 mm,裂缝唇边出现掉块,锤击空声,不易清理,见图 4(a)。随着装药量增加,爆炸波及其反射拉伸波强度进一步提高,爆炸震塌破坏更加严重。这时对于钢筋混凝土板,板背面爆心投影点附近产生严重的震塌破坏,震塌坑较大(具体尺寸与板厚度有关),震塌坑内混凝土震碎掉落,钢筋网上混凝土明显被震松并有部分穿过钢筋网眼飞离出去,外层钢筋网向下弯曲变形严重(可达十几厘米),较易清理,见图 4(d)~(e)。

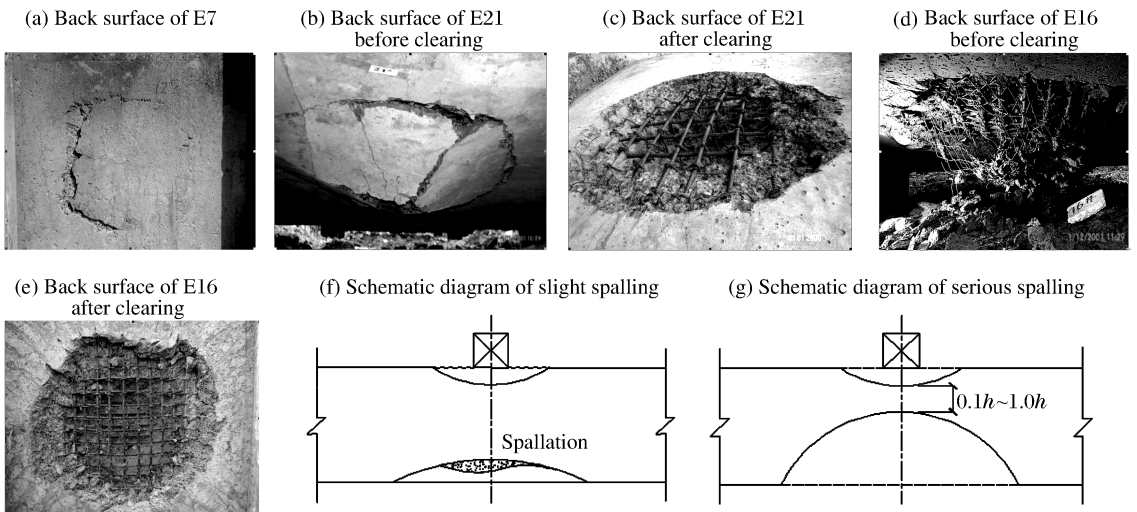


图 4 爆炸震塌现象

Fig. 4 Explosion spalling phenomena

第 4 种典型破坏形态为临界贯穿现象(如图 5 所示)。当装药量进一步增加时,爆炸震塌坑深度进一步增加。当爆坑深度接近结构厚度的三分之一,这时在结构反面的震塌坑深度接近结构厚度的三分之二,爆坑与震塌坑相互搭接,清理前爆坑底部可看见贯穿孔或看不到贯穿孔但锤击空声,可看到的贯穿孔被混凝土碎块(粉末)全部堵住或部分堵住,即清理前贯穿孔仍残留有酥状混凝土碎块;清理后爆坑和震塌坑完全贯通,贯穿孔边缘位于板厚度的约三分之一处。

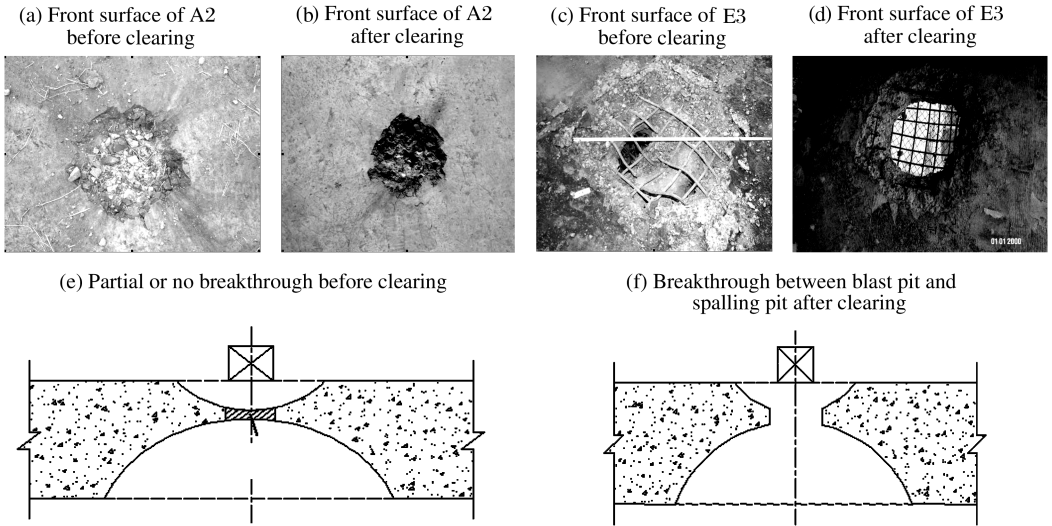


图 5 临界贯穿现象

Fig. 5 Critical perforating phenomena

第 5 种典型破坏形态为爆炸贯穿现象(如图 6 所示)。当装药量足够大时,(钢纤维)钢筋混凝土迎爆面爆坑和背爆面震塌坑相互贯通,不需要任何清理条件下爆坑底部的贯穿孔没有残留任何(钢纤维)混凝土碎块。一般情况下,贯穿孔边缘沿位于板厚度的约三分之一处。

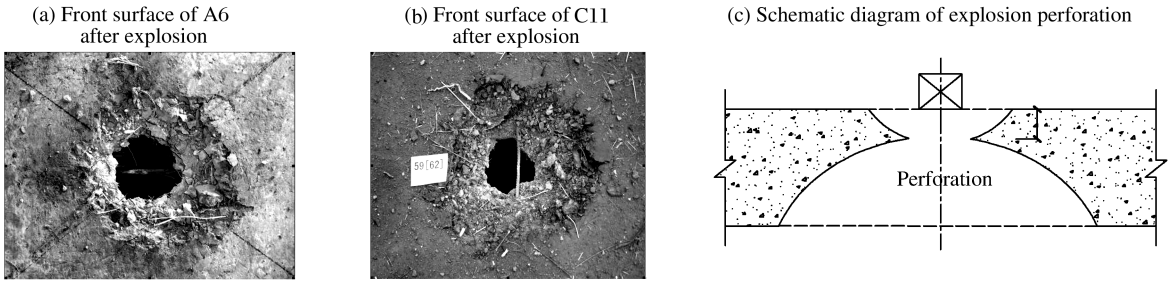


图 6 爆炸贯穿现象

Fig. 6 Explosion perforating phenomena

4 结 论

(1)进行了 94 个钢纤维钢筋混凝土板接触爆炸实验,有 10、20、25、30 和 40 cm 等 5 种板厚度;有单层配筋、双层配筋和三层配筋,配筋间距有 7.5、10、15、20 cm 等 4 种;钢纤维掺量有 0、1.00%、1.22%、2.00%、3.00% 等 5 种;钢纤维混凝土立方体抗压强度最低为 37.5 MPa,最高为 118.6 MPa;装药量为 0.064~16 kg;实验参数选取典型,覆盖面宽,实验结果翔实可靠,是钢纤维钢筋混凝土结构爆炸震塌设计计算方法研究的重要依据。

(2)实验研究结果表明,单层介质-钢纤维钢筋混凝土结构接触爆炸破坏形态与结构厚度、装药量、钢纤维掺量等因素紧密相关,但总的来说,依不同破坏程度可归纳为 5 种典型破坏形态,即爆炸成坑现象、临界震塌现象、爆炸震塌现象、临界贯穿现象和爆炸贯穿现象。

(3)实验结果的研究分析表明,对爆炸成坑而言,装药量与混凝土的抗压强度是主要影响因素,而试件表面的配筋参数、0~3%范围内的钢纤维掺量对爆炸成坑的影响较小;对结构震塌而言,混凝土强度对结构抗震塌能力的影响不明显,而钢纤维掺量和配筋参数则影响显著。配筋层距、间距越小,配筋率越高,结构的抗震塌能力越强;在所研究的钢纤维掺量范围内,钢纤维掺量的增加可显著提高结构的抗震塌能力。

参考文献:

- [1] 郑全平,周早生,钱七虎,等. 防护结构中的震塌问题[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1393-1398.
ZHENG Quan-ping, ZHOU Zao-sheng, QIAN Qi-hu, et al. Spallation in protective structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(8):1393-1398.
- [2] 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.
ZHENG Quan-ping, QIAN Qi-hu, ZHOU Zao-sheng, et al. Comparative analysis of scabbing thickness estimation of reinforced concrete structure[J]. Engineering Mechanics, 2003,20(3):47-53.
- [3] 周丰峻. 常规武器效应与结构相互作用国际会议专题报告[R]. 洛阳:总参工程兵科研三所,1997.
- [4] 李晓军,张殿臣,李清献,等. 常规武器破坏效应与工程防护技术[R]. 洛阳:总参工程兵科研三所,2001.
- [5] 江水德,陈肇元,郑全平. 配筋高强混凝土结构抗爆炸局部破坏性能研究[C]//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集. 长春,2004:477-481.
- [6] 江水德,陈肇元,郑全平. 钢纤维高强混凝土结构抗爆炸局部破坏性能研究[C]//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集. 长春,2004:482-496.

Local damage effects of steel fiber reinforced concrete plates subjected to contact explosion

LI Xiao-jun^{1, 2}, ZHENG Quan-ping², YANG Yi^{2*}

- (1. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China;*
2. *The Third Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang 471023, Henan, China*)

Abstract: On the base of the known experimental researches, 94 field experiments of chemical explosion were carried out to investigate contact explosion damage effects of middle-high strength steel fiber reinforced concrete plates. The design of test parameters was introduced, and damage characteristics of steel fiber reinforced concrete plates were analyzed under the contact explosion conditions with different charges and structure parameters. These damage characteristics include explosion cratering, critical spalling, explosion spalling, critical perforating and explosion perforating. The damage parameters corresponding to five kinds of typical damage forms were obtained. Preliminary analysis of the main influence factors on explosion cratering and structure spalling can provide a reference for the classification of explosion local damage and the design of local-damage-resisting structures.

Key words: mechanics of explosion; damage parameters; contact explosion; steel fiber reinforced concrete; local damage

* Corresponding author; YANG Yi

E-mail address: csuyycl@163.com

(责任编辑 丁峰)