

文章编号: 1001-1455(2005)02-0157-06

# 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\*

胡金生<sup>1</sup>, 杨秀敏<sup>1</sup>, 周早生<sup>2</sup>, 邓国强<sup>1</sup>, 唐德高<sup>2</sup>

(1. 北京参保设计研究院, 北京 100850;

2. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 采用钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、钢筋混凝土 3 种材料共 24 块板试件进行了接触爆炸试验。对试验现象进行了描述, 由迎爆坑尺寸拟合分析得到了 3 种材料的爆炸介质压缩系数。采用 Ляхов 公式对试验测得的土压峰值进行了拟合分析, 结果表明, 随试件厚度的增加, 砂土中应力波峰值衰减更显著, 相同比例爆距的土压值明显减小, 并由试验结果得到了底部有土垫层介质情况下混凝土板临界爆炸贯穿厚度计算公式。

**关键词:** 爆炸力学; 破坏效应; 接触爆炸; 纤维增强混凝土; 爆坑

**中图分类号:** O38; TU528.572

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引言

纤维增强混凝土按纤维力学性能可分为高弹模纤维混凝土和低弹模纤维混凝土。高弹模纤维混凝土在未产生裂纹之前, 因纤维弹模较高, 复合材料的弹性模量随纤维掺量增加而增加, 开裂后主要是纤维受力。低弹模纤维混凝土一般易发生较大的蠕变, 在裂缝形成发展阶段, 纤维承受大部分应力, 在持续的高应力作用一定时间后, 复合材料会产生显著的变形。目前, 高、低弹模纤维混凝土中比较典型的和应用广泛的分别是钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土, 国内外对其静力性能开展了大量研究, 对其爆炸作用下材料局部破坏特性研究尚不多见, 本文的研究就是围绕这 2 种纤维混凝土展开的。

混凝土构件接触爆炸局部破坏效应研究对防护工程和爆破工程都极其重要, 然而, 公开发表的这方面的研究成果并不多, 从近年发表的研究成果看<sup>[1~5]</sup>, 对混凝土接触爆炸破坏问题理论上的认识尚不成熟, 研究大多针对底部临空的混凝土板, 对底部有垫层情况下的试验目前开展很少。本文中对底部为砂土和天然密实粘土的纤维混凝土板试件进行了接触爆炸试验, 对 3 种材料的抗爆性能、试件厚度对底部介质应力波峰值的影响进行了分析研究, 其结果对抗爆结构材料以及成层式地下防护结构研究具有一定意义。

## 2 试验概况

试验在解放军理工大学试验场分 2 次进行。

第 1 次试验将试件放置在天然密实粘土上, 共制作 C40 钢筋混凝土板、钢纤维混凝土板、聚丙烯纤维混凝土板 12 块, 试件尺寸为  $0.65\text{ m} \times 0.65\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ , 板配筋为  $\varnothing 12@150\text{ mm}$ , 每种材料的 4 块试件中, 2 块试件试验药量为  $0.2\text{ kg}$ , 另 2 块实验药量为  $0.4\text{ kg}$ 。

第 2 次试验试件放置在爆坑的砂土上, 砂土中埋置了 12 个压力传感器(如图 1 所示, 图中  $H$  为试件  $1/4$  边长)。试验共制作试件 12 块, 板配筋为  $\varnothing 12@100\text{ mm}$ , 试件尺寸及试验药量如表 1 所示。

两次试验试件材料情况如下: C40 钢筋混凝土; 钢纤维混凝土, 钢纤维体积分数  $\varphi_f = 0.02$ , 平均长度

\* 收稿日期: 2004-02-24; 修回日期: 2004-12-10

作者简介: 胡金生(1974—), 男, 博士, 工程师。

10 mm,长径比约为 20;聚丙烯纤维混凝土,纤维含量  $G_f=1.2 \text{ kg/m}^3$ ,平均长度 30 mm。试件混凝土配比为:水泥、砂、石、水、JM-B 分别为 445、586.67、1248.33、170、1.83  $\text{kg/m}^3$ 。

表 1 第 2 次爆炸试验试件参数  
Table 1 Specimen parameters of secondary explosion experiment

试件材料	试件厚度/cm	试件尺寸/ $\text{m}^2$	试件数量	试验药量/kg
钢筋混凝土	10	$1.05 \times 1.05$	3	0.4
聚丙烯纤维混凝土	10	$1.05 \times 1.05$	3	0.4
聚丙烯纤维混凝土	20	$1.55 \times 1.55$	3	1.4, 1.6
聚丙烯纤维混凝土	25	$2.55 \times 2.55$	3	1.0, 1.4, 1.8

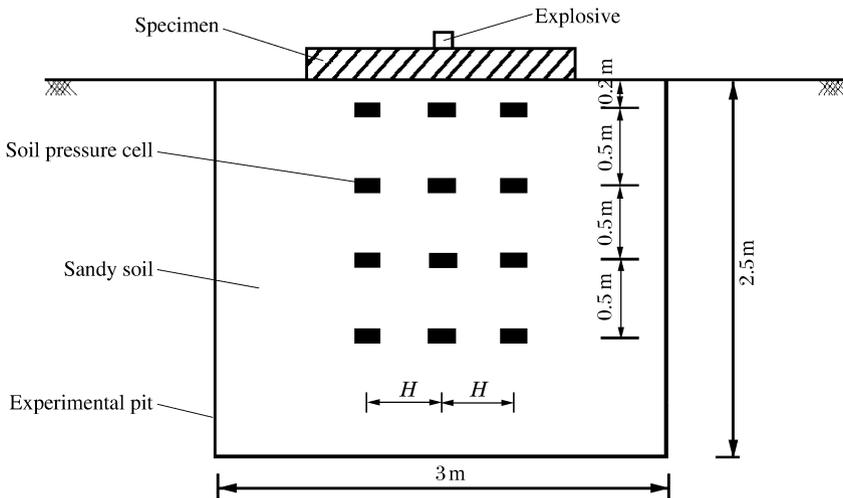


图 1 试验布置示意图

Fig. 1 Experimental setup

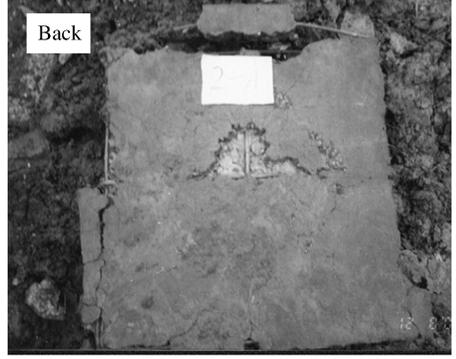
### 3 试验现象

图 2 给出了第 1 次试验中 0.4 kg 药量下 3 种材料试件正面与背面的破坏形态。试验中,钢筋混凝土板由于材料的韧性较差,抗拉强度较低,其破坏程度也最严重,主要表现在:板四边剥落破坏严重,剥落区的长度和宽度均大于其余两种材料的试件;4 个钢筋混凝土试件均有板边缘钢筋脱落或断裂的现象发生。板背面破坏严重;0.4 kg 药量作用下的两块试件背部均发生震塌破坏,横纵向钢筋均裸露可见(见图 2(a))。4 块钢纤维混凝土试件爆炸后完整性均很好,试件的周边都没有发生剥落破坏;板表面裂缝相对少而细;4 块板中仅 1 块试件背面发生了轻微的震塌,其他 3 块背面完整性均较好(见图 2(b))。聚丙烯纤维混凝土试件破坏程度均好于钢筋混凝土试件,试件四周均有局部剥落的现象发生,但其剥落区的长度和宽度均小于相同药量下钢筋混凝土板剥落区的长度和宽度;板背面破坏情况也好于钢筋混凝土板,4 块试件背面均未发生震塌破坏(见图 2(c))。

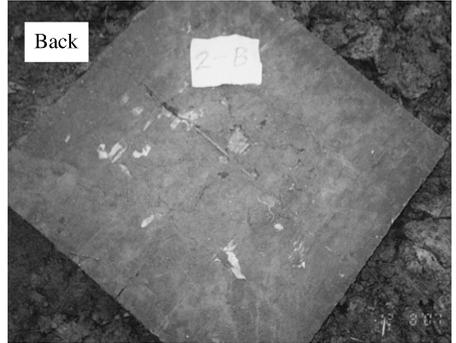
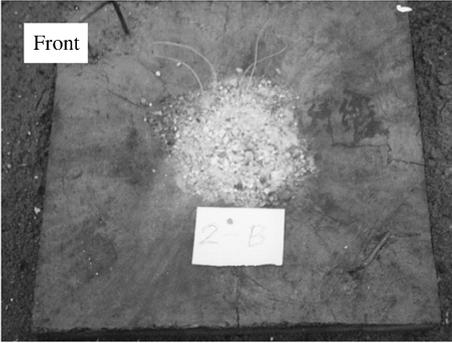
第 2 次试验中,0.4 kg 药量下的 6 块试件中 3 块钢筋混凝土试件均发生了贯穿破坏,并且其爆坑直径明显比聚丙烯纤维混凝土试件的大,而聚丙烯纤维混凝土试件仅有 1 块发生了贯穿破坏,这表明,聚丙烯纤维的加入能有效增加混凝土材料抗爆炸局部破坏的能力。

试验中 15 块试件的破坏形态基本类似:板表面迎爆坑呈漏斗状,表面裂缝以平行于四边的环向裂缝为主,有十字形径向裂缝和少量径向放射状裂缝;板背面中心位置出现了贯穿、震塌、鼓起有粗裂缝、略微鼓起有裂缝、平整有明显可见的网状裂缝这几种破坏形态,板背面裂缝以十字形和放射状径向裂缝为主,部分试件背面有明显可见的环向裂缝;板四周侧面中间部位基本都出现了竖向裂缝(见图 3)。

(a) Steel concrete specimen



(b) Steel fiber reinforced concrete specimen



(c) Polypropylene fiber reinforced concrete specimen

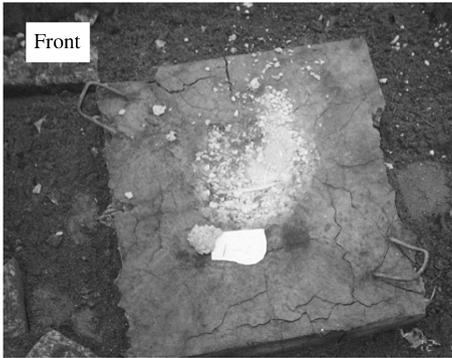


图 2 3 种材料试件正面与背面破坏形貌

Fig. 2 Front and back damage on three different specimens

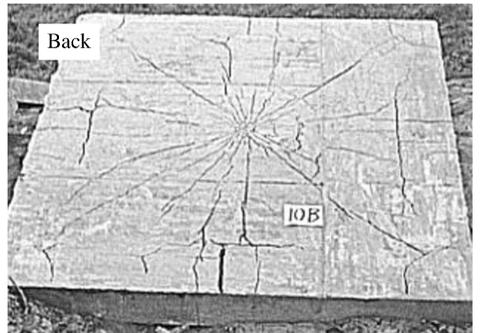
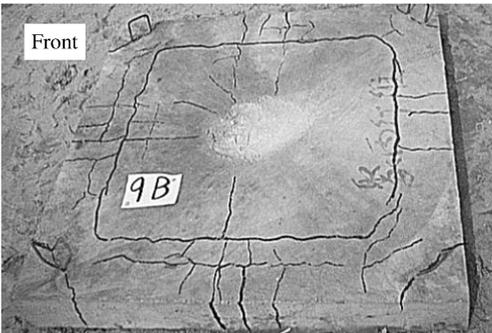


图 3 试件正面与背面的裂缝分布

Fig. 3 Crack distribution on the front and back sides

## 4 试验结果分析

### 4.1 爆炸漏斗坑尺寸分析

图4给出了第1次试验中3种材料的爆坑平均直径 $\bar{d}$ 与平均深度 $\bar{l}$ ,从中可以看出钢筋混凝土爆坑的直径和深度最大,而钢纤维混凝土爆坑直径与深度均最小,其直径和深度与钢筋混凝土相比分别减小了60、11 mm;聚丙烯纤维混凝土爆坑直径和深度比钢筋混凝土的分别减小了30、6 mm。

接触爆炸时钢筋混凝土的漏斗坑直径 $d$ 和深度 $l$ 可由下式计算<sup>[6]</sup>

$$d = k\sqrt[3]{C}, \quad l = K_a\sqrt[3]{C} - 0.5e \quad (1)$$

式中: $C$ 为装药量,kg; $k$ 、 $K_a$ 均为反映介质抗爆炸性能的系数, $e$ 为装药高,m。本次试验0.4 kg药量下3种材料破坏情况的差别更为明显,在此选用0.4 kg药量下的爆坑尺寸数据对 $k$ 、 $K_a$ 进行计算,其计算结果如表2所示。文献<sup>[6]</sup>所给出C40钢筋混凝土的 $k$ 、 $K_a$ 值分别为0.433和0.12,这与表2中算出的数值较为符合。

由图4的爆坑尺寸对比情况与表2中参数计算结果可以看出,钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土的抗爆性能明显好于钢筋混凝土。

### 4.2 底部有土垫层介质情况下混凝土板临界爆炸贯穿厚度计算

底部有土垫层情况与底部临空情况的钢筋混凝土板的爆炸局部破坏作用有所不同。一方面板底土垫层阻止了试件底部隆起、震塌以致脱落趋势,另一方面爆轰波大部分能量传到土体中,从而减轻了爆轰对试件的局部破坏作用,使得混凝土板更不容易发生贯穿破坏。地下结构顶板接触爆炸的临界贯穿厚度通常采用下列经验公式进行计算<sup>[7]</sup>

$$H_g = K_g(mK_a\sqrt[3]{C} - 0.5e) \quad (3)$$

式中: $m$ 为堵塞系数(对炸药上部无岩土介质情况取1), $K_a$ 为材料爆炸压缩系数, $K_g$ 为冲击、爆炸不贯穿系数。

由本次试验结果可以认为,底部介质为天然密实粘土时板厚 $h=0.1$  m的钢筋混凝土试件在药量0.4 kg炸药接触爆炸时,试件达到了临界贯穿破坏状态;底部为砂土时, $h=0.1$  m的钢筋混凝土试件在药量0.4 kg炸药接触爆炸时,试件已经发生贯穿破坏; $h=0.1$  m的聚丙烯纤维混凝土试件在相同药量下达到临界贯穿破坏状态。根据以上结果,在(3)式中引入考虑底部介质影响的系数 $K_m$ ,将公式修正为

$$H_g = K_m K_g(mK_a\sqrt[3]{C} - 0.5e) \quad (4)$$

根据试验结果,底部为天然密实粘土时 $K_m$ 取为0.88,底部为砂土时 $K_m$ 取为0.97, $K_g$ 取1.5,按照(4)式所算得的C40钢筋混凝土,聚丙烯纤维混凝土临界爆炸贯穿厚度与试验结果基本吻合。

### 4.3 试件厚度对底部砂土应力波传播影响分析

常规武器爆炸情况下,确定岩土介质中应力波峰值对于计算地下防护结构荷载是至关重要的。目前,国内外规范中在计算弹体在遮弹层表面,或底部有土垫层的结构板表面爆炸情况下地冲击效应时均

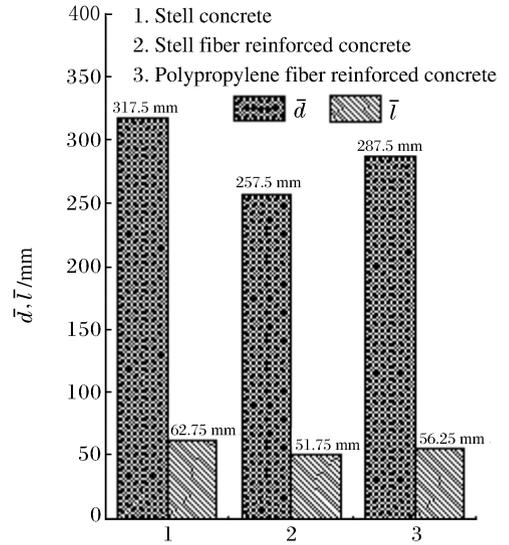


图4 试件爆坑尺寸

Fig.4 Crater size of specimens

表2 爆坑参数计算结果

Table 2 Computation result of crater parameters

材料	$\bar{d}$ /mm	$\bar{l}$ /mm	$k$	$K_a$
钢筋混凝土	315	75.5	0.428	0.12
钢纤维混凝土	270	58.0	0.366	0.10
聚丙烯纤维混凝土	290	64.0	0.394	0.11

没有考虑遮弹层或板的影响。前苏联的 ЛЯХОВ 总结了一系列爆炸试验,提出爆炸土中自由场最大压力

$$\sigma = K(\sqrt[3]{W}/R)^\lambda \tag{5}$$

式中: $R$  为到爆心的距离, $W$  为装药量, $K$  为与土壤介质及埋设条件有关的常数, $\lambda$  为与土壤介质有关的常数。为研究不同厚度混凝土板在接触爆炸时对底部介质应力波传播的影响,采用公式(5)对聚丙烯纤维混凝土试件试验土压测试值进行拟合分析,拟合结果如图 5 所示,由图可以看出,当试件厚度  $h$  分别为 0.1、0.2、0.25m 时, $\lambda$  分别为 2.986、2.774、2.652,由此可见,随着试件厚度的增加,砂土中应力波峰值衰减更显著。

美国 TM5-855-1 规范<sup>[8]</sup>中,岩土介质中化爆产生应力波压力峰值采用下式计算(量纲已由原英制单位转为国际标准单位):

$$p_0 = 48.77f(\rho c)(2.52R/W^{1/3})^{-n} \tag{6}$$

式中: $p_0$  为峰值应力,Pa; $f$  为爆炸耦合系数; $\rho c$  为岩土介质波阻抗, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; $R$  为到爆点的距离,m; $W$  为装药量,kg。

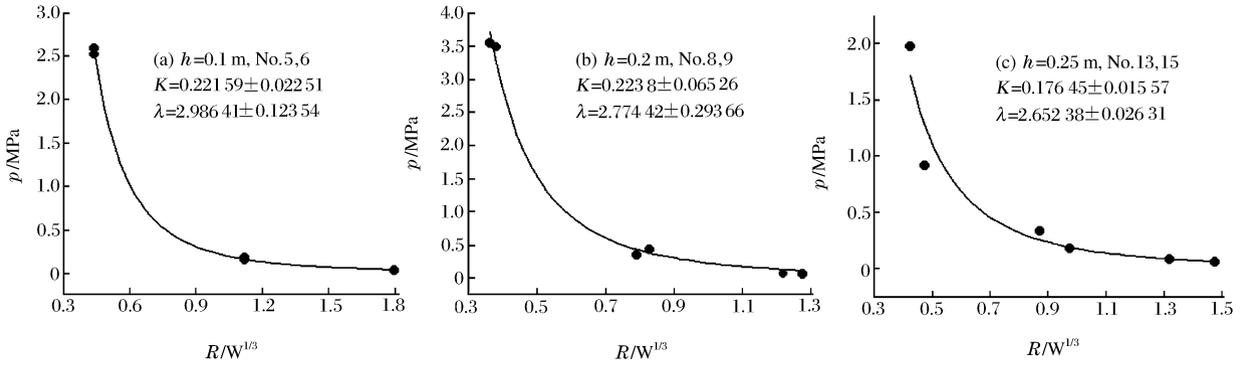


图 5 聚丙烯纤维砼试件土压测试拟合结果

Fig. 5 Soil pressure fitting results of polypropylene fiber reinforced concrete specimen

(6)式建立在大量试验和分析基础上,当  $0.12 < R/W^{1/3} < 1.59$  时,公式有较好的可信度,与试验符合较好<sup>[9]</sup>。采用(6)式对砂土介质表面接触爆炸情况下土压峰值进行计算,试验砂土测试容重为  $1599.8 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,与 TM5-855-1 中“密实的不良级配干沙”容重( $1666.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ )很相近,为此计算中取其参数  $f=0.14$ , $\rho c=560 \text{ Mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , $n=2.75$ ,计算所得曲线与 3 种板厚试验拟合曲线对比情况如图 6 所示。由图可见,比例爆距相同时,TM5-855-1 公式计算值明显比聚丙烯纤维混凝土板接触爆炸情况下试验拟合值大,且随试件厚度增加相同比例爆距的土压值明显减小,减小值在比例爆距较小时更为明显。

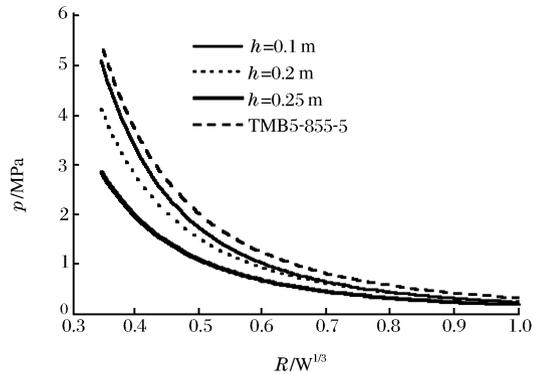


图 6 拟合结果与计算结果比较

Fig. 6 Contrast of fitting and computation result

### 5 结 论

(1) 3 种材料试件中,钢纤维混凝土试件在接触爆炸作用下试件完整性最好,迎爆坑最小,破坏程度最轻;与钢筋混凝土试件相比,聚丙烯纤维混凝土试件完整性较好,抗爆炸贯穿性能有所提高。由试验得出的 C40 钢筋混凝土、钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土三种材料爆炸压缩系数  $K_a$  取值分别为 0.12、0.10、0.11。

(2) 试验测试土压拟合结果表明:随试件厚度增加,砂土中应力波峰值衰减更显著,并且相同比例

爆距的土压值明显减小,减小值在比例爆距较小时更为明显。

(3) 根据接触爆炸试验试件破坏的总体结果对计算遮弹层爆炸临界贯穿厚度的公式进行了修正,得到了考虑不同底部介质影响的计算公式及计算参数取值。

### 参考文献:

- [1] 尹志华,陈大年. 爆炸致混凝土破坏的实验研究[J]. 爆炸与冲击,1999,19 增刊:126—130.  
YIN Zhi-hua, CHEN Da-nian. Experimental study on damage to concrete from explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19 suppl:126—130.
- [2] Kraus D, Roetzer J F, Thoma K. The interaction of high explosive detonations with concrete structures[A]. Computational Modeling of Concrete Structures[C]. Innsbruck, Österreich, 1994:22—25.
- [3] Nush P T, Vallabhan C V G. Spall damage to concrete walls form close-in cased and uncased explosions in Air[J]. ACI Structual Journal, 1995,92(6):680—688.
- [4] 柳景春,方秦. 内衬钢板混凝土组合结构抗震塌性能分析[A]. 中国土木工程学会防护工程学会第六次学术年会论文集[C]. 昆明,1998:124—129.
- [5] 卢国强. 钢筋混凝土-钢板组合结构抗爆作用的试验研究与动力分析[D]. 上海:同济大学结构理论研究所,1997.
- [6] 解放军总参兵种部. 国防工程设计规范[Z]. 北京:解放军工程兵司令部,1976.
- [7] 俞儒一. 防护结构计算原理[M]. 南京:南京工程兵工程学院,1989.
- [8] TM5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Department of the Army[S].
- [9] 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[M]. 洛阳:总参工程兵科研三所,2001.

## Experimental investigation on contact explosion damage effect to fiber reinforced concrete slab with soil bedding

HU Jin-sheng<sup>1\*</sup>, YANG Xiu-min<sup>1</sup>, ZHOU Zao-sheng<sup>2</sup>,

DENG Guo-qiang<sup>1</sup>, TANG De-gao<sup>2</sup>

(1. *Building Design & Research Academy of Canbao, Beijing 100850, China;*

2. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)*

**Abstract:** Experimental study of the response of the concrete, steel fiber reinforced concrete and polypropylene fiber reinforced concrete slab under blast loading was performed. The macroscopic damage is described, and the explosive compression coefficient values of three kind materials are obtained through apparent crater size fitting analysis. The Ляхов formula is used to fit the measured peak stress. The result shows that as the specimen thickness increases, the peak stress value will decrease, and the pressure value at same explosion distance will decrease as well. A formula that can be used to calculate the explosion perforation depth is obtained

**Key words:** mechanics of explosion; damage effect; contact explosion; fiber reinforced concrete; crater

\* Corresponding author: HU Jin-sheng

E-mail address: jinsheng\_hu@sohu.com

Telephone: 010-66860210