

# 接触爆炸作用下钢板-钢纤维混凝土 遮弹层设计方法(I)

王明洋, 张胜民, 国胜兵

(中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 在试验分析基础上, 采用单自由度体系模型, 考虑在钢纤维混凝土组合板局部破坏时, 钢纤维的抗拔作用、钢板薄膜力作用和柔性土介质的耗能等主要影响因素。给出了能够用于钢板-钢纤维混凝土遮弹板接触爆炸下的极限设计分析的实用方法。通过数值计算结果与试验结果的对比, 验证了此方法的实用及可靠性。

关键词: 遮弹层; 钢纤维混凝土; 局部破坏; 接触爆炸

\* 中图分类号: O383 文献标识码: A

## 1 引言

常规武器直接爆炸作用于人防结构产生的强荷载作用问题, 国内外学者研究得都还很不够。然而在现代战争中, 这一类荷载作用的数量和危险性却在增长, 这一类荷载作用对防护结构的要求与承受冲量荷载(非直接作用的爆炸荷载)的防护结构要求在本质上很接近, 同时又有一定的区别, 尤其是在直接爆炸荷载作用下, 既要考虑结构的整体变形, 又要考虑其局部变形等等。在钢板-钢纤维混凝土组合遮弹板试验中<sup>[1]</sup>, 装药直接作用于钢纤维混凝土板上, 在接触处作用力瞬间达吉帕, 但作用面积又相当小, 当板厚相对较小和纤维含量较低时, 便在爆源附近产生局部动力冲切破坏。主要特点是在迎爆面形成爆炸漏斗坑, 其下形成爆炸震塌块, 是一种局部冲切破坏现象。

根据上述对承受直接爆炸作用的遮弹板爆炸效应的描述, 我们建立了钢纤维混凝土组合板的局部极限状态动力破坏分析模型。

## 2 遮弹板极限设计准则

人防工事依据结构的重要性可以建立下述极限状态:

$R_1$  ——在结构中不允许有显著的整体和局部残余应变;

$R_2$  ——在结构中允许有显著的整体和局部残余应变, 但不允许发生整体破坏或局部破坏(震坍, 贯穿);

$R_3$  ——在结构中允许发生整体破坏或局部破坏。

重要的人防工事其结构按  $R_1$  极限状态要求, 绝大多数防护结构按  $R_2$  极限状态要求, 那些其基本功能可能遭受直接爆炸荷载作用的结构按  $R_3$  极限状态要求。本文中遮弹板的极限动力分析按  $R_3$  极限状态来研究, 即在结构中允许发生局部贯穿破坏。

在选择规定极限状态的方法时, 宜从以下观点出发, 即把放弃正在使用的结构的危险尺度作为评价建立和使用该结构全部后果的准则。最通用、最典型的危险尺度是失效概率。常见的失效概率准则, 可以采取下述方式

\* 收稿日期: 2000-11-03; 修回日期: 2001-04-19

作者简介: 王明洋(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

$$P \leq P_u \quad (1)$$

式中:  $P$  为结构失效的全概率;  $P_u$  为适当的设计失效概率。  $P$  具有下面的结构形式

$$P = P_1 \circ P_2 \circ P_3 \quad (2)$$

式中:  $P_1$  为爆炸荷载发生的概率;  $P_2$  为爆炸荷载命中给定结构的概率;  $P_3$  为使该结构达到某种与给定的极限状态相对应的损坏程度的概率。

在结构的使用期限内, 爆炸荷载即使只出现一次, 其概率  $P_1$  也可以写成泊松定律的形式

$$P_1 = 1 - \exp(-t_L/t) \quad (3)$$

式中:  $t_L$  为设计的结构使用期限;  $t$  为作用重现周期。

概率  $P_2$  依赖于具体的结构方案和爆炸作用方式, 并根据对结构的使用条件和经验取值。如果符合等密度定律, 则有:  $P_2 = A_1/A_2$ ,  $A_1$  为发生爆炸作用单元接触区的面积;  $A_2$  为可能发生爆炸作用的表面的总面积。如果不满足强度条件或应变准则, 则达到给定极限状态的概率可取为 1。对于相反的情况, 该概率取为 0。

我们研究的结构为遮弹板, 设计应按极限状态  $R_3$  的要求, 则对于钢板-钢纤维混凝土组合结构, 有

$$P_3 = 1 - (1 - P^s)(1 - P^p) \quad (4)$$

式中:  $P^s$  为超过钢板极限应变的概率;  $P^p$  为进入贯穿极限状态的概率; 设计失效概率  $P_u$  的值根据以上的讨论确定。

本文中的极限设计准则为

$$y_{\max} \leq y_s \quad (5)$$

式中:  $y_s$  为钢板允许的极限位移,  $y_{\max}$  为塞块运动的最大位移。

在确定标准值时, 必须考虑材料和结构的工作特点。应变速率对钢板和钢纤维混凝土强度性能的影响是众所周知的。应变速率的影响可由主应力极限值乘以相应的动力强化系数来体现。

### 3 贯穿模型

#### 3.1 模型的建立和参数的确定

在钢纤维掺量及板厚一定的条件下, 根据宏观试验现象, 钢纤维混凝土板的局部破坏表现为冲切破坏, 假定破坏面与板面的夹角为  $\alpha$ , 破坏状态如图 1 所示。钢纤维混凝土在形成冲切破坏面后在空间上分成两个主要部分: 第一部分(I)为中心的轴对称破坏锥体(震塌块), 此部分在爆炸荷载直接作用下, 继续向下运动; 第二部分(II)为破坏锥体以外的钢纤维混凝土, 两部分之间开始时通过钢纤维的相互作用连接在一起。钢纤维混凝土的破坏在时间上分为两个阶段: 第一阶段混凝土被冲切破坏, 形成冲切破坏面; 第二阶段钢纤维被拔出。

为了便于实用设计, 采用单自由度体系模型, 此模型考虑在钢纤维混凝土组合板局部破坏时, 钢纤维的抗拔作用、钢板薄膜力作用和柔性土介质的耗能等主要影响因素。选取震塌块为研究对象, 锥体表

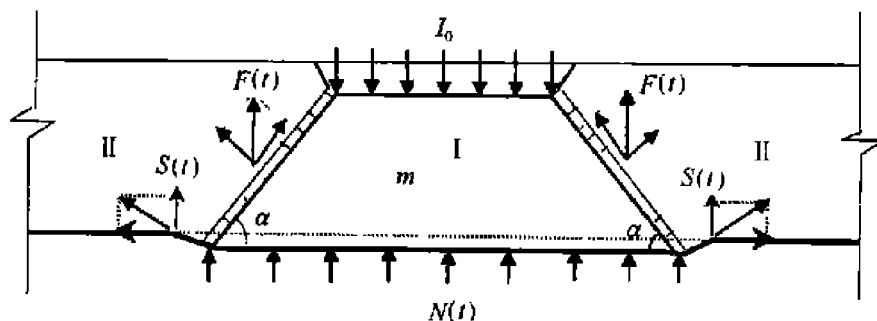


图 1 钢纤维混凝土局部破坏计算模型

Fig.1 Calculation model of local failure of steel-fiber concrete

面作用有爆炸冲量  $I_0$ , 作用位置在爆炸漏斗坑上; 底部作用有砂土的反力  $N(y, \dot{y})$  和钢板的薄膜力  $S(y)$ , 冲切破坏面上作用有混凝土的阻力和纤维的抗拔力  $F(y)$ , 其中  $y(t)$  为震塌块的位移。

爆炸冲量的计算采用文献[2]的表达式

$$I_0 = K_1 R^{1.2} (\eta_c C)^{0.6} \quad R = K_2 F^{0.5} \quad (6)$$

式中:  $K_1, K_2$  为系数;  $F$  为结构受爆面面积;  $C$  为等效装药量;  $\eta_c$  为装药形状数。

在动力荷载作用下, 细砂的地基反力是位移和速度的函数, 对于下方是无限介质的情况, 可以采用文献[3]的形式

$$N(y, \dot{y}) = C_1 S_D y + C_2 S_D \dot{y} \quad (7)$$

式中:  $\dot{y}(t)$  为震塌块速度;  $\mu$  为泊松比;  $C_1$  为地基刚度系数,  $C_1 = \rho a^2 (1 - \mu - 2\mu^2) / [(1 - \mu)(1 - \mu^2) \sqrt{S_D}]$ ;  $C_2$  为阻尼吸收系数,  $C_2 = \rho a$ ,  $\rho a$  为砂土波阻抗,  $a$  为砂土弹塑性波的传播速度;  $S_D$  为砂土反力作用面面积,  $S_D = 0.25\pi D^2$ 。第一项  $C_1 S_D y$  表示砂土的准静态反力, 第二项  $C_2 S_D \dot{y}$  表示砂土波动反力, 反映了震塌块运动而向土中散逸的能量。对于遮弹层下方有结构的情况, 遮弹层与结构之间为有限厚度的介质层, 由于波的来回反射, 可近似当作准静态问题处理。此时, 作用在震塌块下方的介质反力为

$$N(y) = S_D K y \quad (8)$$

式中:  $K$  为遮弹层下方介质动压缩模量。

开裂面形成后, 根据文献[1], 可写出冲切破坏面上的钢纤维的阻力和混凝土骨料的摩擦阻力为

$$F(t) = F(y) = S \tau_u \eta_u l_{0t} + Q = S \tau_u \eta_f \eta_v (V_f l_f / d_f) (4/l_f^2) [l_f/2 - y(t)]^2 + Q \quad (9)$$

式中:  $S$  为冲切破坏面面积,  $\tau_u$  为钢纤维表面摩擦强度,  $\eta_f$  为方向有效系数,  $\eta_v$  为体积率有效系数,  $d_f$  为钢纤维横截面直径,  $u_f$  为单根钢纤维截面周长,  $Q$  为沿贯穿塞块表面砼承受的内力,  $Q = R_{bt,d} S / \tan \alpha$ ,  $R_{bt,d}$  为混凝土轴向拉伸的计算动阻抗。

爆炸荷载作用下, 由于中心震塌块与钢纤维混凝土其它部分的错动(如图2所示), 钢板从钢纤维混凝土板上被撕裂下来, 钢板与钢纤维混凝土的粘结被破坏。并由此可知, 要保持钢板与钢纤维混凝土共同工作, 最好采取销钉锚固的方法, 使之能有效地控制钢板-钢纤维混凝土粘结面的撕裂破坏, 保证钢板能有效地发挥作用。

在文献[1]的试验中, 钢板很薄, 大多数仅 1mm, 厚的也只不过 2mm, 对于 200mm 厚的钢纤维混凝土震塌块来说, 钢板相当于一层膜, 给其提供的是一种膜力。钢板中心部分对震塌块的阻力采用轴对称来计算。钢板轴向拉伸力在垂直方向的投影  $S(y)$  主要取决于钢板在冲切面的斜率  $\tan \theta$ , 其计算公式可以写为

$$S(y) = \pi D \sigma_s h_s \sin \theta \quad (10)$$

式中:  $\sigma_s$ ,  $h_s$  分别为钢板的拉伸应力和厚度;  $\theta$  为震塌块底部边沿钢板的受拉方向与水平轴的夹角, 倾角  $\theta$  与震塌块的竖向位移  $y$ 、垫层砂的力学特性、钢板与钢纤维混凝土的粘结情况以及钢纤维混凝土的特性有关。

文献[4]研究了有销钉锚固的钢板-混凝土组合结构冲切破坏时的  $\theta$  角, 其计算公式为

$$\theta = \arctan(2y/d_s) \quad (11)$$

式中:  $d_s$  为相邻两销钉的间距,  $y$  为震塌块竖向位移。

对于没有销钉锚固的受力情况,  $\theta$  角的计算公式为

$$\theta = \arctan(y/h) \quad (12)$$

式中:  $h$  为结构厚度,  $y$  为震塌块竖向位移。

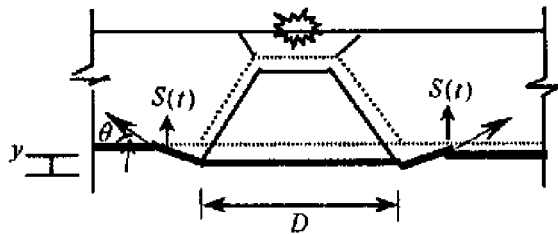


图2 钢板拉伸阻力计算模型

Fig.2 Calculation model of tension force of steel plate

钢板中的应力由钢板的应变  $\epsilon_s$  确定,与震塌块竖向位移  $y$  有关。把钢板考虑成弹塑性材料。加载时,钢板应力

$$\sigma_s = \begin{cases} \epsilon_s E_s & \epsilon_s \leq \epsilon_{sm} \\ \sigma_{sm} + (\epsilon_s - \epsilon_{sm}) E_t & \epsilon_{sm} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{max} \\ 0 & \epsilon_s \geq \epsilon_{max} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\epsilon_s$  为钢板中的应变,  $E_s$  为钢板弹性模量,  $E_t$  为钢板硬化模量,  $\epsilon_{sm}$  为钢板屈服时对应的应变,  $\epsilon_{max}$  为钢板的极限应变。

卸载时,钢板中的应力

$$\sigma_s = \begin{cases} \epsilon_s E_s & \epsilon_0 \leq \epsilon_{sm} \\ \sigma_{sm} + (\epsilon_0 - \epsilon_{sm}) E_t - (\epsilon_0 - \epsilon_s) E_s & \epsilon_{sm} \leq \epsilon_0 \leq \epsilon_{max} \\ 0 & \epsilon_0 \geq \epsilon_{max} \end{cases} \quad (14)$$

应变  $\epsilon_s$  与震塌块竖向位移  $y$  有关<sup>[5]</sup>,其关系式为

$$\epsilon_s = 0.5(\sqrt{(y^2 + h^2)} - h)/D \quad (15)$$

在本次试验中,没有销钉锚固,并且钢板很薄,可以采用式(12)来确定式(10)的  $\theta$  角。把式(12)代入式(10),便可求出与位移相关的钢板膜力

$$S(y) = \pi D \sigma_s h_s \sin[\arctan(y/h)] \quad (16)$$

### 3.2 运动方程的建立

如图 1,假设在爆炸瞬间,作用在受爆面的爆炸冲量全部传递到冲切塞块上,此后作用在塞块上的力有钢板薄膜力  $S(y)$ 、钢纤维混凝土阻力  $F(y)$ 、细砂的支持力  $N(y, \dot{y})$ ,根据牛顿第二运动定律,对冲切塞块有

$$\begin{cases} -S(y) - F(y) - N(y, \dot{y}) = m\ddot{y} \\ y(0) = 0, \dot{y}(0) = v_0 \\ v_0 = I_0/m \end{cases} \quad (17)$$

上式是二阶非线性微分方程组,在适当简化条件下可用解析方法求解,一般情况下用数值方法求解。

### 3.3 实用计算方法分析

尽管式(17)是二阶非线性微分方程,但在适当简化条件下可用解析方法求解,为了方便,方程(17)化为

$$N(y, \dot{y}) + S(y) + F(y) + m\ddot{y} = 0 \quad (18)$$

$$y(0) = 0, \dot{y}(0) = v_0, v_0 = I_0/m \quad (19)$$

$$N(y, \dot{y}) = C_1 S_D \dot{y} + C_2 S_D y \quad (20)$$

$$S(y) = \pi D \sigma_s h_s y/h \quad (21)$$

$$F(y) = S \tau_u \eta_f \eta_v (V_f l_f / d_f) (4/l_f^2) [l_f/2 - y(t)]^2 + Q \quad (22)$$

对于式(22),根据文献[1]的数值计算可取线性项而误差很小,即得

$$F(y) = S \tau_u \eta_f \eta_v (V_f l_f / d_f) (4/l_f^2) [l_f^2/4 - l_f y(t)] + Q \quad (23)$$

将式(19)~(22)代入式(18),并设  $\xi = S \tau_u \eta_f \eta_v (V_f l_f / d_f) (4/l_f^2)$ ,得

$$\ddot{y} + \frac{C_2 S_D}{m} \dot{y} + \frac{\pi D \sigma_s h_s / h - l_f \xi + C_1 S_D}{m} y = \frac{\xi l_f^2 - 4Q}{4m} \quad (24)$$

令  $A = C_2 S_D / m, B = (\pi D \sigma_s h_s / h - l_f \xi + C_1 S_D) / m$ ,则式(24)简化为

$$\ddot{y} + Ay + By = (\xi l_f^2 - 4Q) / (4m) \quad (25)$$

方程的解为

$$y = e^{-\frac{A}{2}t} \left[ E_1 \cos\left(\frac{1}{2} \sqrt{|A^2 - 4B|} t\right) + E_2 \sin\left(\frac{1}{2} \sqrt{|A^2 - 4B|} t\right) \right] + \frac{\xi l_f^2 - 4Q}{4Bm} \quad (26)$$

初值条件为  $y_{t=0} = 0$ ,  $\dot{y}_{t=0} = v_0$ , 代入式(26)得联立方程, 得

$$E_1 = -(\xi l_f^2 - 4Q)/(4Bm) \quad E_2 = -2v_0 / \sqrt{|A^2 - 4B|} \quad (27)$$

对式(26)求导, 有

$$\dot{y} = \frac{A}{4} \sqrt{|A^2 - 4B|} e^{-At/2} \left[ -E_2 \cos\left(\frac{1}{2} \sqrt{|A^2 - 4B|} t\right) + E_1 \sin\left(\frac{1}{2} \sqrt{|A^2 - 4B|} t\right) \right] \quad (28)$$

当  $\dot{y} = 0$  时, 塞块位移达到最大值, 此时有

$$t_m = (2 / \sqrt{|A^2 - 4B|}) \arctan(E_2 / E_1) \quad (29)$$

将式(29)代入式(26)即可求得震塌块的最大位移

$$y_{\max} = e^{-\frac{A}{2}t_m} \left[ E_1 \cos\left(\frac{1}{2} \sqrt{|A^2 - 4B|} t_m\right) + E_2 \sin\left(\frac{1}{2} \sqrt{|A^2 - 4B|} t_m\right) \right] + \frac{\xi l_f^2 - 4Q}{4Bm} = e^{-\frac{A}{2}t_m} \sqrt{E_1^2 + E_2^2} + \frac{\xi l_f^2 - 4Q}{4Bm} \quad (30)$$

由钢板屈服极限条件可求出震塌块的极限厚度  $h$ , 即

$$y_{\max} = e^{-\frac{A}{2}t_m} \sqrt{E_1^2 + E_2^2} + (\xi l_f^2 - 4Q)/(4Bm) \leq y_s \quad (31)$$

对于遮弹层下方有结构的情况, 由式(8), 上式可进一步简化为

$$y_{\max} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} + (\xi l_f^2 - 4Q)/(4Bm) \leq y_s \quad (32)$$

式(32)是关于  $h$  的超越代数方程式, 用数值方法求解。因此, 遮弹层的计算厚度  $H$  为弹坑厚度  $h'$  和震塌块厚度  $h$  之和, 即

$$H = h + h' \quad (33)$$

#### 4 理论计算与试验结果对比分析

由于测量设备和试验条件的限制, 很难直接测量出钢纤维混凝土在接触爆炸近区的特征参数。根据本文中给出的模型求出钢板下表面土中的荷载, 并与试验结果进行比较, 以宏观检验模型的正确性。

采用试验过程中出现冲切破坏的 0210<sup>#</sup>板和 0615<sup>#</sup>板来比较。药量均为 1kg, 采用集团装药的形式。主要材料参数选自文献[1], 如表 1 和表 2 所示, 0210<sup>#</sup>板钢纤维掺量为 1.0%, 钢板厚度 1mm, 0615<sup>#</sup>板钢纤维掺量为 1.5%, 钢板厚度 2mm, 钢纤维混凝土板厚均为 20cm。遮弹板底表面砂土应力根据文献[2]的公式反算而得。

计算结果如图3所示, 0210<sup>#</sup>板遮弹板底表面砂土测试应力峰值为 2.09MPa, 理论计算峰值为

表 1 钢纤维参数

Table 1 Parameters of steel fiber

类别	等效直径/mm	截面形状	单根重/g	纤维抗拉强度/MPa	长径比
方直型	6	长直	0.06	> 700	60

表 2 钢纤维混凝土基本力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel-fiber concrete

试件类型	纤维类型	纤维掺量/ (%)	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	劈拉强度/ MPa	抗弯弹性 模量/MPa
SF10	长直	1.0	44.8	8.11	10.9	5.64	27.7
SF15	长直	1.5	54.5	11.4	12.1	6.37	27.9

2. 18MPa, 0615<sup>#</sup>板遮弹板底表面砂土试验应力峰值为 1.68MPa, 理论计算峰值为 1.72MPa。理论模型没有考虑冲切面形成所需要的时间, 使得理论计算偏于保守。理论计算值和试验结果在波形和数值上都有较好的符合, 说明建立的动力分析模型有较高的精度。

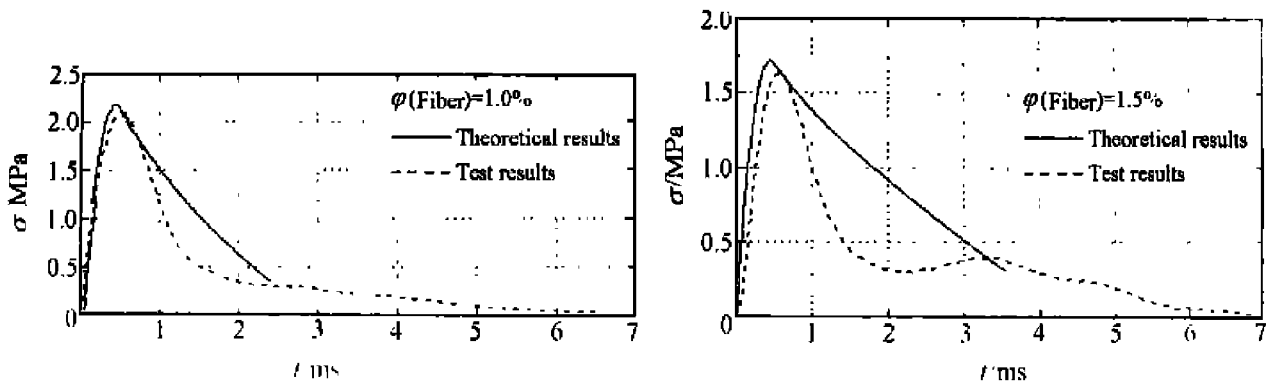


图 3 砂土应力的理论与试验比较

Fig.3 Comparisons of sand pressure with theoretical results and test results

## 5 结 论

- (1) 遮弹板的极限分析可按在遮弹板中发生局部贯穿破坏进行;
- (2) 弹体在钢板-钢纤维混凝土遮弹板侵彻贯穿中, 钢纤维具有抗拔作用, 钢板具有薄膜力作用, 柔性土介质具有耗能作用, 遮弹板的局部贯穿分析可以采用简单的单自由度模型;
- (3) 本文给出的模型能够用于钢板-钢纤维混凝土遮弹板接触爆炸下的极限设计分析。

## 参考文献:

- [1] 王明洋, 钱七虎, 赵跃堂, 等. 人防工事柔性遮弹层的研制研究[R]. 南京: 中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 1999.
- [2] 国家人防办. 人防工程防常规武器结构设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 柯略列夫斯基 В А. 人防掩蔽部结构与计算[M]. 南京工程兵工程学院, 译. 南京: 南京工程兵工程学院, 1994: 143-145.
- [4] Попов Н Н, Растрѣев Б С, Забе всев А В. Расчет Конструкций На Динамические Специальные Нагрузки [M]. Москва: Высшая школа, 1992: 241-245.
- [5] Куйвыева В В. Динамика Железобетонных Структур и Сооружений при интенсивных кратковременных Воздействиях [C]. Москва, 1992: 186-192.

## Design Method of Steel and Steel-fiber Concrete Shelter Plate under Contact Detonation

WANG Ming-yang, ZHANG Sheng-min, GUO Sheng-bing

(Engineering Institute of PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** According to the test results, the single freedom system model is used to investigate the local failure of shelter plate of steel plate and steel fiber reinforced concrete. The practical method of limited analytical design is given for shelter plate of steel plate and steel fiber reinforced concrete. The good agreements of numerical results and test results are verified the effectiveness of presented model.

**Key words:** shelter plate; steel-fiber concrete; local failure; contact detonation