

文章编号: 1001-1455(2002)02-0163-06

# 接触爆炸作用下钢板-钢纤维钢筋 混凝土遮弹层设计方法(II)

王明洋, 钱七虎, 赵跃堂

(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, 此模型考虑了在钢纤维钢筋混凝土组合板局部破坏时, 钢纤维的抗拔作用、钢筋的抗剪、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-钢纤维钢筋混凝土遮弹板接触爆炸下的极限设计分析的实用方法。

关键词: 遮弹层; 钢纤维钢筋混凝土; 局部破坏; 接触爆炸\*

中图分类号: O383 文献标识码: A

## 1 引言

鉴于试验研究的结果<sup>[1]</sup>, 钢纤维-钢筋混凝土遮弹层是一种有着重要用途的材料与结构。这是因为连续定向配筋与短切乱向纤维在不同尺度上协同发挥作用的结果。以定向网片为主的钢筋骨架的存在对于提高试件在爆炸荷载作用下以拉伸和剪切为主的抗力有益, 而纤维的加入能够有效地将部分能量转化为弹性储能, 再以相对低的速率释放, 小于临界能量释放率, 裂纹得以稳定发展。在合适的纤维体积率下, 如果适当增大板厚和配筋率, 可以获得与高掺量钢纤维混凝土相当的抗爆性能, 既降低了成本, 又方便了施工。因此, 建立钢纤维-钢筋混凝土遮弹层的设计方法具有重要的理论与实际意义。

根据文献[2]对承受直接爆炸作用的遮弹板爆炸效应的描述和设计准则, 来建立钢纤维混凝土组合板的局部极限状态动力破坏分析方法。

## 2 遮弹板材料的动力特性

钢筋混凝土结构受瞬时动力荷载作用时, 必须研究它在每一阶段的应力-变形状态和考虑快速加载对材料变形和强度性质的影响。

### 2.1 钢筋

研究的结果表明, 动力加载对钢材力学性质的影响在很大程度上取决于静力变形图  $\sigma_s - \epsilon_s$  的类别(它由钢材的成分、制造和加工的方法来反映)。当出现与塑性变形相应的应力时(达到物理流限或假定流限以后), 钢材中呈现出动力强化现象, 也就是在质点发生相对位移时, 内部构造重新改组。动力加载对所有钢筋的弹性模量和强度极限影响不大。目前的研究已深入到荷载作用下材料中运动发展的微观机理过程<sup>[3]</sup>。近年来用于解释塑性变形阶段中金属内所发生的某些最重要的物理现象, 其中包括滞后现象的理论中, 采用得最广泛的是位错理论。它建立了晶体材料塑性变形和其原子构造间的关系。

尽管进行了大量的理论和试验研究, 到目前为止, 还不能确定动力流限随化学成分、制造和加工方法变化的规律性。寻找金属动力变形的真正规律性之所以困难, 就是因为现代研究方法下所得到的试验资料还不能完全揭示变形速度很大时材料中所进行的物理过程。因此, 目前文献中现有的许多动力流限与变形速度之间的解析关系式都是以试验资料为基础的, 它们不具备普遍意义, 只有在具体条件下才正确。

\* 收稿日期: 2000-11-03; 修回日期: 2001-10-08

作者简介: 王明洋(1966—), 男, 博士, 教授, 博导。

在钢筋混凝土结构计算中,动力流限  $R_{s,d}$  的确定经常是将静力流限  $R_s$  乘以与变形速度相应的钢材动力强化系数  $k_{s,v}$  (如图 1)

$$R_{s,d} = k_{s,v} R_s \quad (1)$$

### 2.2 混凝土

混凝土强度极限的增加主要取决于其裂缝形成特性上的变化。对于混凝土的破坏而言,微裂缝形成过程需要充分地发展,并达到一定的极限变形。为了形成断裂裂缝并使之破坏,加载的时间愈短,需要施加的荷载就愈大。随着变形速度增加,泊松系数减少,这就说明微裂缝的发展受阻,非弹性变形滞后。混凝土的动力强度与采用材料的性质、混凝土结构的特点、水分的含量及应力状态的类别等有关。影响混凝土动力强度和变形性能的因素是多种多样的,但是它们的影响程度并不相同。在现实设计中,即使是近似地考虑所有这些因素也是极端困难的,近年来,曾用从破坏力学和其它相近学科中的解析关系式来考虑变形速度的影响。其中,包括利用弹-粘塑性模型来描述混凝土冲击压缩时的性状。与此同时,包括粘性在内的经典模型都不能充分符合现象的本质。包括干摩擦在内的模型在很大程度上却能符合实际情况。另一个途径是利用孔隙原理,不考虑剪切强度。但是试验资料与理论比较后表明<sup>[4]</sup>,这种模型用于混凝土是非常有限的。

尽管国内外在此方面形成了研究热点,但到目前为止,还没有一个能考虑快速加载特点的混凝土变形规律。以变形速度影响为基础的理论上的尝试,目前还是极不完备的,并且需要用试验方法确定一系列的系数。因此,在建立有根据的理论以前,较合理的是用最简单的方法来考虑变形速度的影响,方法是在混凝土变形图的参数中引入一个相应的系数,并且选择能与试验资料最适应的解析公式。计算中对变形图经常采用 2~5 次幂多项式、普兰德图形、幂数等。在很多情况下,对变形图的上行分支和下行分支分别采用二个不同的函数。这种方法能够较全面地考虑各种因素对下行分支的影响。最方便的是采用由三个函数组成的应力-应变关系的变形图  $\sigma_b - \epsilon_b$  (见图 2),对弹性变形地段和下行分支采用线性函数,对曲线形的上行分支采用分段线性的函数,即

$$\sigma_b = \begin{cases} E_b \epsilon_b & 0 \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{b,el} \\ \frac{E_b \epsilon_b}{1 + \alpha(\epsilon_b - \epsilon_{b,el})} & \epsilon_{b,el} < \epsilon_b < \epsilon_{b,u} \\ R_b - \beta E_b (\epsilon_b - \epsilon_{b,u}) & \epsilon_{b,u} \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{b,m} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha = (\nu_{b,u}^{-1} - 1) / (\epsilon_{b,u} - \epsilon_{b,el}) \\ \beta = \nu_{b,u} (1 - \hat{q}) (\hat{q}_m - 1) \\ \nu_{b,u} = R_b / (E_b \epsilon_{b,u}) \\ \epsilon_{b,el} = R_{b,el} / E_b \\ \hat{q} = R_{b,m} / R_b \\ \hat{q}_m = \epsilon_{b,m} / \epsilon_{b,u} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_{b,el}$  为混凝土弹性变形;  $\epsilon_{b,u}$  为混凝土相对极限变形;  $\epsilon_{b,m}$  为混凝土破坏时的极限变形;  $R_{b,el}$  为混凝土的弹性工作极限;  $E_b$  为混凝土弹性模量;  $R_b$  为混凝土相对极限强度;  $R_{b,m}$  为混凝土破坏强度。

变形速度的影响经常是在变形图  $\sigma_b - \epsilon_b$  的计算公式中引入一个动力强化系数来考虑。可以表示成

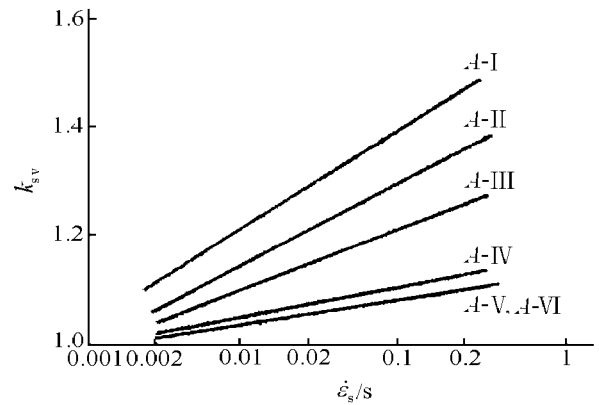


图 1 各种级别的低碳钢动力强化系数与变形速度的关系

Fig. 1 Relations between dynamic strengthen factor and deformation rate in different level of soft steel

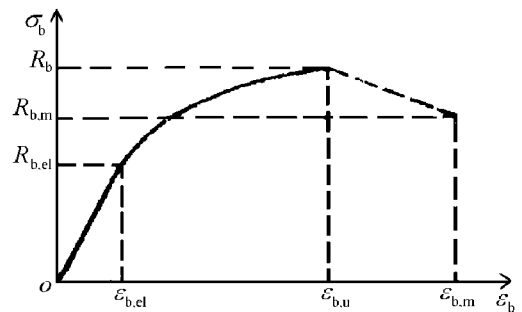


图 2 混凝土的计算变形图

Fig. 2 Deformation curve of concrete

下面的解析形式

$$\text{受压时} \quad k_{b,v} = \begin{cases} 1.212 + 0.0424 \lg \dot{\epsilon}_{bt} & 10^{-5} \leq \dot{\epsilon}_{bt} \leq 1 \\ 1.212 + 0.0444 \lg \dot{\epsilon}_{bt} & \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{受拉时} \quad k_{u,v} = \begin{cases} 1.9 + 0.180 \lg \dot{\epsilon}_{bt} & 10^{-5} \leq \dot{\epsilon}_{bt} \leq 1 \\ 1.9 + 2.582 \lg \dot{\epsilon}_{bt} & 1 \leq \dot{\epsilon}_{bt} \leq 10^{1.2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\dot{\epsilon}_{bt}$ 为抗拉应变率。

### 2.3 钢纤维混凝土

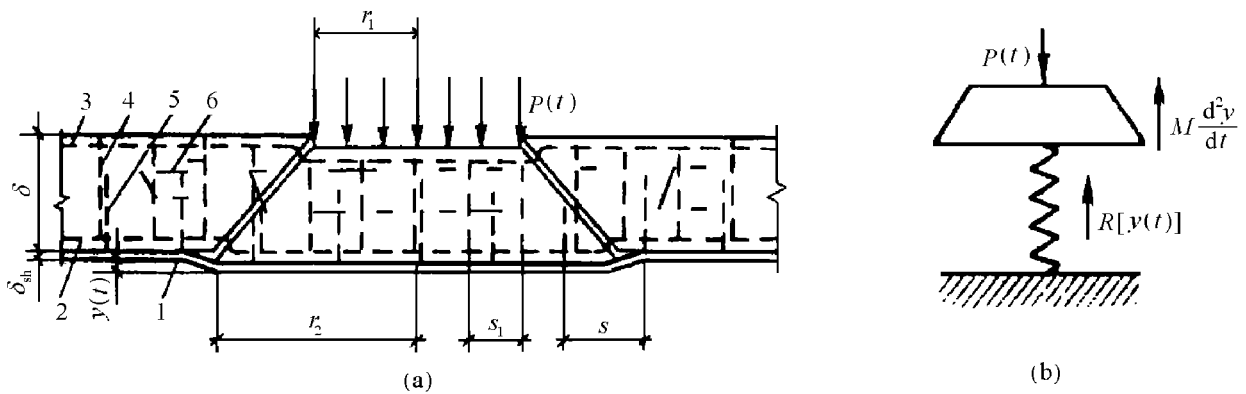
经过钢纤维加强的混凝土，能够大大提高它的抗裂强度，从而急剧提高了它的冲击强度，同时也提高了混凝土吸收能量的能力，其动力强度强化系数也增大。在本文中，我们取钢纤维加强的混凝土动力强化系数按式(4)和(5)计算，显然偏于保守。

### 3 工程贯穿模型

钢板-钢纤维钢筋混凝土遮弹层中，在纵向设有两层钢筋，在横向设有箍筋，并用钢板在底部粘结加强。在直接爆炸作用下其破坏可导致贯穿形成塞块。为了描述塞块的运动，曾提出了几个计算模型。文献[5]的模型中考虑了几乎所有结构因素，即混凝土、箍筋、纵向钢筋和钢板的力学机理特征，并采用分阶段的弹塑性动力分析模型详细分析了塞块的运动特性并提出了极限设计方法。作为工程模型最简单的是单自由度体系概念的模型，如图 3(a)。将作用力投影到垂直轴上，就得到了这个体系的运动方程式

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + R(y) = 0 \quad (6)$$

式中： $y$ 为“塞块”相对于遮弹层结构其它部分的垂直位移； $M$ 为“塞块”的质量； $R$ 为各种联系件的阻力。



1. Steel plate; 2, 3. Longitudinal inner reinforcing steel bar; 4. Hooper steel; 5. Hinge; 6. Steel fiber

图 3 钢纤维钢筋混凝土遮弹层的计算简图

Fig.3 Calculation diagram for shelter plate of steel plate and steel fiber reinforced concrete

表达式(6)的初始条件为

$$\begin{cases} y(0) = 0 \\ \dot{y}(0) = v_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $v_0 = P(t)/M$ ， $P(t)$ 为爆炸冲量荷载；阻力  $R$  由下列分量组成

$$R = R_{s,w} + R_{s,ex} + R_{s,in} + F_s + F_N + F_M \quad (8)$$

式中： $R_{s,w}$ 为横向钢筋提供的阻力； $R_{s,ex}$ 和  $R_{s,in}$ 分别为遮弹层外侧和内侧纵向钢筋提供的阻力； $F_M$ 为钢

板提供的膜阻力;  $F_N$  为遮弹层下方地基反力;  $F_s$  为钢纤维抗拔力和混凝土塞块表面摩擦阻力, 其表达式见文献[2]。

试验表明<sup>[6]</sup>, 由于爆炸作用的瞬时性和钢筋很大的塑性应变, 遮弹层的弹性工作阶段可以略而不计。因此, 横遮在塞块表面上箍筋的内力为常数

$$R_{s,w} = A_{s,w} R_{s,d} \pi (r_2^2 - r_1^2) / (s_1 s_2) \quad (9)$$

式中:  $A_{s,w}$  为一根箍筋的截面积;  $R_{s,d}$  为动态抗拉强度;  $s_1$  和  $s_2$  分别为在遮弹层中间表面内, 互相垂直的两个方向上相邻两列箍筋的间距;  $r_1$  和  $r_2$  分别为塞块上、下表面的半径。

公式(9)中的第一个因子是沿遮弹层表面分布、由箍筋承受的内力, 第二个因子是遮弹层塞块侧表面在水平面上投影的面积。尽管有很大的相对变形(当使用 A-II 级钢筋时, 极限相对变形  $\epsilon_{s,u} = 0.14$ ; 使用 A-III 级钢筋时,  $\epsilon_{s,u} = 0.06$ 。), 横向钢筋的工作寿命却很有限。在高速荷载作用下, 钢筋与混凝土的粘附应力集中在裂缝边缘; 在应力集中区域的范围之外, 钢筋与周围的混凝土共同工作, 且其应变接近于零, 即应变基线的长度非常小, 且可由裂缝上下的粘附应力图重心之间的距离  $l_{an}$  ( $l_{an} = 2z_h$ ) 确定; 当塞块的位置达到如下数值的时刻, 箍筋发生断裂:

$$y^* = \epsilon_{s,u} l_{an} = \begin{cases} 0.28z_h & \text{A-II 钢筋} \\ 0.12z_h & \end{cases}$$

在横向钢筋达到屈服限以后, 纵向钢筋的阻抗开始显露出来。在斜裂缝相交的位置和混凝土内相邻的区段上, 纵向钢筋发生弯曲, 如图 3(a), 即所谓的“销钉效应”。当这种钢筋在弹性阶段工作时, 由一根钢筋产生的阻力等于  $12 E_s I_s / L^3$ , 此处,  $E_s$  为静态弹性模量;  $I_s$  为钢筋的轴向惯性矩;  $L$  为弯曲区的长度。后一参数至今尚未准确确定, 特别是在快速加载条件下。不过可以预料, 在快速加载下的值将比静力作用下的值小得多。在这些条件下, 跟随在弹性应变之后的塑性应变将集中在不大的区段内, 而在裂缝极限内的应力状态接近于轴向受拉状态。忽略那些与塑性应变相比可有可无的其它应变, 并且考虑到上述因素, 可以认为制作成正交网格且具有相同钢筋间距  $S$  的纵向钢筋内的阻抗力是常数

对于遮弹层外侧面的钢筋

$$R_{s,ex} = 2\pi r_1 R_{s,d} A_{s,ex} / S \quad (10)$$

对于遮弹层内侧面的钢筋

$$R_{s,in} = 2\pi r_2 R_{s,d} A_{s,in} / S \quad (11)$$

式中:  $A_{s,ex}$  和  $A_{s,in}$  分别为遮弹层外侧及内侧表面内一个方向上的钢筋面积。

作用在遮弹层上的荷载形式为<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} P(t) = K_1 \xi^{1.2} (\eta_C C)^{0.6} \\ \xi = K_2 F_A^{0.5} \end{cases} \quad (12)$$

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

地基反力、钢板膜力和钢纤维混凝土的抗拔力和混凝土破坏面上的摩擦力分别为<sup>[2]</sup>

$$F_N(y, y) = C_1 S_D y + C_2 S_D \dot{y} \quad (13)$$

$$F_M(y) = \pi D \sigma_s h_s y / h \quad (14)$$

$$F_s(y) = S \tau_u \eta_f \eta_v \frac{V_f l_f}{d_f} \frac{4}{l_f^2} \left[ \frac{l_f^2}{4} - l_f y(t) \right] + F_Q \quad (15)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$  为系数;  $S_D$  为砂土反力作用面面积;  $D$  为冲切块直径;  $\sigma_s$ 、 $h_s$  分别为钢板的拉伸应力和厚度;  $h$  为结构厚度;  $S$  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;  $V_f$  为钢纤维体积;  $d_f$  为钢纤维横截面直径;  $l_f$  为单根钢纤维截面周长;  $y(t)$  为震塌块竖向位移;  $F_Q$  为沿贯穿塞块表面砼承受的内力,  $F_Q = R_{bt,d} S / \tan \alpha$ ,  $R_{bt,d}$  为混凝土轴向拉伸的计算动阻抗。

因此, 方程(6)是非线性的, 并应改写为如下形式

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + R(y) = 0 \quad y \leq y^* \quad (16)$$

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + R(y) - R_{s,w} = 0 \quad y > y^* \quad (17)$$

对于遮弹层下方有结构的情况, 地基反力中速度项影响较小, 忽略速度项, 则有

$$F_N(y, \dot{y}) = F_N(y) = S_D K y (h, t) \quad (18)$$

式中:  $K$  为遮弹层下方介质动压缩模量。

将式(16)合并同类项, 经整理, 可以变为

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + B y = A \quad (19)$$

$$\begin{cases} B = \frac{1}{M} (S_D K + \pi D \sigma_s h_s \frac{1}{h} - 4 S \tau_u \eta_f \eta_V \frac{V_f}{d_f}) \\ A = \frac{1}{M} (-R_{s,w} - R_{s,ex} - R_{s,in} - S \tau_u \eta_f \eta_V \frac{V_f l_f}{d_f} - F_Q) \end{cases} \quad (20)$$

解此方程得

$$y = (E_1 \cos \sqrt{|B|} t + E_2 \sin \sqrt{|B|} t) + E_1 \quad (21)$$

式中:  $E_1 = -A/B$ ,  $E_2 = -V_0 / \sqrt{|B|}$ , 当  $y = y^*$  时, 位移和速度为

$$y_{t_1} = y^* \quad (22)$$

$$\dot{y}_{t_1} = \dot{y}^* \quad (23)$$

当  $y = y^*$  时,  $t = t_1$ 。

式(17)的初始条件由到达  $y^*$  值时刻的位移和速度连续条件确定。式(17)合并同类项, 经整理, 可以变为

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + B y = A' \quad (24)$$

式中

$$A' = \frac{1}{M} (-R_{s,ex} - R_{s,in} - S \tau_u \eta_f \eta_V \frac{V_f l_f}{d_f} - F_Q)$$

解此方程得

$$y = (\alpha_1 \cos \sqrt{|B|} t + \alpha_2 \sin \sqrt{|B|} t) + E_1' \quad (25)$$

式中

$$\begin{cases} E_1' = -A'/B \\ \alpha_1 = \frac{(y_1 - E_1') \sec^2 \sqrt{|B|} t_1 - E_2 \tan \sqrt{|B|} t_1 + E_1 \tan^2 \sqrt{|B|} t_1}{\cos \sqrt{|B|} t_1} \\ \alpha_2 = \alpha_1 \tan \sqrt{|B|} t_1 + E_2 - E_1 \tan \sqrt{|B|} t_1 \end{cases}$$

震塌块最大位移

$$y_{\max} = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} + E_1' \quad (26)$$

由极限设计状态方程<sup>[2]</sup>得到关于  $h$  的超越代数方程

$$y_{\max} = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} + E_1' \leq y_s \quad (27)$$

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

方程(27)可用数值方法求解, 因此, 遮弹层的设计厚度  $H$  为弹坑厚度  $h'$  和震塌块厚度  $h$  之和。即

$$H = h + h' \quad (28)$$

## 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[R]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 1999.
- [2] 王明洋, 邓国强, 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.
- [3] 柯略列夫斯基 В А. 人防掩蔽部结构与计算[M]. 解放军理工大学工程兵工程学院译. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 1994. 143—145.
- [4] 王明洋, 钱七虎. 高等防护结构分析原理[M]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2001. 170—178.
- [5] Попов Н Н, Растро вев Б С, Забевев А В. Расчет Конструкций на Динамические Специальные Нагрузки [М]. Москва: Высшая школа, 1992. 241—245.
- [6] Куйвы шва В В. Динамика Железобетонных Структур и Сооружений при Интенсивных Кратковременных Воздействиях [М]. Москва: Высшая школа, 1992. 186—192.

## The Design Method for Shelter Plate of Steel Plate and Steel Fiber Reinforced Concrete under Contact Detonation

WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu, ZHAO Yue-tang

( *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 main effects are considered by resisting pulling out of steel fiber concrete, resisting shear of steel reinforced, member force of steel plate and energy dissipation in soft soil. The practical method of limited analytical design is given for shelter plate of steel plate and steel fiber reinforced concrete.

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