

文章编号: 1001-1455(2005)04-0289-07

# 弹体对钢筋混凝土板-钢板的贯穿计算问题\*

王明洋, 郑大亮, 白晓燕

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 主要讨论了钢筋混凝土板-钢板中箍筋、纵向钢筋和钢板对弹体贯穿过程的影响。根据钢筋混凝土板-钢板多阶段变形与破坏和能量在时间、空间上的分配差异, 提出了钢筋混凝土板-钢板的变形与破坏模型, 确定了箍筋和钢板对弹体的阻力公式, 并将纵向钢筋网等价为薄钢板厚度, 从而给出了弹体和贯穿块的运动方程。并通过与弹体贯穿混凝土板过程中弹体的加速度、速度、位移的对比, 说明了钢筋混凝土板-钢板中各联系件对弹体在介质贯穿过程中位移场的影响。

**关键词:** 爆炸力学; 变形和破坏模型; 弹塑性理论; 钢筋混凝土; 钢板; 弹体

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 130 · 3599

**文献标志码:** A

## 1 引言

钢筋混凝土板-钢板是目前防护工程中普遍采用的材料与结构形式。随着抗常规武器的需要, 对于已有结构抗震塌的有效措施是在结构的自由面锚固钢板。目前, 钢筋混凝土板-钢板的侵彻与贯穿问题研究仍停留在由实验归纳出经验的阶段, 许多基本问题还没有解决。究其原因是对侵彻与贯穿过程中能量的分配和传递缺乏深入的表征, 尤其缺乏对介质在侵彻变形与破坏下所涉及多尺度水平和多阶段动力行为(介质表现为非均匀、非连续和非相容)的正确描述。钢筋混凝土板-钢板的抗侵彻和贯穿过程属于多阶段变形的局部问题, 不仅表现在距侵彻弹体表面不同区域的介质体积变形、剪切变形及其运动上的能量分配差异, 而且表现在混凝土介质与钢筋、钢板的变形能在时间分配上的差异。因此, 弄清介质在侵彻与贯穿过程中的变形与破坏特征, 各组元的能量存储、耗散与转移机制和破坏模式是建立可靠物理力学模型的基础。

本文中根据弹体贯穿钢筋混凝土板-钢板过程中混凝土、钢筋和钢板的变形与破坏特征, 提出钢筋混凝土板-钢板的贯穿模型, 分析贯穿过程中钢筋和钢板的变形状态及其与贯穿块的相互作用。通过与弹体贯穿混凝土板过程中弹体的加速度、速度、位移场的对比, 建立弹体在钢筋混凝土板-钢板中的贯穿计算问题, 从而为防护结构设计计算提供理论基础。

## 2 基本原理

### 2.1 介质的变形与破坏和能量分配

侵彻与近区性状是最终决定辐射出来波的基本参数、反映能量的分配份额、揭示侵彻与贯穿等重要特性的关键因素。在侵彻过程中, 由于近区介质的运动特性使其变形接近一维应变状态, 剪切与体积变形的改变属于同一数量级, 即在近区有如下关系<sup>[1]</sup>:  $\epsilon_V \approx \epsilon_r \approx \gamma_{\max}$ ,  $\epsilon_r \gg \epsilon_\theta = \epsilon_\varphi$  ( $\epsilon_V$  为体积应变,  $\epsilon_r$  为径向应变,  $\epsilon_\theta$ 、 $\epsilon_\varphi$  为环向应变,  $\gamma_{\max}$  为最大剪应变)。这一状态导致在混凝土中大幅值纵波的传播速度与小幅值纵波的传播速度差别很小。因此, 随着应力  $\sigma_r$  跃迁程度的发展, 在应力波中还会产生与  $\sigma_\varphi$  之间的差值, 该差值将达到材料的剪切强度  $\tau_0$ ,  $\sigma_r - \sigma_\varphi = 2\tau_0$ ,  $\sigma_r + 2\sigma_\varphi = 3K\epsilon$ , 一般而言,  $\tau_0$  和  $K$  将由于应力跃迁或者随体积应变的增大而变化。据此可以计算冲击波的主应力

\* 收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2004-12-23

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(51309-1-7)

作者简介: 王明洋(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

$$\sigma_r = K\varepsilon + \frac{4}{3}\tau_0, \quad \sigma_\varphi = K\varepsilon - \frac{2}{3}\tau_0 \quad (1)$$

因而,当应变  $\varepsilon = 0.1$  (波中  $\sigma_r = 10$  GPa) 和  $\tau_0 = 0.001K$  ( $K\varepsilon \gg \tau_0$ ) 时,从力学的观点可知这一状态类似于流体动力学状态

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_\varphi = -p \quad (2)$$

式中:  $p$  为实际的平均压力。

应该指出:在向式(2)的状态变化时,忽略强度与强度消失无关,而与消耗在体积变化的能量大大超过消耗在克服形状变化阻力上的能量有关。同时耗费能量的主要部分与不同的范围有关:体积的变化,包括加热和质变,与空腔半径的立方成正比,而克服滑移面上的剪应力和破坏(形成新的表面)则与空腔半径的平方成正比。因为这些现象只具有表面的而没有体积的特征。因此,对于弹体近区,混凝土介质存储和破坏耗散的能量份额与其运动转移的能量份额相比微不足道,破碎区介质的变形性状显然是以受限运动为主,但破碎区块体间的摩擦性状使其仍具有抗剪能力,即存在残余强度。破碎区运动能量一方面消耗在破碎块运动摩擦做功上,另一方面消耗在箍筋的约束变形和径向裂纹扩展上,还有一部分过渡到弹性区介质中。

钢筋混凝土板-钢板的变形与破坏及能量的分配与板的厚度也有很大关系。如果板厚度较大,弹体只侵彻并不贯穿板块。在侵彻阶段,钢板-钢筋混凝土板中的纵向钢筋通常来不及变形就受到弹体侵彻局部拉断,其对侵彻的阻力作用类似等效为薄钢板,而底部钢板不发挥作用。当钢筋混凝土板-钢板厚度减小到一定程度时,破碎区膨胀所做的功足以提供径向裂纹区的扩展,当裂缝到达背面时,弹体便好像觉察到了背面的存在,导致其侵彻相对速度降低,阻抗减小,形成贯穿过程。底部纵向钢筋和钢板的变形随着贯穿块运动位移的增大而增大,其纵向钢筋对贯穿块的阻力类似等效薄钢板的薄膜力作用。

## 2.2 介质抗侵彻阻力计算

根据文献[2],弹体侵彻混凝土介质时作用在弹体表面的应力

$$\sigma_n = \lambda_s + \lambda_d \rho_0 c_p \dot{r}_1 - \lambda_e \rho_0 \dot{r}_1^2 \quad (3)$$

式中:第一项  $\lambda_s = 2\tau_s^e [1 - 2(\tau_s^e/\tau_s^c) \ln(r_1/r_2)]$  表征介质强度的影响;第二项表征介质惯性的影响,  $\lambda_d = [k/(k-1)][1 - (r_1/r_2)^{k-1}]$ , 第三项表征弹体表面介质向后运动的影响,  $\lambda_e = [1 - (r_1/r_2)^{2k}]/2$ ,  $r_1$  和  $r_2$

分别为空腔半径和破碎区半径,弹体的比例换算关系为:  $\frac{r_1}{r_2} = \eta_2 \sqrt{\frac{r_1}{l}}$ ,  $l = \left(\frac{K_c}{\tau_s^c}\right)^2$ ,  $k = \frac{2-\psi}{1+\psi}$ ,  $\psi$  为扩容因数,  $K_c$  为介质的抗断裂韧度,  $\tau_s^c$  为介质的剪切极限强度,  $\rho_0$  为介质的初始密度,  $c_p$  为变形波传播速度(与破碎块体的尺寸大小和膨胀有关),起着能量转移的作用,  $\dot{r}_1$  为空腔的膨胀速度。

纵向钢筋对侵彻深度的影响,如果纵向钢筋层数较多,可以根据文献[3]按分层介质中侵彻深度计算方法进行,如果层数较少,保守考虑可以忽略纵向钢筋的影响。

数值计算表明:当弹着靶初速度  $v_0 \leq 1$  km/s 时,式(3)中右式第三项对侵彻深度的影响可以忽略。因此,弹体在侵彻混凝土过程中受到的侵彻阻力  $P_0$  表达式简化为

$$P_0 = B + Cv \quad (4)$$

式中:

$$B = \frac{1}{8} \tau_s^e \pi d^2 \left(1 + 2\mu' \frac{l_d}{d}\right) \left[4.5 - 4 \ln\left(\eta_2 \sqrt{\frac{d}{2l}}\right)\right],$$

$$C = \frac{1}{2} \rho_0 c_p \pi d^2 \frac{1 + 2\mu' \frac{l_d}{d}}{\sqrt{1 + 4(l_d/d)^2}} \frac{k}{k-1} \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{k+7} \left(\eta_2 \sqrt{\frac{d}{2l}}\right)^{k-1}\right]$$

$v$  为弹体运动速度,  $\mu'$  为弹体与介质间的滑动摩擦因数,弹头长度  $l_d = r_0 \cot\theta_0$ ,  $r_0$  为弹体半径,  $\theta_0$  为弹头锥角的半角;  $d$  为弹体直径;  $l_d/d$  为弹头长度与弹体直径之比,对于通常的弹体,  $l_d/d$  在 1.5~3.0 之间,且  $\sqrt{1 + (l_d/r_0)^2} / (l_d/r_0) \approx 1$ ,对于混凝土介质,  $k \approx 2$ 。

### 3 钢筋混凝土板-钢板中各元素的作用机理

#### 3.1 贯穿块的单自由度模型

钢筋混凝土板-钢板厚度  $H$  达到一定值时,弹体的侵彻作用可导致其贯穿形成贯穿块。底层纵向钢筋可达到很大的塑性应变,其作用起到了类似于薄钢板的作用,钢筋不但可以通过与混凝土的粘结力将破碎区所受到的作用力分散到更大面积的混凝土中,也增大了对贯穿块起作用的钢筋网的面积,而且能抑制震塌块的产生,挡住贯穿块的运动。

为了描述贯穿块的运动,研究者们提出了大量的模型,文献[4]的模型中考虑了几乎所有的结构因素,即混凝土、箍筋、纵向钢筋和钢板的力学机理特征。本文中在文献[5]的基础上采用单自由度体系模型。当弹头尚未完全进入便形成贯穿条件的钢板-钢筋混凝土板中各联条件对贯穿块阻力

$$R_a = R_{s,w} + R_{s,ex} + R_{s,in} + F_M \tag{5}$$

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。

当弹头完全进入后形成贯穿条件的情况,外侧纵向钢筋对贯穿块的运动产生阻力不大而忽略。此时钢筋混凝土板-钢板中各联条件对贯穿块阻力

$$R_a = R_{s,w} + R_{s,ex} + F_M \tag{6}$$

文献[6]中给出了箍筋对贯穿块的阻力公式,但考虑的影响因素多,形式复杂。为简化计算,本文中将箍筋阻力以提高混凝土的剪切残余强度  $\tau_s^p$  进行转换,因为在介质中,箍筋主要是约束混凝土的变形和径向裂纹的扩展。

实际工程结构中使用的钢板一般较薄,大多数仅 1~10 mm,钢板的作用提供的仅相当于薄膜力。钢板轴向拉伸力与钢板的拉伸应力和厚度等有关,钢板中心部分对贯穿块的阻力采用轴对称计算,其在垂直方向的投影  $F_M$  主要取决于钢板在冲切面的斜率  $\tan\theta$  (文献[4]给出了钢板没有销钉锚固时  $\theta$  角的计算公式),  $F_M$  的计算公式为

$$F_M = 2\pi D\sigma_s h_s \sin[\arctan(y/H)] \tag{7}$$

式中:  $\sigma_s$ 、 $h_s$  分别为钢板的拉伸应力和厚度,  $H$  为结构厚度,  $y$  为贯穿块竖向位移。

如果  $y/H \rightarrow 0$ ,  $\sin[\arctan(y/H)] \approx y/H$ , 式(7)变为

$$F_M = 2\pi D\sigma_s h_s y/H \tag{8}$$

#### 3.2 钢筋网的最大挠度计算

弹体冲击钢筋混凝土板-钢板的荷载历史曲线近似突加平台形式,下面给出突加平台动载  $p_{max}$  作用时纵向钢筋网与薄钢板的等效厚度计算方法。

首先研究受力拉索为空间网形式的矩形悬索结构,如图 1 所示,各拉索之间的距离为  $l_1/n_1$ 、 $l_2/n_2$ , 此处,  $n_1$  和  $n_2$  分别为  $l_1$  边和  $l_2$  边上的悬索间隔数。假设  $n_1 \geq 3, n_2 \geq 3$ , 拉索的横截面积均为  $A$ , 忽略静荷载的作用,仅考虑动荷载  $q$  的作用。

忽略网的初始垂度的影响,将网在动荷载作用下的垂直位移用  $w = z(t)\sin(\pi x/l_1)\sin(\pi y/l_2)$  来表示,  $z(t)$  是荷载作用下结构中央处的垂度,拉索内的应力为极限拉应力  $\sigma_c'$ 。索网的动能  $T$ 、变形位能  $U$  和外荷载的位能  $W$  为

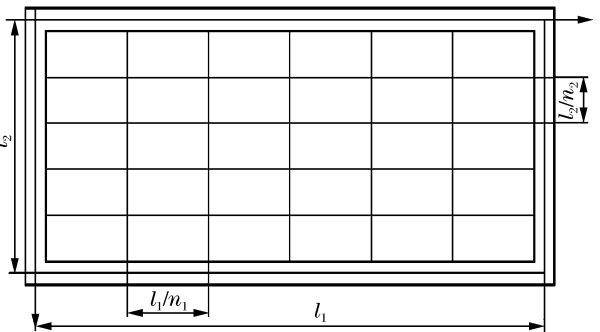


图 1 平面为矩形的悬索结构的计算图形

Fig. 1 Calculation diagram of plane rectangular steel cable

$$T = \frac{\rho_A \dot{z}^2}{2} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \sin^2\left(\frac{\pi}{l_1}x\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l_2}y\right) dx dy = \frac{\rho_A l_1 l_2}{8} \dot{z}^2 \tag{9}$$

$$U = \frac{\pi^2 \sigma_c^t A}{8} \left( \frac{n_2}{l_1} + \frac{n_1}{l_2} \right) z^2 \quad (10)$$

$$W = -q(t) z \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \sin^2 \left( \frac{\pi}{l_1} x \right) \sin^2 \left( \frac{\pi}{l_2} y \right) dx dy = -q(t) \frac{4l_1 l_2}{\pi^2} z \quad (11)$$

式中:  $\rho_A$  为单位面积上的质量。

将式(9),式(10)和式(11)代入拉格朗日方程,得到当作用为突加平台动载  $p_{\max}$  时,挠度最大值

$$z_{\max} = \frac{32l_1 l_2 p_{\max}}{\pi^4 \sigma_c^t A (n_2/l_1 + n_1/l_2)} \quad (12)$$

对于  $l_1 = l_2, n_1 = n_2$  正方形等网格情况,挠度最大值

$$z_{\max} = \frac{16l_1^3 p_{\max}}{\pi^4 \sigma_c^t A n_1} \quad (13)$$

### 3.3 薄钢板的最大挠度

薄钢板属于几何非线性的结构,如果满足  $w/h_s \geq 5$  ( $w$  为板的垂直向挠度,  $h_s$  为板的厚度),薄钢板对弯曲的阻抗可以忽略不计,处于塑性流动状态中的薄板是一个薄膜,其中的应力等于流限  $\sigma_c^t$ 。对于厚度为  $h_s$ ,边长为  $l_1, l_2$  刚性嵌固在周边内的矩形薄板,当作用为突加平台动载  $p_{\max}$  时,采用上述计算方法得到挠度最大值<sup>[7]</sup>

$$w_{\max} = \frac{1.64 p_{\max} l_1^2 l_2^2}{4\sigma_c^t h_s (l_1^2 + l_2^2)} \quad (14)$$

对于  $l_1 = l_2$  的正方形薄钢板情况,挠度最大值

$$w_{\max} = \frac{1.64 p_{\max} l_1^2}{8\sigma_c^t h_s} \quad (15)$$

令式(13)和式(15)相等,就可得到钢筋网与薄钢板的等价厚度计算公式

$$h_s = 1.25 A_a \quad (16)$$

式中:  $A_a = A n_1 / l_1$  为单位长度内钢筋总的横截面面积,  $n_1 / l_1$  为单位长度内所配钢筋的根数。

将得到的钢筋网与薄钢板的等价厚度公式(16)代入钢板膜力公式(8),即得到外侧和内侧纵向钢筋对结构的阻力  $R_{s,ex}$  和  $R_{s,in}$ 。

## 4 贯穿过程模型

当弹体侵入介质层一定深度时,可能会出现两种情况,介质层厚度  $H$  较大时,弹头先完全侵入后贯穿;介质层较薄时,弹头未完全侵入介质层时就贯穿。具体会出现哪一种情况需由临界条件来判断。

### 4.1 介质层较厚的情况

如果介质层厚度  $H$  较大,弹体侵入到某一深度  $h$  时的速度为  $v$ ,  $r < r^*$  ( $r = H - h + r_0 \cot \theta_0$ ,  $H - r_0 \cot \theta_0 \geq r^*$ ,  $r^* = \eta_1 r_0 \sqrt{r_0 / l}$ ,  $r_0$  为弹体与介质层正面相交时的半径,计算采用了前面的参数),介质层后背面的裂缝扩张已失稳,贯穿块形成。贯穿块向下运动时,由于弹体与贯穿块之间存在速度差异,导致作用在弹体上的阻力与贯穿块形成之前有所不同(考虑阻抗力与相对速度的平方成正比例)

$$P = P_0 (1 - u/v)^2 \quad (17)$$

式中:  $P$  为贯穿块形成后受到的弹体侵入阻力,  $u$  为贯穿块的速度,  $P_0$  为贯穿块形成时刻弹体受到的侵入阻力。

由式(17)可知,贯穿块的运动速度  $u$  不断增大,而弹体的速度不断减小。但与贯穿混凝土板不同,在贯穿过程中钢筋混凝土板-钢板的内侧纵向钢筋和底部钢板阻碍贯穿块的运动,其变形随贯穿块运动位移的增大而增大,并由式(8)知其膜力越来越大。因此,当钢板膜力大于  $P$  时,贯穿块的速度开始减小直到为零,此后弹体受到的阻力计算公式为式(4)。

贯穿块形成的初始条件为

$$u(t = t^*) = 0, \quad v(t = t^*) = v^* \quad (18)$$

式中： $t^*$  为贯穿块形成的时刻， $u$  为贯穿块的速度， $v^* = dh/dt$  为贯穿块形成时刻弹体的速度。

弹体及贯穿块的运动方程为

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = -P, \quad v = \frac{dh}{dt} \tag{19}$$

$$m_q \frac{d^2 w}{dt^2} = P - R_a \tag{20}$$

式中： $m$  为弹体的质量，贯穿块的质量  $m_q = \rho\pi D^2 h'$ ， $D$  为贯穿块的底部半径， $h' = H - h + r_0 \cot\theta_0$  为贯穿块的高度， $R_a$  为板中各联系件的阻力。结合初始条件式(18)由贯穿块、弹体的运动微分方程组成的微分方程组就得到弹体及贯穿块的运动情况。

### 4.2 介质层较薄的情况

如果介质层的厚度较小 ( $H - r_0 \cot\theta_0 < r^*$ )，弹头未完全进入前贯穿块开始形成，用

$$\frac{d(\rho\pi h' D^2 u)}{dt} = P - R_a \quad h < r_0 \cot\theta_0, \quad h' = \frac{r^*}{r_0} h \tan\theta_0 \tag{21}$$

来代替式(20)。对于弹体顶端完全进入以后的阶段，再重新利用式(21)。

## 5 贯穿计算的分析

由文献[2]可知，弹体与介质间的滑动摩擦因数  $\mu' \approx 0.1$ ；介质的剪切屈服强度  $\tau_s^c$  按下式近似计算：对普通混凝土介质， $\tau_s^c = 0.225 \sqrt{f_c}$ ， $f_c$  为混凝土介质的单轴抗压强度；混凝土介质的断裂初度  $K_c = 0.73 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ 。几种常用的混凝土的  $d/(2l)$  值见文献[1]。因数  $\eta_2 = 0.38$ 。

为了说明钢筋混凝土板-钢板对贯穿过程的影响，分别计算了弹体以 500 m/s 的着靶速度侵彻贯穿板厚  $H$  为  $12d$  和  $17d$  的钢板-钢筋混凝土板和混凝土板两种情况。其中当  $H=17d$  时，弹头未完全侵入前贯穿块开始形成；当  $H=12d$  时，弹头完全侵入后贯穿块开始形成。混凝土为 C40，钢板厚  $h_s = 5 \text{ mm}$ ，拉伸应力  $\sigma_s = 31 \text{ MPa}$ 。纵向钢筋为  $\varnothing 20@150$ ，箍筋为  $\varnothing 8@200$ 。弹体为 GBU-12B/B，质量为 241 kg，弹径为 0.273 m，长径比为 2.5。

图 2 中的曲线分别表示弹体在不同厚度的钢筋混凝土板-钢板和混凝土板中加速度随时间变化的情况。从图中可以看出，弹体侵入相同厚度的这两种板时，侵彻阶段弹体的加速度变化曲线重合，说明此时纵向钢筋和钢板还未发挥作用。当贯穿块形成后，钢筋混凝土板-钢板中弹体的加速度明显大于在混凝土板中的加速度，并且加速度曲线比混凝土板多了一个曲线平台。这是因为纵向钢筋和钢板的存在阻碍了贯穿块的运动，钢板膜力随着纵向钢筋和钢板变形的增大而不断增大，当大于弹体作用在贯穿块上的力时，贯穿块开始做减速运动直到速度为零，在这一阶段弹体相对贯穿块的速度不断增大，弹体受到的侵彻阻力开始逐渐增加。当贯穿块停止运动后，弹体的侵彻阻力随弹体速度的减少而降低。因此，在钢筋混凝土板-钢板中弹体加速度随时间的变化过程比混凝土板多了一个曲线平台。

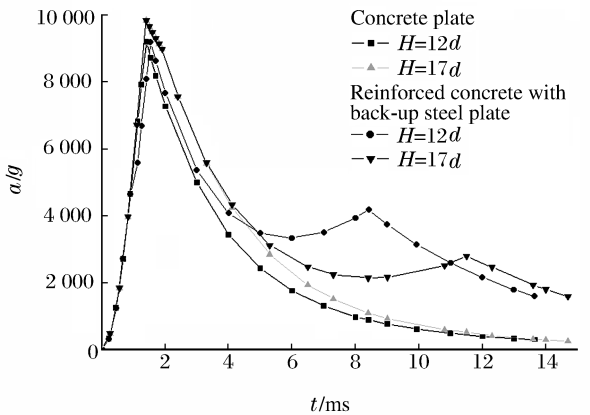


图 2 侵彻贯穿不同的结构时弹体加速度  
Fig. 2 Acceleration of the projectile for penetrating and perforating different structure

从图 3 和图 4 可以看出，对于相同厚度的钢筋混凝土板-钢板和混凝土板，由于纵向钢筋和钢板的存在，使弹体在钢筋混凝土板-钢板中的速度和位移比在混凝土板中的速度和位移小得多，并且板越薄，纵向钢筋和钢板的作用效果越明显。

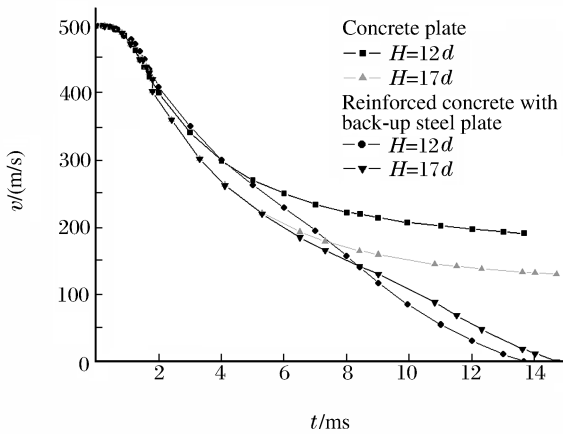


图3 侵彻贯穿不同结构时弹体的速度

Fig. 3 Velocity of the projectile for penetrating and perforating different structures

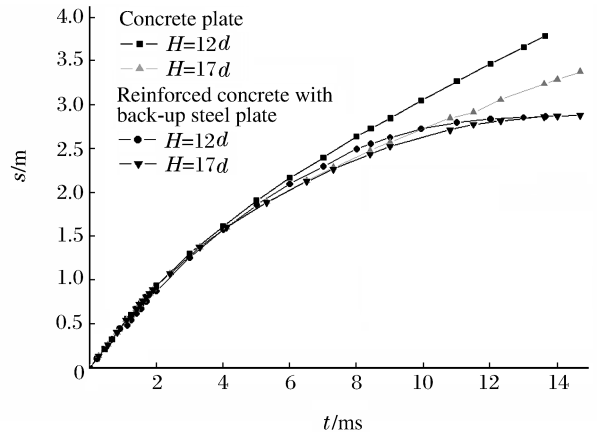


图4 侵彻贯穿不同结构时弹体的位移

Fig. 4 Displacement of the projectile for penetrating and perforating different structures

## 6 结论

(1) 基于裂纹稳定的临界条件建立的贯穿计算模型可以初步解决贯穿问题的分析。

(2) 在弹体侵彻钢筋混凝土板-钢板的过程中,在通常情况下钢板和钢筋对侵彻深度的影响可忽略不计。

(3) 钢板和钢筋的主要作用体现在贯穿过程中。钢板的厚度相对结构而言很薄,提供的是一种膜力;纵向钢筋网可以等效为薄钢板层,类似薄钢板的作用。箍筋起着对破坏介质的约束作用,提高了破坏区介质的残余强度,在一定侵彻速度下,影响可忽略。式(7)、式(8)和式(16)为弹体侵彻、贯穿钢筋混凝土板-钢板时不同厚度钢板、不同配筋率钢筋网的阻力计算提供了简单实用的方法。

(4) 纵向钢筋和钢板的加入能有效地阻碍弹体对混凝土的贯穿,且混凝土结构层越薄其作用效果越明显,这一结论可以用于国防工程的加固改造。

## 参考文献:

- [1] 王明洋,邓宏见,钱七虎.岩石中侵彻与爆炸作用的近区问题研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):1-5.  
WANG Ming-yang, DENG Hong-jian, QAN Qi-hu. Study on the problems of near cavity of explosion and penetration in rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):1-5.
- [2] 王明洋,郑大亮,钱七虎.弹体对混凝土介质侵彻、贯穿的比例换算关系问题[J].爆炸与冲击,2004,24(2):97-103.  
WANG Ming-yang, ZHENG Da-liang, QAN Qi-hu. The scaling problems of penetration and perforation for projectile into concrete media[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):97-103.
- [3] 王明洋,王立云,陈士林.刚性弹在分层介质中垂直侵彻深度计算方法[A].黄风雷,王礼立.第七届全国爆炸力学学术会议论文集[C].昆明,2003:240-249.
- [4] Попов Н Н, Расторгуев Б С, Забегаев А В. Расчет Конструкций на Динамические Специальные Нагрузки[M]. Москва: Высшая школа, 1992:241-245.
- [5] 王明洋,钱七虎,赵跃堂.接触爆炸作用下钢板-刚纤维钢筋混凝土遮弹层设计方法(II)[J].爆炸与冲击,2002,22(2):163-168.  
WANG Ming-yang, QAN Qi-hu, ZHAO Yue-tang. The design method for shelter plate of steel plate and steel fiber reinforced concrete under contact detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(2):163-168.

- [6] Куйвьева В. В. Динамика Железобетонных Сострукций и Сооружений при Интенсивных Кратковременных Водействиях[M]. Москва: Высшаяшкола, 1992:186—192.
- [7] Шамин В. М. Расчет защитных сооружений на действие взрывных нагрузок[M]. Москва: Стройиздач, 1989.

## Theoretical study on the perforation of reinforced concrete with back-up steel plate(RCBSP) by projectiles

WANG Ming-yang<sup>\*</sup>, ZHENG Da-liang, BAI Xiao-yan  
(*Engineering Institute of PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

**Abstract:** Actions of hoop steel-bar, portrait steel-bar, and steel plate on perforation block in RCBSP are discussed. According to the deformation and failure of RCBSP and distribution of energy in time and space, deformation and failure models of RCBSP are established. In addition, resistance formulae of hoop reinforcing steel bar and steel plate to projectile are deduced, and by regarding the reinforcing steel bar net as an equivalent steel plate, the motion equations of projectile and perforation block are proposed. The acceleration, speed, and displacement of projectile in concrete are compared with those in BCBSP, showing the influence of the elements in RCBSP on projectile's displacement field.

**Key words:** mechanics of explosion; deformation and failure model; elastoplastic theory; steel reinforcement concrete; steel plate; projectile

---

\* Corresponding author: WANG Ming-yang  
E-mail address: wmyrf@163.com  
Telephone: 025-80821695