

文章编号: 1001-1455(2007)06-0529-06

弹丸侵彻钢筋混凝土的工程解析模型*

周宁^{1,2}, 任辉启², 沈兆武¹, 何祥², 刘瑞朝², 吴颺²

(1. 中国科学技术大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 洛阳水利工程研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 既考虑了弹丸侵彻过程中受到的动阻力与静阻力, 又考虑了弹丸与钢筋发生碰撞时钢筋对弹丸的直接阻力, 提出了弹丸侵彻钢筋混凝土的工程解析模型。不同初速下弹丸的侵彻深度、侵彻过程中弹丸的位移、速度和负加速度时间历程的计算结果与测试数据符合很好, 弹丸过载在 12 000g~15 000g 之间。该解析模型能够较真实的描述弹丸侵彻钢筋混凝土过程中的运动状态, 并且该模型能够分析配筋结构、配筋尺寸、网眼尺寸对侵彻深度和侵彻过程的影响。

关键词: 爆炸力学; 侵彻; 空腔膨胀理论; 钢筋混凝土

中图分类号: O385

国标学科代码: 130 · 3530

文献标志码: A

1 引言

弹丸对钢筋混凝土的侵彻破坏一直是武器研制和工程防护部门密切关注的问题。刚性弹丸侵彻半无限厚钢筋混凝土靶的过程分为开坑和坑下侵彻两个阶段, 分别形成一个锥形入口坑和一个与弹径相近的柱形孔道。入口坑的形状与深度取决于配筋层的强度和离弹着面的距离, 一般而言, 坑深约为弹丸直径的 1~2 倍^[1]。对于第一层配筋层强度较大且距弹着面的距离小于 2 倍弹径的情况, 侵彻后形成一个浅碟状的弹坑, 随后为一个直径与弹丸直径相当的柱形孔道^[2]。

目前对钢筋混凝土侵彻问题的研究, 通常是忽略钢筋或者将钢筋混凝土靶板等效为混凝土与薄钢板的层状结构, 这样不能真实反映侵彻过程中弹丸与钢筋混凝土的作用, 尤其是不能真实反映侵彻过程中弹丸的过载特性。周宁等^[3]的实验表明侵彻混凝土和侵彻钢筋混凝土过程中弹丸的过载特性有较大差别。M. J. Forrestal 等^[1]、V. K. Luk 等^[4]、D. J. Frew 等^[5]应用球形空腔膨胀理论, 假设混凝土材料满足塑性锁应变和 Tresca 强度准则, 建立了弹丸对钢筋混凝土介质的侵彻公式。但模型认为钢筋的唯一作用仅仅是阻碍混凝土径向裂纹的扩展, 没有考虑钢筋层对弹丸侵彻阻力的影响, 结果, 最终计算误差超过 20%。

本文中在文献[1, 4~5]的基础上, 利用空腔膨胀模型, 考虑不同配筋情况下弹丸与钢筋发生碰撞时的侵彻阻力, 得到卵形头部弹丸侵彻钢筋混凝土的解析模型, 并编程计算该模型下卵形头部弹丸侵彻钢筋混凝土过程中弹丸的位移时间历程、速度时间历程和加速度时间历程。

2 卵形弹丸侵彻混凝土介质的球形空腔膨胀模型

M. J. Forrestal 等^[1]假设弹丸为刚体, 混凝土材料为弹性不可压缩, 满足塑性锁应变和 Tresca 强度准则, 按球形空腔膨胀理论得到了侵彻混凝土过程中弹丸负加速度时间历程、速度时间历程、位移时间历程。

根据球形空腔膨胀理论

$$F_z = m dv/dt = -\pi a^2 (R + N\rho v_1^2) \quad z > 4a \quad (1)$$

* 收稿日期: 2006-05-11; 修回日期: 2006-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(51309-1-6)

作者简介: 周宁(1977—), 男, 博士研究生。

式中: a 为弹丸半径, v_1 为成坑阶段结束后弹体速度, ρ 为混凝土靶体密度, N 为弹丸头部形状系数, R 为混凝土抵抗系数, 可由一系列侵彻试验数据确定。D. J. Frew 等^[5]通过大量实验给出了 R 的表达式

$$R = S f_c \quad (2)$$

$$S = 82.6 f_c^{-0.544} \quad \text{or} \quad S = 72.0 f_c^{-0.5} \quad (3)$$

式中: f_c 为混凝土材料的无侧限抗压强度, 但 f_c 与测试用的混凝土块的大小和形状有关。美国和欧洲国家以直径 150 mm、高度 300 mm 的圆柱体为标准试件测定混凝土抗压强度, 而我国则以边长 150 mm 的立方体为标准试件测定混凝土抗压强度, 两种标准测得的混凝土抗压强度是不同的, 并且测定的混凝土抗压强度与测试试件大小是相关的^[6], 使用(2)~(3)式应注意将实测混凝土靶的无侧限抗压强度换算为标准立方体无侧限抗压强度。

速度时间历程为

$$v = \left(\frac{R}{N\rho} \right)^{1/2} \tan \left\{ \arctan \left[\left(\frac{N\rho}{R} \right)^{1/2} v_1 \right] - \frac{\pi a^2}{m} (RN\rho)^{1/2} (t - t_1) \right\} \quad (4)$$

对(4)式求导可得到侵彻负加速度随时间变化表达式

$$a = \frac{dv}{dt} = - \frac{\pi a^2 R / m}{\cos^2 \left\{ \arctan \left[\left(\frac{N\rho}{R} \right)^{1/2} v_1 \right] - \left(\frac{\pi a^2}{m} \right) (RN\rho)^{1/2} (t - t_1) \right\}} \quad (5)$$

对(4)式积分可得到侵彻位移随时间变化表达式

$$z = \frac{m}{\pi a^2 N\rho} \ln \frac{\cos \left\{ \arctan \left[\left(\frac{N\rho}{R} \right)^{1/2} v_1 \right] - \left(\frac{\pi a^2}{m} \right) (RN\rho)^{1/2} (t - t_1) \right\}}{\cos \left\{ \arctan \left[\left(\frac{N\rho}{R} \right)^{1/2} v_1 \right] \right\}} + 4a \quad (6)$$

3 弹丸与钢筋的相互作用

钢筋受弹丸的冲击作用, 在混凝土介质中的运动是一个非常复杂的问题。实验发现钢筋的响应大致可分为如图 1 所示两个阶段^[7]。(1)弯曲段: 钢筋保持整体响应, 受弹丸冲击作用发生弯曲变形并运动, 其响应类似于一无限长梁在阻尼介质中受冲击载荷作用的动力响应。此时, 钢筋与混凝土对弹丸的阻力相对独立, 钢筋的阻滞作用明显。(2)断裂段: 钢筋弯曲变形, 超过极限弯矩时, 发生断裂。此时的响应类似于两半无限长梁受冲击载荷作用的动力响应。由于此时钢筋失去轴向约束, 钢筋与混凝土介质一起运动, 两者对弹丸的阻力合为一体, 钢筋的阻滞作用微弱, 可忽略。

分析弯曲段钢筋的阻滞作用, 假设钢筋与混凝土为理想粘接, 忽略钢筋与混凝土之间的沿钢筋轴线方向的相对位移; 弹丸与钢筋点接触, 仅在接触点发生相互作用, 且接触点不分离, 钢筋受到来自于弹丸的沿弹丸头部曲率半径方向的法向作用力及滑动摩擦力和混凝土介质的阻力。忽略弹丸与钢筋间的摩擦力, 钢筋对弹丸的阻碍作用集中体现在两者接触点的动力响应上, 不必分析整个钢筋的动力响应。

3.1 弹丸与钢筋的相互运动关系

以弹着点为坐标原点, 建立如图 2 所示的坐标系 $yo z$ 。弧形弹丸直径为 $2r$, 弹头部曲率半径为 s ,

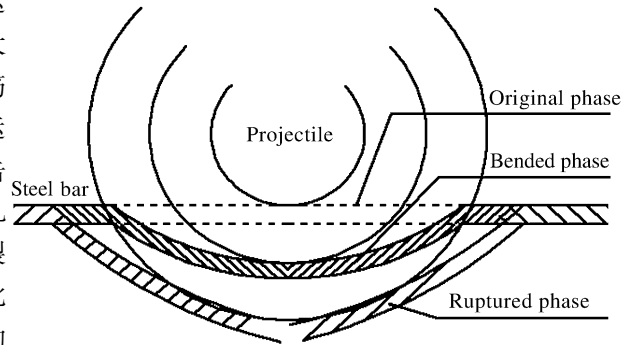


图 1 弹丸与钢筋的相互作用关系

Fig. 1 Collision between projectile and rebar

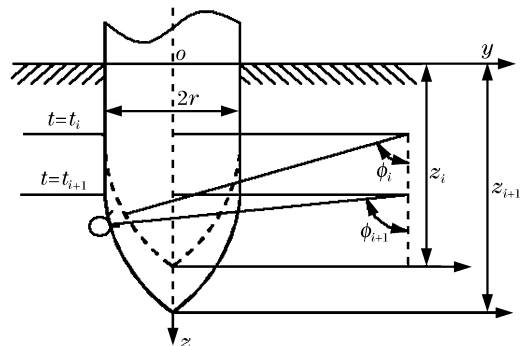


图 2 微小时间内弹丸与钢筋的相对运动

Fig. 2 Relative movement between projectile and rebar in short time

在 t_i 时刻弹丸在 L_i 点与钢筋发生作用,在 t_{i+1} 时刻弹丸在 L_{i+1} 点与钢筋发生作用,余同希等^[8]给出了弹丸运动参数及钢筋运动参数:对弹丸, $dz_{i+1} = z'_i dt + z''_i dt^2/2$, $z_{i+1} = z_i + dz_{i+1}$, $z'_{i+1} = z'_i + dz'_{i+1}$;对钢筋, $w_{i+1} = dz_{i+1} \cos \phi_i$, $w'_{i+1} = z'_{i+1} \cos \phi_i$, $z_{i+1} = z_i + w_{i+1} \cos \phi_i$, $\phi_{i+1} = \phi_i + d\phi_{i+1}$ 。 z 为弹丸在 z 轴方向的位移, w 为钢筋在弹丸径向的位移。

3.2 钢筋的弯曲变形及失效

弹丸使钢筋产生弯曲变形简化为简支理想弹塑性梁受集中力作用的弯曲变形问题。取集中力作用点钢筋截面圆心为坐标原点,取梁的跨度为钢筋与弹丸瞬时接触点的弹丸头部截面直径 $l(t)$,在集中力作用点梁的最大弯矩为

$$M_{\max} = \frac{l(t)}{8} [2P(t) - ql(t)] \tag{7}$$

式中: q 为混凝土开始塑性流动时刚模单位长度上的极限压力, $q = dY(2 + \pi)$, d 为钢筋直径, Y 为混凝土失效应力。

当钢筋弯曲变形过大,钢筋横截面上最大弯矩 M_{\max} 趋于梁的塑性极限弯矩 M_p 时,认为钢筋屈服,直至断裂,从而失去对弹丸的阻滞作用。由理想弹塑性圆形截面梁的弯曲理论^[8],圆形截面梁的最大塑性极限弯矩为

$$M_p = \frac{16}{3\pi} M_e = \frac{d^3}{6} \sigma_s \tag{8}$$

3.3 钢筋对弹丸的侵彻阻力

分析弹丸与钢筋碰撞点的运动,在任意 t 时刻,单位长度钢筋对弹丸的侵彻阻力为

$$P(t) = q + \frac{\pi \rho d^2}{4} [z'(t)]^2 \tag{9}$$

3.4 弹丸的运动方程

任意时刻 t ,弹丸受到混凝土介质的侵彻阻力和钢筋的阻力,其中混凝土阻力由(1)式计算。假设配筋为方形网格状,弹丸轴线通过方形网格中心点,则共有四个对称法向集中力 $P(t)$ 作用于弹丸,与弹丸轴向的夹角均为 $\phi(t)$,则弹丸的运动方程为

$$m\ddot{z}(t) = -[F_z(t) + 4P(t)\cos\phi(t)] \tag{10}$$

弹丸未与钢筋接触或钢筋已经断裂失效时, $P(t) = 0$ 。

4 不同钢筋分布情况下弹丸与钢筋作用分析

弹丸侵彻钢筋混凝土过程中由于钢筋层分布密度不同,弹丸与钢筋层的作用大致有两种情况:一是当钢筋网间的间距较大,任意时刻弹丸都只与一层钢筋网发生作用,与上层钢筋网作用结束后再与下层钢筋网发生作用;另一种情况是当钢筋网间的距离较小,弹丸与上层钢筋网间的作用还没结束时就同时与下一层钢筋网发生作用。不同钢筋分布情况下弹丸与钢筋的作用过程分析如下。

4.1 弹丸同时与两层钢筋网发生作用的情况 ($x_{i+1} - x_i \leq l_1$)

当 $x_i < z \leq x_{i+1}$ 时

$$a_{i+1} = \frac{dv}{dt} = -\frac{A}{\cos^2(B + E - Dt)} - \frac{4P(t)(x_i + l_1 - z_i)/s \times 2[\sqrt{s^2 - (z_i - x_i - l_1)^2} - s + r]}{m} \tag{11}$$

$$v_{i+1} = v_i + a_{i+1}(t - t_i) \tag{12}$$

$$z_{i+1} = z_i + (v_i - a_{i+1}t_i)(t - t_i) - a_{i+1}(t^2 - t_i^2)/2 \tag{13}$$

当 $x_{i+1} < z \leq x_i + l_1$ 时

$$a_{k+1} = \frac{dv}{dt} = -\frac{A}{\cos^2(B + E - Dt)} - \frac{4P(t)(x_i + l_1 - z_k)/s \times 2[\sqrt{s^2 - (z_k - x_i - l_1)^2} - s + r]}{m} - \frac{4P(t)(x_{i+1} + l_1 - z_k)/s \times 2[\sqrt{s^2 - (z_k - x_{i+1} - l_1)^2} - s + r]}{m} \tag{14}$$

$$v_{k+1} = v_k + a_{k+1}(t - t_k) \tag{15}$$

$$z_{k+1} = z_k + (v_k - a_{k+1}t_k)(t - t_k) - a_{k+1}(t^2 - t_k^2)/2 \tag{16}$$

式中： x_i 为弹丸与第 i 层钢筋发生作用处的位置， x_{i+1} 为弹丸与第 $i+1$ 层钢筋发生作用处的位置， t_i 、 v_i 、 z_i 分别为第 i 步计算结束时的时间、弹丸速度和弹丸位移； t_{i+1} 、 v_{i+1} 、 z_{i+1} 分别为第 $i+1$ 步计算结束时的时间、弹丸速度和弹丸位移。以下各式中符号意义相同。

4.2 弹丸与各层钢筋分别发生作用 ($x_{i+1} - x_i > l_1$)

当 $x_i < z \leq x_i + l_1$ 时

$$a_{i+1} = \frac{dv}{dt} = -\frac{A}{\cos^2(B + E - Dt)} - \frac{4P(t)(x_i + l_1 - z_i)/s \times 2[\sqrt{s^2 - (z_i - x_i - l_1)^2} - s + r]}{m} \tag{17}$$

$$v_{i+1} = v_i + a_{i+1}(t - t_i) \tag{18}$$

$$z_{i+1} = z_i + (v_i - a_{i+1}t_i)(t - t_i) - a_{i+1}(t^2 - t_i^2)/2 \tag{19}$$

当 $x_i + l_1 < z \leq x_{i+1}$ 时

$$a_{k+1} = \frac{dv}{dt} = -\frac{A}{\cos^2(B + E - Dt)} \tag{20}$$

$$v_{k+1} = v_k + a_{k+1}(t - t_k) \tag{21}$$

$$z_{k+1} = z_k + (v_k - a_{k+1}t_k)(t - t_k) - a_{k+1}(t^2 - t_k^2)/2 \tag{22}$$

5 计算结果与分析

选取适当的计算时间步长 dt ，用前一步计算得到的加速度、速度、位移计算出该步的加速度、速度、位移量。每一步计算时均需用(7)~(9)三式联合判断钢筋是否已经失效，若失效则 $P(t) = 0$ ，并且每一步计算后要判断速度是否小于等于零，若小于等于零则退出计算。

弹丸参数：直径 $2r = 100$ mm，头部曲率半径 $\Psi = 4$ ，弹丸质量 $m = 25$ kg。混凝土材料参数： $E = 26.1$ GPa， $\rho = 2.5$ t/m³，标准圆柱体混凝土的单轴无约束抗压强度 $f_c = 28$ MPa，抗剪强度 $Y = 3.5$ MPa。钢筋材料参数： $E_s = 200$ GPa， $\rho_s = 7.85$ t/m³，屈服应力 $\sigma_s = 500$ MPa。

实验用多层配筋半无限钢筋混凝土靶板，其配筋直径为 8 mm，网眼间距为 60 mm × 60 mm，第一层配筋埋深距着弹面为 50 mm，随后 4 层配筋间距为 50 mm，再其后间隔 750 mm 后为第 5 层配筋，5、6 和 6、7 两层配筋间距为 50 mm，7、8 层配筋间距为 760 mm，最后四层配筋间距为 50 mm。实验测试了弹丸以 304、310、452、495、629 m/s 侵彻钢筋混凝土过程中弹丸负加速度时间历程。弹丸侵彻钢筋混凝土靶板的计算结果见表 1。

表 1 侵彻深度实测值与计算值

Table 1 Experimental and calculated results of penetration depth

v_0 /(m/s)	L_e /m	L_c /m	$((L_c - L_e)/L_e)/\%$
304	0.554	0.5090	-8.12
310	0.590	0.5245	-11.1
452	0.960	0.9176	-4.41
492	1.041	1.0066	-3.30
629	1.550	1.4560	-6.06

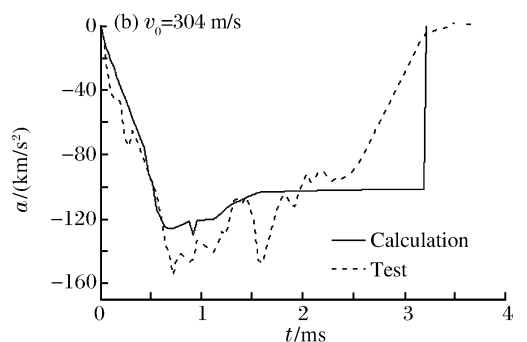
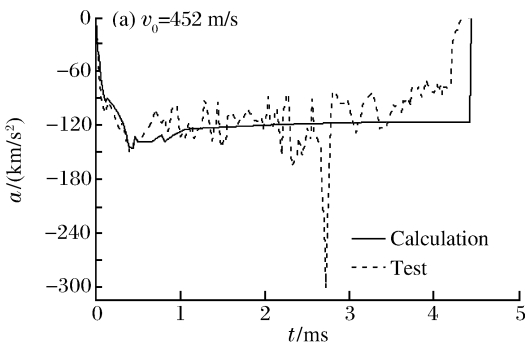


图 3 不同初速下侵彻过程中弹丸负加速度时程曲线

Fig. 3 Deceleration histories of projectiles with different impact velocities in the process of penetration

图 3 为 452 m/s 和 304 m/s 初速下弹丸侵彻过程中的负加速度时程曲线。以 452 m/s 初速侵彻时弹丸的最大负加速度出现在 0.45 ms 处,为约 -15 000 g(g 为重力加速度);而 304 m/s 初速下弹丸的最大负加速度出现在 0.80 ms 处,为约 -14 000g。实测弹丸负加速度曲线毛刺较多,主要是由于应力波在钢筋混凝土结构与弹丸间传播引起的。由于计算了钢筋的作用,从图中可以看到在钢筋网所在位置弹丸的负加速度有所增大,这种现象显然是符合实际情况的。图 4 为侵彻过程中弹丸速度时程历程的计算值和实测值;图 5 为侵彻过程中弹丸位移时间历程的计算值和实测值。结果表明:引入钢筋对弹丸的直接碰撞阻力,使模型更为合理,计算结果与实验数据吻合较好,精度比不考虑钢筋阻力有较大的提高。

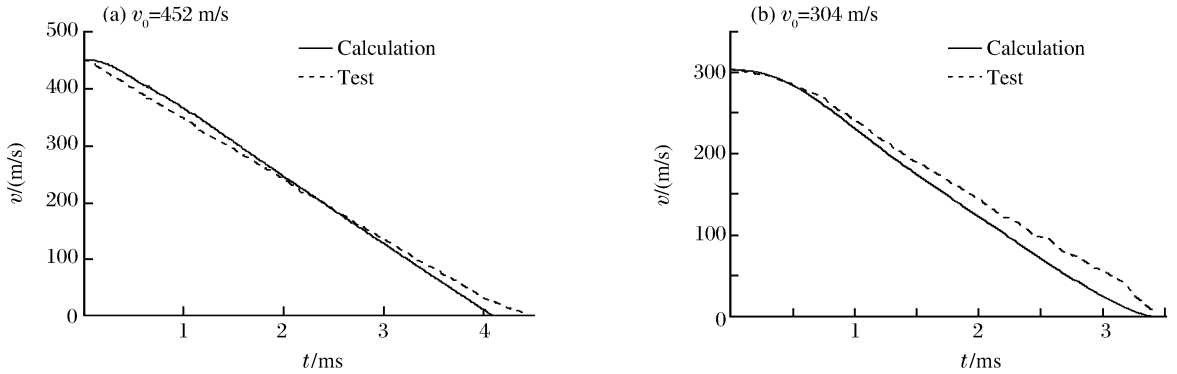


图 4 不同初速下弹丸速度时程曲线

Fig. 4 Velocity vs time of projectiles at different impact velocities

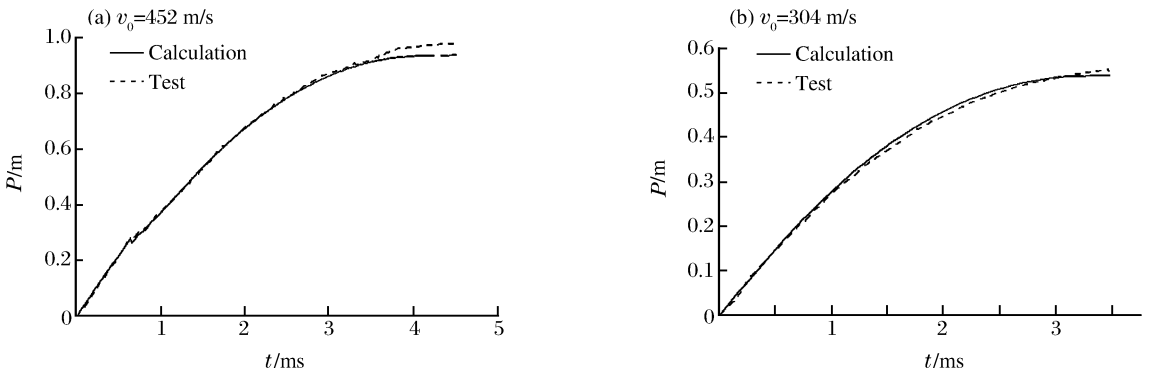


图 5 不同初速下弹丸位移时程曲线

Fig. 5 Displacement vs time of projectiles at different impact velocities

6 结 论

弹丸侵彻钢筋混凝土介质的工程分析模型考虑了弹丸与钢筋发生碰撞时钢筋对弹丸直接阻力。另外,该模型既考虑了弹丸参数(如弹丸直径,弹丸头部曲率半径等)的对侵彻过程的影响,也考虑了钢筋混凝土靶板参数(如混凝土强度)和靶板配筋的结构参数(钢筋孔网直径、各层配筋的位置、钢筋直径等)对侵彻过程的影响。因此应用该模型可以计算各种尺寸卵形头部弹丸以不同初速侵彻不同强度不同配筋结构的钢筋混凝土靶,计算结果可为攻坚武器及防护工程设计提供参考。

参考文献:

[1] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(4):395-405.
 [2] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 弹丸侵彻钢筋混凝土中过载特性的实验研究[J]. 实验力学,2006,21(5):572-578.
 ZHOU Ning, REN Hui-qi, SHEN Zhao-wu, et al. Experimental study on overload characteristics of projectile pen-

etrating reinforced concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006,21(5):572-578.

- [3] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 弹体侵彻混凝土和钢筋混凝土的实验研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2006,36(10): 1021-1027.
ZHOU Ning, REN Hui-qi, SHEN Zhao-wu, et al. Experimental study on the projectile penetration concrete targets and reinforced concrete targets[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006,36(10): 1021-1027.
- [4] Luk V K, Forrestal M J. Penetration into semi-infinite reinforced-concrete targets with spherical and ogival nose projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1987,6(4):291-301.
- [5] Frew D J, Hanchak S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998,21(6):489-497.
- [6] 过镇海. 混凝土的强度和变形实验基础和本构关系[M]. 北京:清华大学出版社,1997:10-21.
- [7] 欧阳春,赵国志,杜中华,等. 弹丸垂直侵彻钢筋混凝土介质的工程解析模型[J]. *爆炸与冲击*, 2004,24(3):273-278.
OU-YANG Chun, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua, et al. An engineering analytical model for projectiles to penetrate normally into semi-infinite reinforced concrete targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004,24(3):273-278.
- [8] 余同希,章亮炽. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1992:16-22.

An engineering analytical model for projectiles to penetrate into semi-infinite reinforced concrete targets

ZHOU Ning^{1,2}, REN Hui-qi², SHEN Zhao-wu^{1*},
HE Xiang², LIU Rui-zhao², WU Biao²

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;*

2. *Luoyang Institute of Hydraulic Engineer, Luoyang 471023, Henan, China*)

Abstract: Dynamic and static resistances as well as resistance of steel bar to projectile when projectile colliding with steel bar are taken into consideration in the proposed engineering analytical model. Penetration depth and displacement, deceleration, velocity histories of projectiles with different impact velocities during penetration are calculated by using the proposed engineering analytical model and these calculated results are in good agreement with the experimental results. The peak rigid-body accelerations are between $-12\ 000\ g$ and $-15\ 000\ g$ (acceleration of gravity). The proposed model can represent the movement states of a projectile during its penetrating a semi-infinite reinforced concrete target, and it can be used to analyze the effect of configuration, size and mesh size of a steel bar on penetration depth and process.

Key words: mechanics of explosion; penetration; cavity-expansion theory; reinforced concrete

* Corresponding author: SHEN Zhao-wu
E-mail address: zwshen@ustc.edu.cn
Telephone: 86-551-3601255