

文章编号: 1001-1455(2000)01-0079-04

# 弹体侵彻深度计算公式对比研究<sup>①</sup>

尹放林<sup>1</sup>, 严少华<sup>2</sup>, 钱七虎<sup>2</sup>, 王明洋<sup>2</sup>

(1. 南京军区工程设计研究所, 江苏 南京 210016)

(2. 南京工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 讨论了目前应用较广的弹体对混凝土侵彻深度计算公式, 并与试验结果进行对比, 分析各经验公式及理论公式的计算误差。

关键词: 混凝土; 侵彻深度; 高速弹体; 对比分析

中图分类号: O348 文献标识码: A

## 1 引 言

目前计算弹体对岩石和混凝土等靶标材料的侵入深度公式不下 40 种<sup>[1]</sup>, 各种公式方法互不相同, 千差万别, 每个经验公式都有各自的应用范围和应用条件, 最终的计算结果也肯定存在一定的差别。对于土体等软弱介质的侵彻深度经验公式比较成熟, 各个经验公式的计算结果精确度较高。而对于岩石和混凝土等脆性固体介质的侵彻深度经验公式就不够理想。在众多的复杂的侵彻深度公式中, 真正应用较广且精度较高的公式并不多。我们着重介绍几个目前应用较广的岩石和混凝土侵彻深度经验公式, 并就各个公式的应用范围和计算结果进行讨论, 最后还与试验结果进行比较并分析公式计算误差。

## 2 常用的常规武器侵彻深度经验公式

在抗常规武器工程设计研究中, 世界各国都有各自的计算侵彻深度公式, 这些公式在实际工程设计中得到广泛应用, 并在实际使用过程中不断修正和完善, 精度较高。

在我国, 一般采用如下的弹体侵彻深度计算公式<sup>[2]</sup>

$$H = \lambda_1 \cdot K_d \frac{P}{d^2} \cdot v_0 \quad (1)$$

式中:  $\lambda_1$  为弹形修正系数,  $P$  为弹体质量 (kg),  $d$  为弹体直径 (m),  $K_d$  为反映介质特性的实验系数,  $v_0$  为弹体着靶速度 (m/s),  $H$  为侵彻深度 (m)。

该式基于原苏联的“别列赞”公式, 假定侵彻阻力与炮弹在介质中运动速度以及炮航弹横截面面积成正比, 通过试验确定有关系数。试验是在特定的靶体和特定的弹种以及特定的侵彻速度条件下进行的, 各种条件都带有一定的局限性。在原型实弹试验中所用的弹径在 0.075 ~ 0.203m 之间, 超出这个范围就要进行修正。

① 收稿日期: 1999-03-02; 修订日期: 1999-07-05  
基金项目: 国家自然科学基金项目(59708012)。  
作者简介: 尹放林(1963—), 男, 工学博士, 工程师。

系数用来反映靶标介质的抗侵彻性能。由于实弹射击试验是在少量的几种强度等级混凝土靶体介质中进行的,规范中只提供少数几种强度等级混凝土介质参数。目前对高强度等级混凝土还缺乏数据,需要进一步研究。

在美国陆军《抗常规武器设计规范》中,建议采用如下经验公式计算弹体侵彻钢筋混凝土深度<sup>[3]</sup>

$$H = \frac{18.692 \times P_p \times d^{0.215} \times v_0^{15}}{(f_c)^{0.5}} + 0.0127 \times d \quad (2)$$

式中:  $P_p$  为弹体截面荷载 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), 等于弹体质量与弹体横截面面积之比;  $f_c$  为混凝土抗压强度 (Pa)。

1964 年,美国国防研究委员会 (NDRC) 提出一个不变形射弹侵彻大体积混凝土的理论,并根据这个理论结合侵彻试验数据提出一个侵彻深度公式<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{H}{d} &= 60.449 \times \left[ \frac{180.0}{(f_c)^{0.5}} \times \frac{N \times W}{d^{2.8}} \times \left[ \frac{3.281 \times v}{1000} \right]^{1.8} \right]^{0.5} & \frac{H}{d} \leq 2.0 \\ \frac{H}{d} &= 1 + 30.225 \times \left[ \frac{180.0}{(f_c)^{0.5}} \times \frac{N \times W}{d^{2.8}} \times \left[ \frac{3.281 \times v}{1000} \right]^{1.8} \right] & \frac{H}{d} > 2.0 \end{aligned} \quad (3)$$

公式用系数  $K$  反映靶体介质的抗侵彻特性,  $K$  是纯经验常数, 当时提出  $K$  值范围为 2 ~ 5。1966 年, Kennedy 利用大量的试验数据对原来的 NDRC 侵彻深度公式作了一些调整, 明确地表明侵彻系数与靶体介质强度有关, 并且两者关系表示为

$$K = 180 / (f_c)^{0.5}$$

式中:  $W$  为弹体质量 (kg);  $N$  为弹头形状系数, 对于平头弹  $N=0.72$ , 钝头弹  $N=0.84$ , 球型弹头  $N=1.00$ , 卵型和锥型弹头  $N=1.14$ ; 公式中其它符号意义同前。

除了各国抗常规武器规范中推荐的侵彻深度公式, 还有许多其它的侵彻深度公式在使用。目前应用较广且可信度较高的公式由美国桑地亚 (SNL) 国家实验中心与美国陆军工程兵水道试验站 (WES) 提供<sup>[1]</sup>

$$H = \frac{W}{A} \times \frac{N_{rc}}{\rho} \times \left| \frac{43.715 \times v_0}{3} \times \sqrt{\frac{\rho}{\sigma_{rc}}} - \frac{175.562}{9} \times \log \left[ 1 + \frac{2.989}{4} \times v_0 \times \sqrt{\frac{\rho}{\sigma_{rc}}} \right] \right| \quad (4)$$

式中: 对于卵型弹头,  $N_{rc} = 0.863 \left[ \frac{4 \Psi^2}{4 \Psi - 1} \right]^{1/4}$ ,  $\sigma_{rc} = \sigma_c \left[ \frac{\text{RQD}}{100} \right]^{0.2}$ , 对于锥型弹头,  $N_{rc} = 0.805 \cdot (\sin(\eta_c))^{-0.5}$ ;  $A$  为弹体截面面积 ( $\text{m}^2$ );  $\Psi$  为弹头曲率半径与弹丸直径之比,  $\eta_c$  为弹头锥尖半角,  $\sigma_c$  为无侧限抗压强度 (Pa); RQD 反映岩石和混凝土质量的定量指标, 一般认为 RQD 大于 20 而小于 100; 公式中其它符号意义同前。

WES 公式用三个参数反映靶体的特性, 包括岩体质量系数、岩石无侧限强度和岩体质量密度, 一定程度上考虑了现场靶体介质的不连续性。公式中参数意义较明确, 容易确定, 对于计算弹体在岩石和混凝土介质的侵彻深度精度较高。

从上述公式可以看出: 四个经验公式都是用来计算弹体对混凝土等脆性介质的侵彻深度, 且都比较适合半无限靶标介质。一般计算有限厚度的靶标介质侵彻深度需要在此基础上进行调整。公式使用目的相同, 但数学表达完全不同。式(1)直接引入一个系数来反映靶体介质的抗侵彻性能, 侵彻深度与弹体侵彻速度成正比。式(2)中侵彻深度与弹体着靶速度的 1.5 次方成正比, 并直接引用靶体介质强度参数反映介质的抗侵彻性能, 公式与弹头形状没有直接关

系。公式(3)实际上分为两个,以两倍弹体直径的深度为界限,根据侵彻深度的不同而采用不同的计算公式。我们认为深度分段计算是比较合理的,因为深度不一样,侵彻阻力肯定不一样。在式(3)中侵彻深度与弹体速度的 1.8 次方成正比,对弹头形状影响只是简单地引用一个系数反映。侵彻深度公式(3)的主要特点是以侵彻贯穿理论为依据,而不是纯粹的经验公式,因此外推适用范围时,计算结果的置信度也较高。在式(4)中侵彻深度与弹体速度关系是一个复杂的对数函数关系,公式中直接引入靶体介质的抗压强度反映介质材料的抗侵彻性能。

### 3 侵彻深度理论计算公式

经验公式是在给定弹体和靶体条件下进行试验而得到的,随着靶体材料不断改进,弹体形状、种类、性能的不断更新,原来经验公式所采用试验数据资料库就显得不足,需要针对新的靶体和弹种更新数据库。我们利用球型空腔膨胀理论,推导出了考虑弹体侧壁摩擦阻力的计算侵彻深度的理论公式<sup>[5]</sup>,适应各种靶体和弹体,用常微分方程表示

$$m dv_z/dt = - (F_z + F'_z), \quad v_z = dz/dt \tag{5}$$

式中:  $F_z$ 、 $F'_z$  分别是弹体侵彻过程中的头部阻力和侧壁阻力,  $F_z = \alpha + \beta v_z^2$ ,  $F'_z = \mu_s v_z z$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$  是与靶体材料特性和弹头形状特征有关的系数<sup>[6]</sup>, 对于弧型弹头

$$\alpha = \pi a^2 AK [1 + 4\mu\Psi^2(\pi/2 - \theta_0) - \mu(2\Psi - 1)(4\Psi - 1)^{0.5}]$$

$$\beta = \pi a^2 \rho B [ \frac{8\Psi - 1}{24\Psi^2} + \mu\Psi^2(\frac{\pi}{2} - \theta_0) - \frac{\mu(2\Psi - 1)(6\Psi^2 + 4\Psi - 1)(4\Psi - 1)^2}{24\Psi^2} ]$$

$$\theta_0 = \arcsin(\frac{\Psi - 1/2}{\Psi})$$

式中:  $a$  是弹体半径,  $\Psi$  是弹头曲率半径,  $\mu$  是弹体侧壁滑动摩擦系数,  $A$ 、 $B$  是由空腔膨胀理论确定的靶体介质常数,  $K$  是靶体材料体积模量。

方程(5)是一个非线性偏微分方程,可以由弹体侵彻边界条件,用数值计算方法确定方程的解。不同弹体形状和靶体材料,各种参数不同,具体详见文献[6]。

### 4 侵彻深度计算结果讨论

前面介绍了目前在上世界上应用范围较广的几个侵彻深度公式,并就它们的应用条件范围进行了讨论分析。下面利用前述五个公式,针对混凝土靶体介质,分别计算弹体对靶标的侵彻深度,比较各种公式之间深度计算结果的差异。采用文献[6]中提供的混凝土靶体参数。弹体质量  $m = 5.9\text{kg}$ , 弹径  $a = 0.0762\text{m}$ 。弧型弹头,弹头曲率半径  $\Psi = 1.5$ 。混凝土无侧限抗压强度,抗剪屈服强度  $\tau_0 = 95\text{MPa}$ , 材料密度  $\rho_0 = 2240\text{kg/m}^3$ , 体积模量  $K = 9.0\text{GPa}$ , 锁变压缩体积应变  $\eta = 0.04$ 。对于混凝土质量系数 RQD 的取值并没有什么资料可以借鉴,这里取

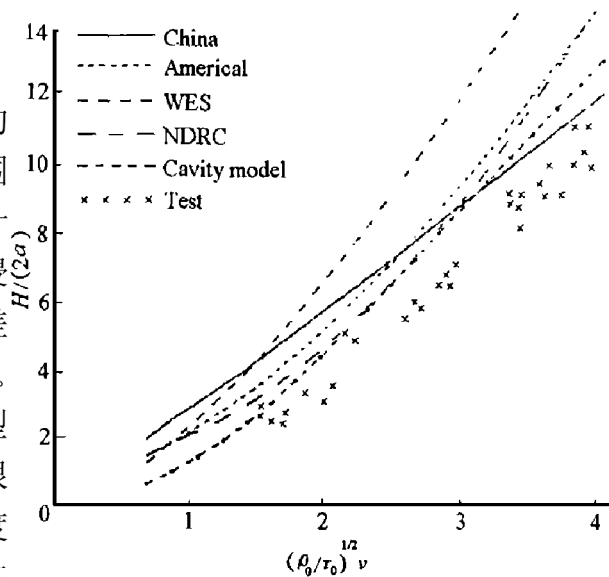


图 1 弹体侵彻深度结果比较  
Fig.1 Penetration depth contrast analysis

平均值,  $RQD=50$ 。靶体侵彻屈服系数  $K_d=0.7$ 。弹形影响系数  $\lambda_1=1.17$ 。

图 1 采用无量纲参数  $H/2a$  和  $(\rho_0/\tau_0)^{1/2}v$  来表示弹体的侵彻深度和速度, 分析经验公式和理论公式及试验结果之间的差异。从图中可以看出, 各个经验公式的计算结果互不相同, 与试验结果也有一定差距。在《抗常规武器设计规范》中提供的侵彻深度公式计算结果偏于保守, 这反映了人们对于弹体冲击侵彻问题还不大了解时, 而在实际工程中求稳的心态。我国公式与国外公式相比, 在低速侵彻时偏大, 而在高速冲击时又偏于不安全, 需要进行调整。理论公式计算结果与试验数据较吻合。WES 公式主要由岩体侵彻试验结果导出, 较适应于岩体侵彻计算, 对于混凝土侵彻计算结果则偏大。

### 参考文献:

- [1] Heuze F E. An Overview of Projectile Penetration into Geologic Materials, with Emphasis on Rocks [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1990, 27(2).
- [2] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [3] Department of the Army. Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual [R]. TM5-855-1, 1986.
- [4] 张殿臣. 射弹对钢筋混凝土结构的冲击局部作用[J]. *防护工程*, 1987, 34(4): 59~71.
- [5] 尹放林, 王明洋, 钱七虎. 弹体垂直侵彻深度工程计算模型[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(4): 333~339.
- [6] 尹放林. 弹体侵彻问题的理论与试验研究[D]. 南京: 工程兵工程学院, 1996.

## Contrast Analysis on Calculation of Penetration Depth of Projectile

YIN Fang-lin<sup>1</sup>, YAN Shao-hua<sup>2</sup>, QIAN Qi-hu<sup>2</sup>, WANG Ming-yang<sup>2</sup>

(1. *Nanjing Military Engineering Institute, Nanjing 210016, China*)

(2. *Nanjing Engineering Institute, Nanjing 210007, China*)

**Abstract:** The main object of this paper is to discuss the calculation formula for projectile penetration into concrete, to compare the formula with test, and analyze the calculation error between the experimental formula and the theoretical formula.

**Key words:** concrete; penetration depth; projectile with high speed; contrast analysis