

相似理论与量纲分析法相结合的钻地弹侵彻岩体经验公式

刘绍鏊^{1,2}, 孙惠香¹, 张悦¹, 黄文文², 冯拓³

(1. 空军工程大学机场建筑工程系, 西安, 710038; 2. 94900 部队, 福建漳州, 363000; 3. 95832 部队, 湖北广水, 410072)

摘要 弹体侵彻问题一直是热点的研究课题, 目前对岩体侵彻深度的预测主要依靠经验公式。由于常见的经验公式是在老式弹种或一般航弹的基础上总结出来的, 不适合新发展使用的钻地弹, 部分公式计算结果与实际偏差较大, 需对经验公式进行修正。利用相似理论和量纲分析法确定影响侵彻深度的关键参数, 建立函数关系式, 通过大量数据拟合出钻地弹侵彻岩体的经验公式, 并利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对钻地弹侵彻岩体进行数值模拟, 其结果与拟合公式和常见的经验公式相比较, 表明拟合公式与模拟结果吻合较好, 可用于钻地弹侵彻岩体深度的预测。

关键词 钻地弹; 经验公式; 侵彻; 岩体; 量纲分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.017

中图分类号 U453.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0099-05

The Research on An Empirical Formula for Earth Penetrator Weapons Penetrating Rock Targets

LIU Shaoliu^{1,2}, SUN Huixiang¹, ZHANG Yue¹, HUANG Wenwen², FENG Tuo³

(1. Department of Airfield Architecture Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 94900, Zhangzhou 363000, Fujian, China; 3. Unit 95832, Guangshui 410072, Hubei, China)

Abstract: Projectile penetration is always a hot research topic, and the prediction of the penetration depth of the rock targets is mainly depended on the empirical equations. The common empirical formulas are summation of the knowledge of the old bombs or the general aviation bombs, they are not suitable for the new development of the earth penetrator weapons, the calculated results of some formulas are far from the actual results, and the empirical formulas are necessarily modified. The similarity theory and the dimensional analysis method are used to determine the key parameters affecting penetration depth, and the function relation is established. Then the empirical formula of the earth penetrator weapons penetrating rock targets is fitted through a large number of data. Numerical simulation is carried out on the earth penetrator weapons penetrating rock targets by ANSYS/LS-DYNA. Compared with the results of the fitting formula and the common empirical formulas, the result indicates that the results of the numerical simulation are well

收稿日期: 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(51208506)

作者简介: 刘绍鏊(1991—), 男, 江西南昌人, 硕士生, 主要从事结构工程研究. E-mail: 15702977989@163.com

引用格式: 刘绍鏊, 孙惠香, 张悦, 等. 相似理论与量纲分析法相结合的钻地弹侵彻岩体经验公式 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 99-103. LIU Shao-liu, SUN Hui-xiang, ZHANG Yue, et al. The Research on An Empirical Formula for Earth Penetrator Weapons Penetrating Rock Targets [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 99-103.

consonant with the results of fitting formula, and the fitting formula can be applied for predicting the depth of earth penetrator weapons penetrating rock targets.

Key words: earth penetrator weapons; empirical formula; penetration; rock; dimensional analysis

在防护工程中,岩体通常可以作为抵御武器破坏的天然屏障,坚实的自然岩层对抵抗杀伤武器特别是大口径常规武器有良好的防护能力^[1]。随着防护结构向深埋、大跨发展,重要的大型防护工程或抗力要求较高的工程多在岩体中修筑,因此研究弹体在岩体中的侵彻效应对地下防护工程建设和武器战斗部设计都具有重要的现实意义。

与弹体侵彻混凝土的研究相比,由于岩体中存在裂隙,材料性质不均匀,各向异性明显,材料关系相对复杂,加之岩体类靶体制作困难,因此弹体侵彻岩体的试验研究要少得多,而由此总结出的经验公式也相对较少。据统计,国内外公布的各弹种侵彻工程材料和地质材料侵彻深度的经验公式不下40种,但用于岩体侵彻计算的不多^[2-6]。这些经验公式大部分是在20世纪六七十年代,利用老式弹种或一般航弹进行大量试验总结出来的,而新研制的钻地弹具有大长径比、速度快、钻地深等特点,是否适用已有的经验公式还有待进一步研究。因此,本文针对钻地弹的特点,对侵彻岩体深度进行了理论研究和数值模拟。

1 钻地弹侵彻岩体相似性分析

表征钻地弹侵彻性能的主要指标是弹体在岩体中的侵彻深度,它是侵彻效果的最终体现。影响钻地弹侵彻深度 H 的物理力学参数主要有^[7-8]:

1) 钻地弹参数:弹体直径 D 、弹体长度 L 、弹体头部长度 L_n 、弹体密度 ρ_p 、弹体质量 M 、弹体速度 V 、弹体弹性模量 E_p 、弹体抗压强度 σ_{cp} 。

2) 岩体参数:岩体弹性模量 E_t 、岩体密度 ρ_t 、岩体抗压强度 σ_c 、岩体抗剪强度 σ_{ct} 、岩体抗拉强度 σ_{ft} 、岩体应变率 $\dot{\epsilon}_t$ 。

3) 发射参数:弹着角 α 、攻角 θ 。

4) 其他参数:重力加速度 g 、侵彻作用时间 t 。

$$H = f(L, D, L_n, M, V, \alpha, \theta, \rho_p, \sigma_{cp}, E_p, \rho_t, \sigma_c, \sigma_{ct}, \sigma_{ft}, E_t, \dot{\epsilon}_t, g, t) \quad (1)$$

由于岩体的抗压、抗拉、抗剪强度是相互关联的,岩体应变率也与强度、弹性模量有关系,可只保留 σ_c 的影响。弹体材料力学性能远强于靶体且假设弹体在侵彻过程中不变形,弹体材料密度变化不大,可近似为常数, ρ_p 、 σ_{cp} 、 E_p 的影响均可以忽略。本文仅考虑正侵彻、零攻角情况,即 $\alpha = \theta = 0^\circ =$

Const,则式(1)可进一步退化为:

$$H = f(L, D, L_n, M, V, \rho_t, \sigma_c, g, t) \quad (2)$$

根据 π 定理,若选择 D 、 M 、 V 为独立变量^[9],把式(2)写成 π 的指数方程式(ρ_t 、 σ_c 简写为 ρ 、 σ),则有下式:

$$\pi = H^{a_1} L^{a_2} D^{a_3} L_n^{a_4} M^{a_5} V^{a_6} \rho^{a_7} \sigma^{a_8} g^{a_9} t^{a_{10}} \quad (3)$$

在质量系统 MLT 中列出量纲矩阵^[9]:

	H	L	D	L_n	M	V	ρ	σ	g	t
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
M	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
L	1	1	1	1	0	1	-3	-1	1	0
T	0	0	0	0	0	-1	0	-2	-2	1

(4)

对量纲矩阵求解可得:

$$\pi_1 = \frac{H}{D}; \pi_2 = \frac{L}{D}; \pi_3 = \frac{L_n}{D}; \pi_4 = \frac{\rho D^3}{M} \quad (5)$$

$$\pi_5 = \frac{\sigma D^3}{MV^2}; \pi_6 = \frac{gD}{V^2}; \pi_7 = \frac{Vt}{D}$$

则式(1)可写成无量纲函数关系式:

$$\frac{H}{D} = f\left(\frac{L}{D}, \frac{L_n}{D}, \frac{\rho D^3}{M}, \frac{\sigma D^3}{MV^2}, \frac{gD}{V^2}, \frac{Vt}{D}\right) \quad (6)$$

根据试验数据以及模型试验设计要求,可将式(5)近似写为:

$$\frac{H}{D} = NK f\left(\frac{\rho D^3}{M}, \frac{\sigma D^2}{Mg}, \frac{gD}{V^2}\right) = \gamma NK \left(\frac{M}{\rho D^3}\right)^a \left(\frac{Mg}{\sigma D^2}\right)^b \left(\frac{V^2}{gD}\right)^c \quad (7)$$

式中: K 为质量修正系数; N 为弹头形状系数,仍采用Young公式中的弹形系数,虽然Young公式量纲不符,但弹形系数表达式是无量纲的,且对侵彻的影响与其他因素不关联^[7],则

$$N = \begin{cases} 0.56 + 0.18L_n/D, & \text{卵形弹头} \\ 0.56 + 0.25L_n/D, & \text{锥形弹头} \end{cases} \quad (8)$$

2 钻地弹侵彻岩体经验公式

鉴于保密等方面的原因,从公开的资料并不能完全得到新型钻地武器战斗部的技术指标以及大量的试验结果数据,但国内外许多学者利用缩小比例的模型弹和长杆弹进行了许多模型试验,具有一定的参考价值,现以左魁等人^[2]所做的模型试验为依据,结合其他文献数据,得出拟合结果。

该试验原型钻地弹为BLU-109/B半穿甲战斗

部,缩尺比例为 1:12.28,弹体参数见表 1,试验结果见表 2。

表 1 弹体参数

Tab. 1 Parameters of bombs

弹种	弹重 /kg	弹体长度 /mm	弹体直径 /cm	CRH	弹壳屈服强度 /MPa
原型弹	897.9	2 400	368.3	3	1 000
模型弹	0.48	195	30	3	1 000

表 2 模型弹试验结果

Tab. 2 Test results of model bombs

编号	弹速/(m·s ⁻¹)	侵彻深度/cm	H/L
1	315	9	0.46
2	323	9.15	0.47
3	347	9.74	0.50
4	365	10.1	0.52
5	387	11.4	0.58
6	415	12.2	0.63
7	464	15.5	0.79
8	495	16.8	0.86
9	605	19.4	0.99
10	616	20.8	1.07
11	625	21.98	1.13
12	664	24.7	1.27
13	829	32.8	1.68

其他试验数据,见文献[11]和[12]。

将所有试验结果汇总,利用最小二乘法得出拟合公式为:

当 200 m/s ≤ V ≤ 600 m/s 时,

$$\frac{H}{D} = 0.0786KN \left(\frac{M}{\rho D^3}\right)^{0.414} \left(\frac{Mg}{\sigma D^2}\right)^{0.332} \left(\frac{V^2}{gD}\right)^{0.498} \quad (9)$$

当 600 m/s ≤ V ≤ 1 200 m/s 时,

$$\frac{H}{D} = 0.0183KN \left(\frac{M}{\rho D^3}\right)^{0.315} \left(\frac{Mg}{\sigma D^2}\right)^{0.374} \left(\frac{V^2}{gD}\right)^{0.638} \quad (10)$$

其中,

$$K = \begin{cases} 0.9M^{0.145}, & M \leq 400 \text{ kg} \\ 0.95M^{0.145}, & 400 \text{ kg} < M \leq 1\,500 \text{ kg} \\ 0.68M^{0.145}, & 1\,500 \text{ kg} < M \leq 2\,200 \text{ kg} \end{cases} \quad (11)$$

其余符号含义同前。

由计算可得,该公式与试验数据拟合相关系数为 0.992,拟合公式计算相对误差取正后的平均值为 9.62%,拟合效果较好。

3 钻地弹侵彻岩体数值模拟

由于试验数据有限,现利用 ANSYS/LS-DY-

NA 有限元分析软件模拟不同类型的钻地弹侵彻岩体,用以验证公式的精确程度。

3.1 钻地弹种类

美国钻地弹的研究和发展走在世界的前列,研制和装备了多种型号的常规钻地武器,目前常见的钻地弹有 GBU-28、GBU-37、GBU-39/B 等,钻地弹(战斗部)参数^[12]见表 3。弹体速度为 300 m/s。

表 3 钻地弹(战斗部)参数

Tab. 3 Parameters of earth penetrator weapons

参数	BLU-109	GBU-28	GBU-39/B
弹体质量/kg	898	2130	113
弹体长度/m	2.40	5.84	1.83
弹体头部长度/m	0.61	0.32	0.25
弹体直径/m	0.37	0.37	0.15
装药量/kg	240	306	22.7

3.2 材料模型

弹体选用 Johnson-Cook 模型^[14],在考虑应力、应变和温度效应的同时,也能够清晰描述弹体在侵彻过程中的变形和受力特性,材料参数见表 4。

表 4 弹体材料参数

Tab. 4 Material parameters of penetrator cm-g-μs

符号	数值	符号	数值	符号	数值
ρ	3.65	T_m	1 793	D_2	0.002
G	0.77	T_r	293	D_2	1.61
A	7.92×10^{-3}	C_v	4.77×10^{-6}	K_1	1.49
B	5.1×10^{-3}	ϵ_0	1.0×10^{-6}	K_2	0.0
n	0.26	D_1	0.05	K_3	0.0
C	0.014	D_2	3.44	γ_0	2.17
m	1.03	D_2	-2.12	a	0.46

岩石选用 Johnson-Holmquist-Cook 材料模型^[15],该模型综合考虑了大应变、高应变率、高压效应,考虑了损伤及损伤积累,材料参数^[16]见表 5。

表 5 岩石材料参数

Tab. 5 Material parameters of rock cm-g-μs

符号	数值	符号	数值	符号	数值
ρ	2.75	T	8.51×10^{-4}	μ_1	0.13
G	0.148	ϵ_0	1.0×10^{-6}	D_1	0.05
A	0.79	ϵ_{\min}	0.01	D_2	1.0
B	1.60	S_{\max}	7.0	K_1	0.85
C	0.007	p_c	2.84×10^{-4}	K_2	-1.71
N	0.61	μ_c	0.19×10^{-4}	K_3	2.08
f_c	8.51×10^{-4}	p_1	1.6×10^{-2}		

3.3 算法选择与计算模型

数值模拟采用 Lagrange 算法,弹体与岩体均采用 Lagrange 六面体单元。为简化起见,将岩体宏观上看成连续、各向同性的均质体,不计裂隙影响。由

于模型的轴对称性,为了节约计算时间和存储空间,本文仅建立 1/4 模型,同时在对称面上设置约束,并将无反射边界条件实现于计算模型中^[17]。在对岩体进行网格划分时,对弹体与岩体侵彻接触的区域网格进行加密,距离弹靶接触区域较远的地方网格划分较稀疏。图 1 为计算模型及网格划分情况。

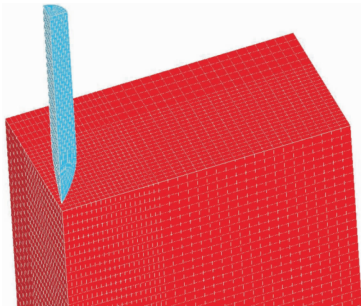


图 1 计算模型

Fig. 1 The simulation model

3.4 数值模拟结果及比较

3 种钻地弹(战头部)侵彻深度的数值模拟结果,与拟合公式、Young 公式、Bernard 公式 A、Bernard 公式 C 计算的结果见表 6。

表 6 侵彻深度模拟与计算结果

Tab. 6 Simulation and calculation results of penetration depth

	BLU-109	GBU-28	GBU-39/B
数值模拟	1.42	3.03	1.16
拟合公式	1.67	2.61	1.07
Young 公式	1.70	2.59	1.32
Bernard 公式 A	1.12	2.67	0.86
Bernard 公式 C	0.71	1.69	0.55

从表 6 中可以得出,数值模拟结果与拟合公式计算出的结果较为接近,其中 BLU-109 拟合公式结果比数值模拟结果多 17.6%,GBU-28 拟合公式结果比模拟结果少 13.8%,GBU-39/B 拟合公式结果比模拟结果少 7.8%,均在 20%以内,表明数值模拟方案选择合理,也进一步表明拟合公式对钻地弹的侵彻深度有较好的预测效果。

在常见的经验公式中,Young 公式整体上与数值模拟结果最为接近,Bernard 公式 A 次之,Bernard 公式 C 差距较大,基本上都相差一倍以上,表明 Bernard 公式 C 不适用于钻地弹侵彻岩体深度的预测。

4 结语

本文利用相似理论和量纲分析法确定影响钻地弹侵彻岩体深度的关键参数,并选择弹体的直径、质

量和侵彻速度为独立变量,建立了函数关系式,通过缩比模型试验和其他大量现场试验数据,拟合出钻地弹侵彻岩体经验公式。随后利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对 3 种常用的钻地弹侵彻岩体进行了数值模拟,将模拟结果和拟合公式以及部分经验公式计算结果对比,结果表明拟合公式结果吻合较好,具有一定的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 沈俊,刘瑞朝,杨建超,等. 弹体侵彻岩体效应试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 946-952.
SHEN J, LIU R C, YANG J C, et al. Experimental and Theoretical Studies of Projectile Penetrating Rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 946-952. (in Chinese)
- [2] 左魁,李林,王启睿,等. 钻地模型弹侵彻岩石模拟材料试验研究[C]//第 16 届全国结构工程学术会议论文集. 太原, 2007.
ZUO K, LI L, WANG Q R, et al. Experimental Study on the Earth Penetrator Weapon Model Penetrating Rock Model Material [C]// Proceedings of the Sixteenth National Conference on Structural Engineering. Taiyuan, 2007. (in Chinese)
- [3] YOUNG C W. Penetration Equations [R]. SAND 97-2426.
- [4] 林圣灵. 弹丸侵彻混凝土靶实验及仿真[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
LIN S L. Experiment and Simulation of Projectile Penetrating Concrete Target [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] Bernard R S. Empirical Analysis of Projectile Penetration in Rock [R]. AD-A047989, 1977.
- [6] Bernard R S, Creighton D. Projectile Penetration in Soil and Rock Analysis for Non-normal Impact [R]. AD-A081044, 1979.
- [7] 任辉启,穆朝民,刘瑞朝,等. 精确制导武器侵彻效应与工程防护[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
REN H Q, MU Z M, LIU R C, et al. Penetration Effects of Precision Guided Weapons and Engineering Protection [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [8] 许三罗,相恒波. 射弹侵彻混凝土中相似理论的应用及误差分析[J]. 弹箭制导学报, 2007, 27(3): 123-126.
XU S L, XIANG H B. Similarity Theory Applied in Projectile Penetrating into Concrete Target and Deflection Analysis [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(3): 123-126. (in Chinese)

- [9] 宋梅利,李文彬,王晓鸣,等. 弹体高速侵彻效率的实验和量纲分析 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(6): 752-758.
SONG M L, LI W B, WANG X M, et al. Experiments and Dimensional Analysis of High-speed Projectile Penetration Efficiency [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(6): 752-758. (in Chinese)
- [10] 张健,程春,相升海,等. 基于量纲分析法的EFP速度计算模型 [J]. 弹箭制导学报, 2016, 36(3): 31-34.
ZHANG J, CHENG C, XIANG S H, et al. EFP Velocity Calculation Model Based on Dimensional Analysis Method [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(3): 31-34. (in Chinese)
- [11] 张德志,林俊德,唐润棣,等. 高强度岩石侵彻经验公式 [J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 15-18.
ZHANG D Z, LIN J D, TANG R D, et al. An Empirical Equation for Penetration Depth of Projectiles into High-strength Rock Targets [J]. Acta Armamentar, 2006, 27(1): 15-18. (in Chinese)
- [12] WILLIAM P J. Comparison of Two Empirical Equations with Large Scale Penetrator Tests into in Situ Rock Targets [C]// Proceedings of the 11th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structure. Mannheim, Germany: [s. n.], 2003: 1-9.
- [13] 党爱国,李晓军. 国外钻地武器发展回顾及展望 [J]. 飞航导弹, 2014(6): 35-39.
DANG A G, LI X J. Review and Prospect of the Development of Foreign Penetrating Weapons [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(6): 35-39. (in Chinese)
- [14] THAM C. Y. Numerical and Empirical Approach in Predicting the Penetration of a Concrete Target by an Ogive-nosed Projectile [J]. Finite Elem Anal Des, 2006, 42: 1258-1268.
- [15] LI Q M, LU Y B, MENG H. Further Investigation on the Dynamic Compressive Strength Enhancement of Concrete-like Materials based on Split Hopkinson Pressure Bar Tests, Part II: Numerical Simulations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1335-1345.
- [16] 方秦,孔祥振,吴昊,等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法 [J]. 工程力学, 2014, 31(3): 197-204.
FANG Q, KONG X Z, WU H, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook Constitutive Model Parameters of Rock [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 197-204. (in Chinese)
- [17] 孔大庆,孙惠香,康婷,等. 岩体特性对围岩与结构动力相互作用影响 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(6): 77-81.
KONG D Q, SUN H X, KANG T, et al. The Influence of Rock Characteristics on Dynamic Interaction between Adjoining Rock and Structure Subjected to Blast Loading [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15(6): 77-81. (in Chinese)

(编辑:徐敏)