

岩土中的冲击爆炸效应

Impact and Explosion Effects in Rock and Soil

钱七虎 王明洋 编著

国防工业出版社

·北京·

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镛 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 吴有生 吴宏鑫

何新贵 张信威 陈良惠 陈冀胜

周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

本书主审委员 崔尔杰

前 言

本书总结与介绍了近年来岩、土中侵彻(冲击)与爆炸效应的试验研究与理论研究成果。

在岩、土中发生弹体侵彻与爆炸时,岩、土介质中达到了很高的应力,获得了很高的质点运动速度,产生了一系列现象。对于工程问题来说,最为关心的是侵彻与爆炸时,岩、土介质的力学参数和运动参数如何确定,岩、土介质的变形和破坏现象如何定性描述与定量计算。很长时间以来,直至目前,工程计算中确定上述参数和计算岩、土介质的变形和破坏主要依赖试验公式,而试验公式大都是依据能量原则在几何相似的基础上整理试验成果而得。但是实际的岩体非常复杂,其中最主要的是岩体为一非均匀、非连续构造的地质体,并具有初始地应力。构造现象的千变万化都在显著的程度对上述参数,对介质的变形和破坏起着重要作用。实际的土体也呈现复杂多变的性质:含水和不含水的;含气和不含气的;土体中孔隙与大气相连或不相连的;土体中空气成分是封闭的或不封闭的。另一方面,侵彻与爆炸的方式与条件也是变化多端,弹体有大有小、有尖有钝、有长有短,侵彻有正、斜之分;爆炸或为深埋地下封闭或为浅埋,装药可填满空腔,也可不填满空腔,装填密度也不千篇一律。上述的种种情况造成试验数据离散很大,试验公式彼此误差很大,最终造成预测预报的困难,甚至对于侵彻和爆炸的近区参数无法预测,连基于连续介质力学的爆炸现象的定性描述也出现很大的偏差。

因此,重要的工程防护以及确保大规模地下爆破的安全作业都要求在试验上和理论上继续对岩、土中侵彻和爆炸效应进行全面、系统、深入的研究。爆炸效应试验研究的全面性、系统性和深入性首先体现在层次性上。为了排除复杂因素抓住本质因素,为了能进行大批量试验研究,首先进行实验室条件下的均匀介质中的模拟研究,然后在实验室条件下陆续增加介质不均匀性、不连续性的模拟情况,进行包括地应力、裂隙、浅埋爆炸自由地表面影响的室内模拟研究,最后还必须进行实际岩体中的试验研究,其全面和系统性体现在分区地研究爆炸效应:近区破坏区的效应、远区地震区的效应以及不可逆变形区的效应。上述内容构成了第2章。为了保证模拟成果的准确性,减少误差,第2章中还深入研究了爆炸中介质运动的相似规律,特别探讨了炸药能量在爆炸产物和介质运动之间的分配。

爆炸效应理论研究的全面系统性表现在:一方面总结了弹性动力学理论在爆炸远区——弹性区的研究成果,特别是系统研究了自由地表面的影响,即装药埋深的影响和地表地震动参数的确定;另一方面总结与介绍了20世纪60年代以来以俄罗斯学者为首的在近区——破坏区的所谓“短波”和“弱波”方面的研究成果。长期以来岩体中地下爆炸的研究集中在低应力弹塑性区和高应力似流体区,而在该两区的过渡区内(应力在10GPa左右),研究成果甚少,而该范围恰是地下爆炸工程最感兴趣的,因为它相应于岩体的破

坏区。此外,本书还在破坏区和弹性区间,插入了考虑阻尼对爆炸波传播影响的非弹性的研究成果,还初步总结了岩体非均匀、非连续性——块系构造和裂隙对爆炸效应影响的理论研究成果,以弥补理论研究和试验成果在定性上不相适应的不足。上述内容构成了第4章。

侵彻效应的深入研究体现在理论与试验结合上:在全面总结分析各类侵彻公式的基础上,从理论角度深入分析了侵彻破坏区介质的变形和破坏特点,采用“短波”和“弱波”理论研究侵彻破坏的分区和侵彻破坏的机理,最后形成了侵彻计算理论。该理论揭示了试验公式各个试验系数的物理本质和弹体运动时阻力的确定方法,统一了垂直侵彻和斜侵彻的计算方法,找出了岩层被弹体贯穿的判别依据。上述内容构成了第1章。

基于工程计算理论的需要,本书总结了岩、土动力强度理论的研究成果,重点介绍了岩、土动力强度的试验成果;另一方面,从岩石动力破坏的概念出发,介绍了考虑时间因素的岩石、岩体动力强度理论的新进展及其应用,这就是第3章的内容。

关于土的爆炸效应,本书总结了非饱和土的爆炸效应(第5章),饱和土的爆炸效应(第6章)以及饱和土的爆炸液化效应(第7章)试验和理论研究方向的新成果。对于非饱和土来说,新的爆炸波传播理论有效解释了现场试验中发现的压力峰值“倒衰减”现象以及压缩波的“内生激波”现象。对于饱和土来说,在三相理论的基础上突出了含气量对于爆炸波在自由场传播以及刚壁上反射的影响研究。

本书由王明洋撰写第1章,钱七虎、王明洋撰写第2、第5章,钱七虎撰写第3章,王明洋、钱七虎撰写第4章,赵跃堂、王明洋撰写第6、第7章。全书最后由钱七虎修改、补充和定稿。

本书力求从理论与试验的结合上,从工程实践的需要出发阐述研究成果,限于水平以及时间的仓促,定有很多缺点和错误,敬请批评指正。

钱七虎

二〇〇九年八月三十一日

目 录

第1章 岩体中的侵彻效应	1
1.1 岩体中的试验现象和问题的提出	1
1.2 弹体侵彻岩体深度的经验计算	2
1.3 岩石中侵彻局部变形与破坏特点	7
1.4 半无限介质中侵彻计算方法	15
1.5 半无限介质中高速侵彻效应	24
1.6 半无限介质中斜侵彻计算方法	30
1.7 半无限分层介质中的侵彻计算方法	41
1.8 岩层的贯穿局部效应计算	43
参考文献	44
第2章 岩石、岩体中爆炸效应的试验研究	46
2.1 岩石和岩体的物理力学特性	46
2.2 岩土中爆炸波的基本参数及其相似关系的研究	52
2.3 岩石中爆炸效应的试验研究	61
2.4 岩体中爆炸效应若干问题的室内试验研究	72
2.5 实际岩体中爆炸效应的试验研究	81
2.6 岩土中爆炸抛掷效应的试验研究	89
参考文献	99
第3章 土、岩石的动力强度和破坏准则	101
3.1 土的破坏准则和土的动力强度	101
3.2 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则	111
参考文献	124
第4章 岩体中爆炸效应的理论研究	126
4.1 问题的提出	126
4.2 地下爆炸时介质的运动、变形与破坏特性	127
4.3 地下爆炸非弹性区波的传播分析	133
4.4 地下爆炸弹性区波的传播分析	148
4.5 自由表面对地下爆炸效应的影响	155

4.6 岩体构造非均匀变形特性分析	173
4.7 爆炸法破碎岩石的计算原理	188
参考文献	203
第5章 非饱和土中的爆炸效应	205
5.1 问题的提出	205
5.2 非饱和土中爆炸试验研究	206
5.3 非饱和土平面爆炸波在自由场的传播	213
5.4 非饱和土球面爆炸波的传播	232
5.5 不均匀介质中平面波的传播	238
5.6 爆炸波在刚壁障碍物的反射	244
参考文献	253
第6章 饱和土中的爆炸效应	254
6.1 问题的提出	254
6.2 饱和土介质物理特性	254
6.3 饱和土介质中波传播问题的试验研究	259
6.4 爆炸波作用下饱和土动力模型研究	270
6.5 饱和土中平面爆炸波的传播规律	280
6.6 饱和土中球面爆炸波的传播规律	289
参考文献	292
第7章 饱和土中的爆炸液化	294
7.1 问题的提出	294
7.2 爆炸载荷下饱和土中孔隙水压力的变化规律	302
7.3 爆炸液化数值模拟模型	308
参考文献	326

Catalogue

Chapter 1	Penetration effects in rock	1
1.1	Experiment phenomenon in rock and problem introduction	1
1.2	Empirical methods for the penetration depth of projectile body in rock	2
1.3	The local deformation and failure characteristics of penetration in rock	7
1.4	Computational method for penetration in half – infinite medium	15
1.5	Effects of high – speed penetration in half – infinite medium	24
1.6	Computational method for oblique penetration in half – infinite medium	30
1.7	Computational method for penetration in half – infinite layered medium	41
1.8	Local effect of perforation in rock	43
	References	44
Chapter 2	Experimental investigation of explosion effects in rock	46
2.1	Physical characteristics of rock	46
2.2	Research on basic parameters and similarity relation of explosion wave in rock	52
2.3	Experimental investigation of explosion effects in rock	61
2.4	Laboratory investigation of several problems of explosion effects in rock	72
2.5	In – situ experimental investigation of explosion effects in rock	81
2.6	Experimental investigation of casting explosion effects in Rock	89
	References	99
Chapter 3	The dynamic strength and failure criterion of rock and soil	101
3.1	The dynamic strength and failure criterion of soil	101
3.2	The dynamic strength and failure criterion of rock	111
	References	124
Chapter 4	Theoretical investigation of explosion effects in rock	126
4.1	Problem introduction	126
4.2	Deformation and failure characteristics of underground explosion	127

4.3	Theoretical analysis of wave propagation in inelastic zone of underground explosion	133
4.4	Theoretical analysis of wave propagation in elastic zone of underground explosion	148
4.5	The influence of free surface on explosion effects of underground explosion	155
4.6	Analysis on the non uniform deformation of rock structure	173
4.7	Computing principle of crushing Rock with explosion method	188
	References	203
Chapter 5	Explosion effects in unsaturated soil	205
5.1	Problem introduction	205
5.2	Experimental investigation of explosion effects in unsaturated soil	206
5.3	Wave propagation in free field of plane explosion in unsaturated soil	213
5.4	Wave propagation of spherical explosion in unsaturated soil	232
5.5	Propagation of plane wave in non uniform medium	238
5.6	The reflection of explosion wave on rigid plane boundary	244
	References	253
Chapter 6	Explosion effects in saturated soil	254
6.1	Problem introduction	254
6.2	Physical characteristics of saturated soil	254
6.3	Experimental investigation of wave propagation in saturated soil	259
6.4	Dynamic model of saturated soil under the action of explosion	270
6.5	Propagation law of plane explosion wave in saturated soil	280
6.6	Propagation law of spherical explosion wave in saturated soil	289
	References	292
Chapter 7	The liquefaction of saturated soil under explosion	294
7.1	Problem introduction	294
7.2	The variety law of pore water pressure in saturated soil under explosion	302
7.3	Numerical simulation of liquefaction under explosion loading	308
	References	326

第1章 岩体中的侵彻效应

1.1 岩体中的试验现象和问题的提出

弹体冲击岩体时的局部破坏现象主要包括侵彻、震塌和贯穿。弹体冲击岩体时,动能不够大时,冲击的结果是在岩体表面留下一定的凹坑,弹体被弹开,或者因为弹体与岩体表面成较大的角度而产生跳弹,两者都未能侵入岩体内部。如弹丸侵入岩体内部,则称为侵彻。侵彻时,岩体表面材料被弹头挤压破碎形成一定大小的漏斗状孔,称为冲击漏斗坑。形成冲击漏斗坑的同时,弹丸侵入岩体内部一定深度,称为侵彻深度。

当岩体厚度不够大而弹头速度足够大时,弹头侵彻更深,岩体背面将出现辐射状的裂缝,甚至出现岩石材料碎块的飞落,这种现象叫做“震塌”。震塌时,岩石碎块将形成震塌漏斗坑。

弹体速度再增大,或岩体厚度再减薄,则会出现冲击漏斗坑和震塌漏斗坑直接连接起来,产生“先侵彻后贯穿”的现象。

上述岩石破坏的现象均发生在弹着点附近或弹着点背面附近,称为冲击局部破坏现象(图 1.1)。

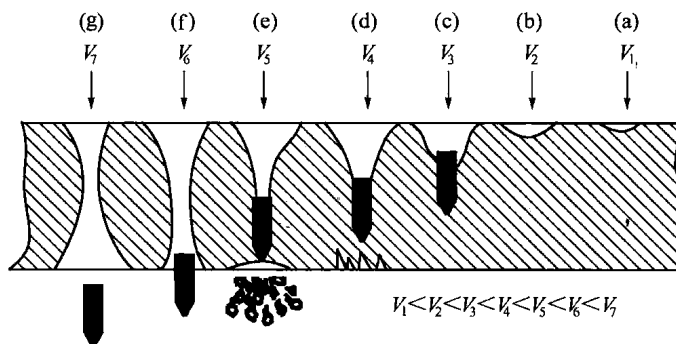


图 1.1 冲击局部破坏现象

当前,随着侵彻深度不断增加的精确制导武器的迅速发展,无论是防护结构计算理论与防护技术,还是制导武器战斗部研制均亟待深入研究岩石中侵彻局部破坏效应问题。前者是显然的,后者作为钻地弹头侵彻过程中的受力环境是战斗部设计(弹体材料、弹体结构、引信、装药)必不可少的初始条件及边界条件。

弹体侵彻岩体的局部效应研究具有漫长的历史,但目前尚没有令人满意的计算理论。这是由于侵彻现象的复杂性:岩体是非均匀、非连续的地质体,对岩石材料的侵彻和贯穿过程同时发生材料的弹性变形和大量的非弹性变形、材料的流动和裂缝的扩展等。困难不仅仅在于确定过程的主要因素的选择和考虑上,同时还在很大的动力变形

和破坏情况下如何阐述材料的性质上。由于这个原因,通过试验资料处理所得到的经验公式就成为这个领域内研究的主要成果。但是这种纯实验方法的主要缺点是,当弹体比例变化极大以及其它原始参数变化极大超越出试验进行的范围时,结果的推算是不太可靠的。

1.2 弹体侵彻岩体深度的经验计算

钻地武器侵彻岩石深度的研究是防护工程领域当前所关注的问题之一。弹体侵彻深度的实用计算大都采用基于大量试验数据的经验公式计算法。

所谓经验法是用量纲分析或其它方法,给出某一有待定常数的关系式,然后通过弹道试验,确定这些常数。它主要是通过弹道试验(包括原形试验和模型试验,原形试验准确而不经济,模型试验经济但技术要求高),结合少量假设,建立侵彻的初始条件与最终结果之间的关系,但不能给出中间结果。由于冲击侵彻现象的复杂性,所以在很长时期内该问题的实用计算都是以试验为基础的,并根据大量试验数据建立了计算侵彻深度的经验公式,用于工程设计计算。

建立经验公式的方法大体有两种:一种是直接对试验数据进行相关回归分析建立的经验公式,又称纯经验公式;一种是预先假定作用在弹体上的阻力变化规律,运用刚体运动方程推导出计算公式,再利用试验数据资料修正或确定公式中的常数,这种方法又称半经验半理论公式。

经验法的优点是抓住了侵彻问题的主要矛盾,能反映问题的主要影响因素,且使用简便、计算可靠度较高,因此目前各国有关防护结构的设计规范或计算手册中,基本还是采用经验公式计算弹体的侵彻深度。其缺点在于试验费用高,适用范围窄,公式只反映侵彻的初始情况与最终结果之间的关系,不能描述侵彻过程,不能说明相互作用机理,不能准确分析侵彻过程中弹体所受到的阻力。

目前应用较广的侵彻岩石的经验公式主要有美国桑迪亚国家实验中心(SNL)的 Young 公式和美国陆军水道实验站(WES)的 Bernard 公式,我国通常使用的是由“别列赞”公式修正而来的经验公式。

1. Young 公式

Young 提出的侵彻土、岩石、混凝土统一的经验公式:

$$h = 0.0008SN \left(\frac{m}{A} \right)^{0.7} \ln(1 + 2.15v^2 10^{-4}), \quad v \leq 61 \text{ m/s} \quad (1.1)$$

$$h = 0.000018SN \left(\frac{m}{A} \right)^{0.7} (v - 30.5), \quad v > 61 \text{ m/s} \quad (1.2)$$

式中: h 为侵彻深度(m); m 为弹体质量(kg); A 为弹的横截面面积(m^2); v 为弹速(m/s); S 为可侵彻性指标; N 为弹头形状影响系数。

Young 公式具有较为广泛的试验基础,其试验范围为: 试验速度($61.0 \sim 1350.0$) m/s , 弹体质量($3.17 \sim 2267$) kg , 弹体直径($2.54 \sim 76.2$) cm , 靶体抗压强度($14.0 \sim 63.0$) MPa 。

在 Young 侵彻公式第一次发表时对公式的主要批评,即是可侵彻性指标 S 值不是以

标准的材料性能出现的。基于大量的侵彻试验,Young 推荐给出了各种典型材料的 S 值的取值方法:

$$S = 2.7(f_c Q)^{-0.3} \quad (1.3)$$

式中: f_c 为岩石的无侧限抗压强度 (kg/cm^2); Q 为岩石质量,它受节理、裂缝等影响。

N 为弹头形状影响系数,对于卵形弹头,可用下列两个公式:

$$N = 0.18L_n/d + 0.56 \quad (1.4)$$

$$N = 0.18(\text{CRH} - 0.25)^{0.5} + 0.56 \quad (1.5)$$

对于锥形弹头:

$$N = 0.25L_n/d + 0.56 \quad (1.6)$$

式中: L_n 为弹头部的长度; d 为弹体直径; CRH 为钻地弹头部表面曲率半径与钻地弹横截面半径之比。

Young 公式涉及的围岩参数有两个: 单轴饱和抗压强度 f_c 和岩石质量 Q 值。这两个参数可根据围岩级别参照相应的标准去确定。

Young 公式中的 f_c 、国家标准中的 R_c 和军用标准中的 R_b 三者都是单轴饱和抗压强度,意义是相同的,因此在数值上是相同的。但是在围岩分级中都对其具体取值作了限制,要引起注意和区别。

在 Young 公式中, Q 是一个特殊的参数,与岩石力学中的 RQD (Rock Quality Designation) 相类似。鉴于 Q 、RQD 和 K_v 都是表征岩石完整性的物理量,根据下面的研究分析,确定 Q 等于围岩分级中的 K_v ,这样的取值关系总体而言是大致合理的。

对于岩石质量指标 RQD,《岩土工程勘察规范 (GB50021—2001)》做了如下规定:“用直径为 75mm 的金刚石钻头和双层岩芯管在岩石中钻进,连续取芯,每回次钻进所取岩芯中,长度大于 10cm 的岩芯段长度之和与该回次进尺的比值,以百分数表示。”

$$\text{RQD} = \frac{\text{长度大于 10cm 的整段岩芯块长度总和}}{\text{钻孔总长度}} \times 100$$

在我国现行岩体分级标准中,对围岩分类采用的是参数 K_v 。 K_v 和 RQD 均是表征岩石完整性的物理量,两者的取值比较如表 1.1 所列。从表 1.1 来看,近似地可以认为 $K_v = \text{RQD}\%$ 。因此,RQD 可以近似地取为 $100K_v$ 。

表 1.1 RQD 与 K_v 取值的比较

完整程度	(很完整)	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎
K_v	—	>0.75	0.75 ~ 0.55	0.55 ~ 0.35	0.35 ~ 0.15	<0.15
岩石质量	很好	好	一般	差	很差	(极差)
RQD	90 ~ 100	75 ~ 90	75 ~ 50	25 ~ 50	10 ~ 25	—

在国家标准中,围岩分类涉及到 BQ 、 R_c 和 K_v 三个指标的相互影响。因此岩石强度的取值要兼顾围岩分类中 BQ 、 R_c 和 K_v 三个指标的相互制约关系,例如在计算 BQ 时,当 $R_c > 90K_v + 30$ 时,按 $R_c = 90K_v + 30$ 取(因此计算值 $R_c \leq 120$);当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$ 时,按

$K_v = 0.04R_c + 0.4$ 取。

从 GBU-28 侵彻五类围岩深度的计算结果来看,与 GBU-28 侵彻混凝土或中等岩石 6m 的实战结果较为吻合,表明 Young 公式对深钻地武器侵彻岩石计算问题具有一定适用性和可信性。

和其它侵彻计算的经验公式相比,Young 公式建立在更为广泛的侵彻试验的基础上,深钻地武器侵彻岩石问题大多在其适用范围之内。至今为止,建立 Young 公式的试验基础——美国桑迪亚国家实验中心 20 世纪 70 年代穿甲弹半穿甲弹侵彻岩石的试验数据,仍是目前已有的有关岩石侵彻问题中比较经典的试验数据。此外,从 1960 年到 2000 年的 40 年时间,C. W. Young 对该侵彻公式做了不间断的校验修正,因而 Young 公式也是较新的公式。

Young 公式引入了一个专有参数岩石质量 Q ,但是对 Q 的取值并没有严格的确定方法,这在一定程度上影响了 Young 公式的实际应用和公式精度,有待进一步研究。

2. Bernard 公式

根据射弹对混凝土、花岗岩、凝灰岩、砂岩的侵彻试验资料,通过对数据的回归分析,美国陆军水道试验站(WES)和美国桑迪亚国家实验中心(SNL)于 1977 年到 1979 年先后提出了三个计算岩石中侵彻深度的公式,为了便于讨论,按时间先后分别称之为 Bernard I 公式、Bernard II 公式、Bernard III 公式。

(1) Bernard I 公式

Bernard I 公式是 1977 年提出的侵彻深度计算公式,其表达式为

$$\frac{\rho h}{m/A} = 0.2v \cdot \left(\frac{\rho}{f_c}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{100}{RQD}\right)^{0.8} \quad (\text{国际单位}) \quad (1.7)$$

式中: ρ 为岩石密度(kg/m^3); RQD 为岩石质量指标,它是现场岩体中原生裂缝间距的一个度量,一般取值见表 1.2。岩石的密度取值参照表 1.3。

表 1.2 岩体质量指标 RQD

级别	岩体质量	RQD(%)
A	很好(Excellent)	90 ~ 100
B	好(Good)	75 ~ 90
C	较好(Fair)	50 ~ 75
D	差(Poor)	25 ~ 50
E	很差(Very Poor)	10 ~ 25

表 1.3 岩石密度取值

围岩类别	I	II	III	IV	V
岩石密度/(kg/m^3)	2500 ~ 2700	2500 ~ 2700	2300 ~ 2500	2200 ~ 2400	2000 ~ 2300

为方便计算,式(1.7)可改写为

$$h = 0.2 \cdot \frac{m}{A} \cdot \frac{v}{(\rho f_c)^{0.5}} \cdot \left(\frac{100}{\text{RQD}} \right)^{0.8} \quad (\text{国际单位}) \quad (1.8)$$

1986年美国出版的《常规武器防护设计原理》(TM5-855-1)中,采用了式(1.7),并将其改写如下:

$$h = 6.45 \cdot \frac{m}{d^2} \cdot \frac{v}{(\rho f_c)^{0.5}} \cdot \left(\frac{100}{\text{RQD}} \right)^{0.8} \quad (\text{英制单位}) \quad (1.9)$$

Bernard I 公式适用于侵彻岩石深度的计算。该公式中的侵彻深度主要与弹重、弹径、弹速、岩石密度、岩石强度和岩石质量指标 RQD 有关,并且侵彻深度 h 与弹速 v 成线性关系。

(2) Bernard II 公式

1978年, Bernard 等人提出了第二个射弹侵彻岩石深度的计算公式(即 Bernard II 公式),其表达形式为

$$h = \frac{m}{A} \cdot \left[\frac{v}{b} - \frac{a}{b^2} \cdot \ln \left(1 + \frac{b}{a} v \right) \right] \quad (\text{英制单位}) \quad (1.10)$$

$$a = 1.6 f_c (\text{RQD}/100)^{1.6}, \quad b = 3.6 (\rho f_c)^{0.5} \times (\text{RQD}/100)^{0.8} \quad (\text{英制单位})$$

公式中所用到的英制单位转换为国际单位的转换系数如下:

英制单位	乘以系数	国际单位
英寸(in)	2.54	厘米(cm)
英尺(ft)	0.3048	米(m)
英寸每秒(in/s)	2.54	厘米每秒(cm/s)
英尺每秒(ft/s)	0.3048	米每秒(m/s)
磅(lb)	0.45359237	千克(kg)
磅每平方英寸(lb/in ²)	0.070307	千克每平方厘米(kg/cm ²)
磅每平方英尺(lb/ft ²)	4.88243	千克每平方米(kg/m ²)
磅每立方英尺(lb/in ³)	16.0185	千克每立方米(kg/m ³)
千吨(kt)	907185	千克(kg)

为了便于和 Bernard I 公式进行比较,参照式(1.9),可将式(1.10)改写成如下形式:

$$h = 14.71 \frac{m}{d^2} \cdot \frac{v}{(\rho f_c)^{0.5}} \left(\frac{100}{\text{RQD}} \right)^{0.8} - 271.84 \frac{m}{\rho d^2} \cdot \ln \left[1 + 0.05413 \left(\frac{100}{\text{RQD}} \right)^{0.8} \left(\frac{\rho}{f_c} \right)^{0.5} v \right] \quad (\text{英制单位}) \quad (1.11)$$

由此可见, Bernard II 公式与 Bernard I 公式区别在于:公式中前一项为速度的线性

项,形式与 Bernard I 公式相同,但系数为 Bernard I 公式的 2.28 倍;公式的后一项为速度的对数项,表明侵彻深度 h 与弹速 v 成非线性关系。

(3) Bernard III 公式

1979 年, Bernard 等人根据微分面力模型对弹体侵彻受力情况进行了分析,并得出了第三个射弹侵彻岩石深度的计算公式(即 Bernard III 公式),其表达形式为

$$h = \frac{m}{A} \cdot \frac{N_{re}}{\rho} \left[\frac{v}{3} \cdot \frac{\rho^{0.5}}{f_{cr}^{0.5}} - \frac{4}{9} \ln \left(1 + \frac{3}{4} \cdot v \cdot \frac{\rho^{0.5}}{f_{cr}^{0.5}} \right) \right] \quad (\text{英制单位}) \quad (1.12)$$

$$N_{re} = \begin{cases} 0.863 \left[\frac{4(CRH)^2}{4CRH - 1} \right], & \text{对于卵形弹头} \\ 0.805 (\sin \eta_c)^{-0.5}, & \text{对于锥形弹头} \end{cases}$$

$$f_{cr} = f_c (RQD/100)^{0.2} \quad (1.13)$$

式中: N_{re} 为弹形系数; CRH 为弹头卵形曲率半径与弹头直径之比; η_c 为弹头锥尖半角。

Bernard III 公式既可用于侵彻岩石深度的计算,也可用于侵彻混凝土深度的计算。Bernard III 公式与前两个公式相比,是考虑了弹形系数 N_{re} 的影响。

针对国家标准围岩分类,就 GBU-28 炸弹侵彻五类围岩的深度,采用 Bernard 公式分别进行了计算,得出了对各围岩亚类侵彻深度的计算结果。表 1.4 给出了侵彻五类围岩深度的计算结果。

表 1.4 GBU-28 侵彻五类围岩(国家标准)深度的计算结果

围岩分类	I	II	III	IV	V
侵彻深度/m	≤ 4.22	3.64 ~ 5.99	4.92 ~ 10.32	≥ 7.82	≥ 15.68

从计算结果看,与 GBU-28 在实战中对中等强度岩体的侵彻深度比较接近。

3. 别列赞公式^[6]

$$h = \lambda_1 \lambda_2 K_q \frac{m}{d^2} v K_\alpha \cos \alpha \quad (1.14)$$

式中: λ_1 为弹形系数; λ_2 为弹径系数; α 为弹的命中角($^\circ$),即弹的轴线与目标表面法线的夹角; K_α 为弹的偏转系数; K_q 为介质材料侵彻系数。

公式(1.14)中只有 K_q 是靶体参数,这表明别列赞公式中对于靶体抗侵彻能力各种因素,只考虑了靶体的抗压强度的影响,而对于岩体的完整性、密度等其它因素都未作考虑。与公式中的 7 个弹体参数相比,只用一个抗压强度来表达复杂的岩石抗侵彻性能,显然过于简单化,与实际存在很大差距,对参数差别较大的岩体的计算,必将产生较大的误差。

之所以出现 7 个弹体参数和 1 个靶体参数这样的情况,可能与建立该公式的试验有关。该试验次数较多,但主要是采用了各种不同的弹体、不同的人射速度和入射角,而靶体主要是采用不同强度的混凝土,并未对岩体进行试验,这与当时的试验目的有关。对于同是混凝土的靶体而言,抗压强度显然是最重要的抗侵彻性能指标,完整性、密度、节理、地下水状况等参数差别不大,对抗侵彻影响不大。但对于岩体而言,这些参数对抗侵彻性

能的重要性却是很明显的,不予以考虑是不恰当的。另一方面,对于弹体对侵彻能力的影响却用了7个参数,又略显繁杂。这可能是别列赞公式用于计算岩体抗侵彻能力的最大不足。

别列赞公式中涉及的参数比较多,由于是经验公式,每个参数的取值都是离散的,有的如侵彻系数 K_q 的取值,不仅离散,而且过于稀少。

用别列赞公式计算 GBU-28 侵彻五类围岩深度存在一定困难,其适用性很差,其原因在于别列赞公式中只有一个靶体参数,难以反映岩石的抗侵彻能力。我们要计算侵彻五类围岩的深度,弹体参数是确定的,要改变的是五类围岩分别具有的不同的靶体参数。而决定围岩类别的参数较多,其中最主要的因素是抗压强度和岩体的完整性,并非是一个抗压强度就能确定围岩类别的,比如对于抗压强度为 50MPa 的围岩,它可能属于 II、III、IV、V 类围岩中的任一类别。

从岩石强度方面来看,即使同样都是坚硬岩,由于其岩体完整性不同,它可能是五类围岩中的任一类别,在军用标准中的围岩分类也与此类似。抗压强度甚至不是决定围岩类别的最重要的因素,相对而言岩体的完整性比岩石强度对围岩类别的确定作用似乎更大些,因为在围岩分类的计算取值中,对岩石抗压强度取值的限制更为严格,从而在很大程度上限制了岩石抗压强度在围岩分类中作用的发挥。

由于试验用混凝土完整性一般都是很好的,因此公式中没有引入完整性参数,应是默认靶体完整性很好。由此可见,用别列赞公式来计算 GBU-28 侵彻五类围岩深度是不适用的,或者说只适用于完整性好的岩体。

但从对 GBU-28 侵彻不同强度岩体的情况来看,别列赞公式侵彻深度的计算结果和实战相比偏大太多,十分保守。不适用于对岩体的侵彻计算。

综上所述,对于弹体侵彻岩体来说,特别是对于典型的钻地弹 GBU-28 而言,较为适用的经验公式是 Young 公式和 Bernard 公式。

1.3 岩石中侵彻局部变形与破坏特点

考虑弹体和岩石介质强度特性的显著差别,本章中不考虑弹体的变形,即把它当作绝对刚体。

弹体在岩石中的侵彻问题研究的主要任务是确定侵彻阻力 F 和转动矩 M 。已知阻力和初始条件就可以解弹体的运动微分方程,从而得到侵彻深度和弹体的侵彻时程。

$$m_p \ddot{h} = -F, \quad J \ddot{\phi} = M, \quad h|_{t=0} = 0, \quad \dot{h}|_{t=0} = v_0, \quad \phi|_{t=0} = \phi_0 \quad (1.15)$$

式中: m_p , J 分别为弹体质量和转动惯量; h 为侵彻深度; v_0 为冲击初速度; ϕ_0 为初始入射角。

侵彻阻力采用经典球形空腔膨胀假设研究。弹体可看成由有限数个球体组成,球心的连线形成弹体的对称轴,弹体的端部由变直径的球组成,而圆柱部分则由直径相同的球组成。弹体侧表面每一点的压力与同空心球腔内表面上的压力相等,而空心球腔内表面的压力可由一维问题的解得到(图 1.2(a))。因此,此方法可推广而解决斜侵彻的问题。