

防护结构概论(一)

俞儒一

一、前言

对杀伤兵器的破坏作用具有一定防护能力的工程结构物称为防护结构。防护结构连同它的一系列配套设施(如通风、供电、伪装等)构成了为实现一定战略战术目的的防护工程(如地下掩蔽部、人防地下室等)。它总是随着兵器的发展而发展的。早在刀枪箭戟的冷兵器时代,由于攻击兵器的破坏力有限,以高墙深沟为特征的筑城体系延续了几千年。火炮(光膛)出现后,高大的城墙开始演变为低下的炮台(中国)和城堡(欧洲)。人员装备注意掩蔽于工事内。廿世纪以来,随着飞机、坦克的出现,兵器的破坏力大大增强,防护工程大量转入地下,并大量使用坚固的材料如钢筋混凝土、钢材。以实弹射击试验为基础的经验公式及以小变形、线弹性分析为基础的近似计算已基本能满足工程设计的需要。第二次世界大战末期,核武器的出现,使防护结构的规模、型式、抗力要求和研究方法发生了重大变化。防护结构要承受炮炸弹及核武器诸破坏因素的综合作用,对一些具有重要战略目的的工程,已要求结构建在自由场压力高达(3500~7000) kg/cm²的地方。这样,追求合理的计算精度及讲究“效费比”已是现代防护结构研究的重要特徵之一。不少的研究表明,按现行计算方法,像土中浅埋结构常具有2、3倍以上的过大的安全储备,而对触地爆的地冲击及高抗力结构等,目前尚缺乏可靠的分析方法。为此,关于核爆炸引起的地冲击参数、岩土及结构材料在动载作用下的特性及本构关系的研究,已成为结构动力分析的重要前提。地下防护结构分析方法已逐步从已知荷载下的自由结构动力响应分析过渡到结构与介质的相互作用分析的轨道上来。为了反映岩土及结构材料实际工作状态的物理非线性分析及为了研究柔性结构、高抗力结构,而要求的几何非线性分析已不可避免了。作为现代防护结构研究中重要特徵的另一个方面是开始深入考虑荷载的随机性影响,因而,近年来建立在武器袭击随机性基础上的系统工程方法来分析结构的设计抗力,及建立在统计规律及优化理论上的概率设计,和优化设计正在逐步运用到防护结构从型式、内力分析到截面设计的各个方面中来。由此可见,现代防护结构几乎涉及到现代力学及数学的广阔领域。

防护结构研究的范围包括如下几个主要方面

1. 炮炸弹对介质及结构的局部破坏作用;
2. 核爆炸冲击波及其作用在结构上的动荷载;
3. 核爆炸引起的地冲击;
4. 核爆炸的辐射效应(热辐射、核辐射、电磁辐射);
5. 材料及构件在动载作用下的特性;
6. 空气中结构的动力响应分析及地下结构与介质的相互作用分析;
7. 结构和结构内设施的抗震、隔震分析。

二、炮炸弹对介质及结构的局部破坏作用

炮炸弹命中防护结构时,在弹着点附近会发生一系列侵入(侵彻)、震塌等破坏现象,因为它只发生在弹着点附近,为了区别于结构受力后因构件变形及内力(弯矩、剪力等)过大引起的破坏,称前者为冲击与爆炸的局部破坏。图1为当前常见几种典型弹丸命中结构时可能发生的局部破坏现象。图2为弹丸命中结构时,由于爆炸产生的局部破坏现象。冲击局部破坏现象与它类似。图1及图2中所注的符号的含

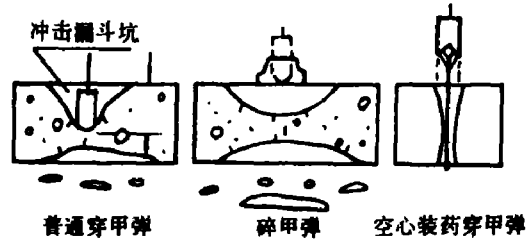


图1 几种典型弹丸命中结构时可能发生的局部破坏现象示意图

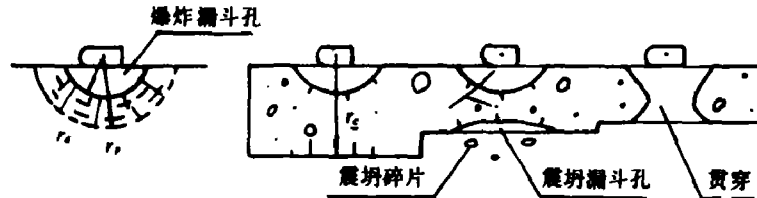


图2 爆炸局部破坏现象示意图

义为 h —弹丸侵入介质的深度; r_c —压缩半径。在此范围内,介质被强烈压缩而形成空穴或被粉碎; r_p —破坏半径。在此范围内介质在压缩波作用下受到压缩并向外扩张形成大量明显的径向及环向裂纹; r_s —震塌半径。它表示在爆炸作用下,保持结构内表面不发生震塌破坏时,自爆心算起到结构内表面的最小距离。这些参数常用试验方法确定。

早在第一次世界大战结束后不久,俄国在别列赞岛进行了大规模的实弹射击试验。所得侵彻深度公式基本结构如下

$$h = K_1 K_2 K_3 \frac{P}{d^2} V_0 K_4 \quad (1)$$

式中 P 、 d 、 V_0 表示弹丸重量、直径和命中速度。 $K_1 \sim K_4$ 表示用试验确定的反应介质,弹丸外形及命中角度等特征参数的系数。1977年美国陆军弹丸研究所发行的《侵入公式手册》集中记录了大量试验公式和数据。

描述爆炸局部破坏现象的三个参数 r_c 、 r_p 、 r_s 的试验公式有如下的基本形式

$$r = m_1 m_2 \sqrt[3]{m_3 c} \quad (2)$$

式中 c 为装药重量。 $m_1 \sim m_3$ 代表介质、填塞状态、炸药威力的实验数据。实际的炮炸弹大多数是先侵彻后爆炸的联合作用。根据结构不同的使用目的,要求结构内表面不产生震塌破坏或不被贯穿。这时需综合运用上述二式。近年来出现了许多新的弹种如云雾弹、脱壳穿甲弹、碎甲弹等。在防护结构上出现了一些用复合材料组成的防弹结构。针对它们,常有多种多样的试验公式。

冲击爆炸局部破坏作用的近似分析,通常根据某一特定的破坏现象(如弹坑、侵彻),作出一定的简化假设后,利用能量原理建立运动方程。所得的解答中包括有用以反映弹丸及介质特征的有关系数,它们由实验来确定。这种方法,在对装甲等匀质材料的局部破坏作用研究中取得了相当的成功。

精密的分析目前最有力的手段是使用建立在合理的介质本构关系基础上的有限差分或有限元分析。由于弹丸命中目标及炸药爆炸瞬间，介质所获得的速度已使介质处于流动及汽化状态，因而，分析将涉及从流体到固体的介质状态。利用为此而编制的多种程序，可以综合分析多种破坏现象。在较大的速度范围内研究各种破坏现象的演变，各参数间的定性规律及分析它的机理。分析的准确性是建立在正确的介质本构模型上。但是近年来的实践表明，对于某些无法用其它手段探明的未知领域，即使使用相当粗糙的介质模型，亦可得到极有价值的启发性的成果，在核爆炸地冲击的研究中亦是这样。

三、核爆炸冲击波对地面结构的荷载

核爆炸空气冲击波是以动荷载的形式，使暴露于大气中的结构因内力或变形过大而破坏，或使结构发生移动或倾覆。

关于核爆炸冲击波的基本概念及防护工程中感兴趣的冲击波参数的确定，在讲座“空中爆炸冲击波(I)基本理论”中已讲过，它们是：自由大气中爆炸时超压峰值 ΔP_0 ；地面冲击波超压峰值 ΔP_s ；冲击波正压作用时间 t_s ；冲击波衰减规律 $f(t)$ ；动压峰值 Q 等。在此直接引用，不再介绍。

空中爆炸时，根据入射角的大小，在地面可分为三个区域(如图3所示)。在规则反射区，结构受到入射波和反射波的二次作用。它们在结构的前墙上，还会造成更复杂的反射现象。在不规则反射区和半球反射区以及地炸时，地面结构受沿地面传来的入射波作用(在不规则反射区入射冲击波就是合成波)。

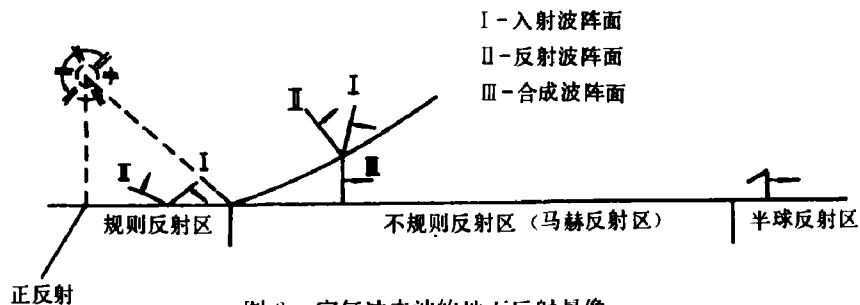


图3 空气冲击波的地面反射景象

冲击波作用在结构上的动载是三部份组成即：超压、反射压力和阻力。此处阻力是泛指电动压引起的作用在结构各墙面上的力。阻力 F 由下式表示

$$F = C_d \cdot Q \quad (3)$$

式中 C_d 叫阻力系数。图4为矩形结构各墙面上的阻力系数值。图7中有拱形结构上各点的阻力系数。超压、反射压力和阻力在荷载时程曲线中所占的比重，根据结构外形、尺寸及入射波方向而异。下面以不规则反射区为例进行讨论。

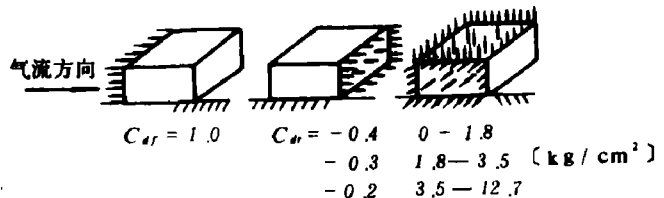


图4 矩形结构阻力系数值

对矩形结构，作用在各墙面上的荷载时程曲线及其表达式已示于图5中。图中各符号的含义为 S —结构物前墙的高或宽的一半； L —结构物沿冲击波传播方向的长度； C_{df} 、 C_{ds} 、 C_{dab} —前墙、顶盖及侧墙、后墙的阻力系数。由图可见，作用在前墙上的荷载在开始瞬间是正反射压力 ΔP_s ，由下式计算

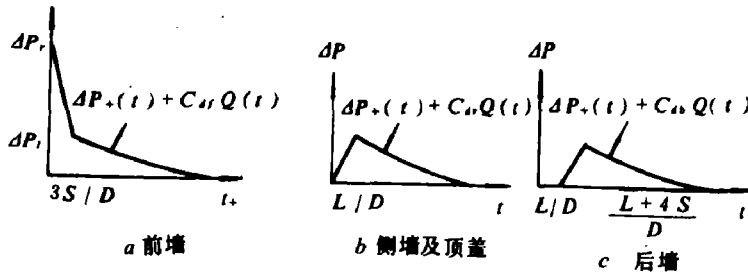


图5 不规则反射区地面结构各墙面所受的动载

$$\Delta P_r = \Delta P_+ \left(1 + 7 \frac{\Delta P_{++} + 1}{\Delta P_{++} + 7} \right) \quad (4)$$

随后，由于环流影响，反射压力迅速下降。待到环流稳定时，作用在前墙上的荷载是超压和阻力之和。侧墙、顶盖及后墙上的荷载都是入射波超压减去由于环流影响引起的吸力（负动压）。升压时间是为了近似反映行波或由于环流造成的对墙面逐次加载的影响。

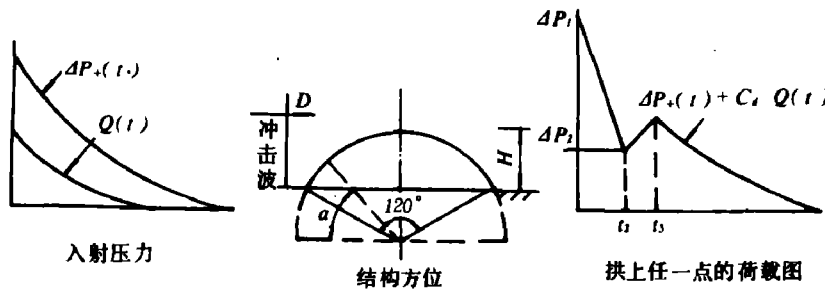


图6 拱、入射角、拱上荷载各参数的含义

作用于地面拱形结构上的荷载，由于拱表面各点相对于入射波方向不同，反射作用及阻力作用程度不同，因而拱面上各点荷载的时程曲线不同。虽然有许多研究，但仍然都是近似的。图6和图7是研究成果的一种。各符号的含义及荷载确定公式从图上可看出。

对于细长的结构如电焊、钢架等，反射压力来不及形成，超压对目标作用迅速保持平衡状态，因而目标主要承受阻力作用。

空气冲击波对防护结构破坏效应的另一个重要方面是波从不同型式的出入口、孔洞进入。沿通道传播中可能遇到转弯、分叉、合拢、截面突然扩大及缩小等情况，如图8a所示。工程要求确定作用在活门上、防护门上、扩散室各墙面上的压力时程曲线以及确定活门、防护门及扩散室内的余压。通常先将它分离成单独的一种波动现象进行分析。例如作用在进风活门上的荷载是以活门前的通道内冲击波为入射波，在防护门上发生正反射，于是活门上的荷载可示为图8b形状。冲击波进入扩散室时，目前是按流体

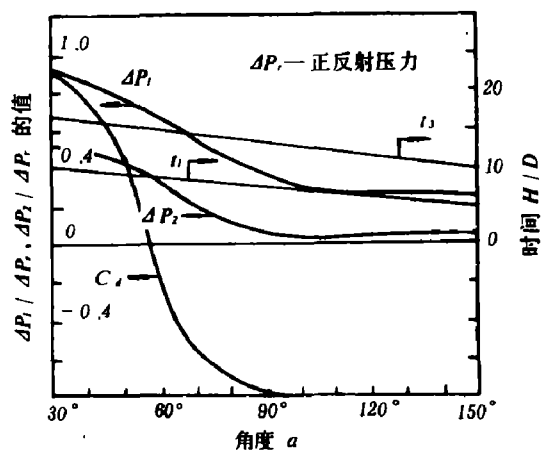


图7 拱上荷载的计算参数
(使用条件: $\Delta P_+ 1.9 \text{ kg/cm}^2$)

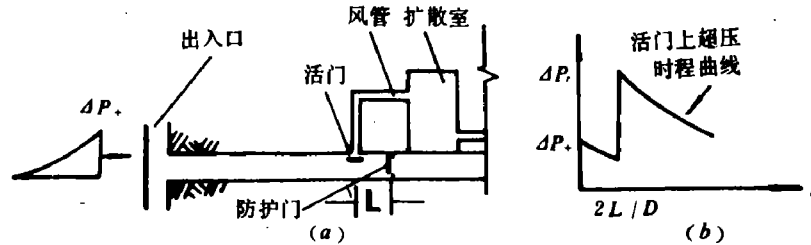


图 8 冲击波在出入口内传播途径

以临界流速流入扩散室的规律，先导出各参数间的定性规律，再经试验修正后求得扩散室内的余压。对于实际存在的多种波动现象的综合分析，目前尚只能作简化处理及用试验确定。

近年来，关于核爆炸空气冲击波的研究已取得了不少进展。例如在低空爆炸时，马赫反射区的高超压区发现压力时程曲线存在双峰现象；在确定地面超压及动压中有一些新的成果。但在考虑热效应影响，特别是低空爆近区的热效应；规则反射区内确定结构前墙上的荷载以及出入口和消波系统内冲击波传播等方面，现有资料过于粗糙，有的部分还不敢使用，这些是防护结构十分需要解决的问题。

四、核爆炸的地冲击效应

核爆炸的地冲击，就其直接起源而言，可分为三类

- (1) 空气冲击波感生的地冲击—由地面传播的空气冲击波引起的地应力和地运动；
- (2) 直接引起的地冲击—核武器触地爆（包括地下爆）时，在爆心处由爆炸能量在岩土中直接引起的地应力和地运动；
- (3) 成坑过程引起的地冲击—由于弹坑的形成而引起的晚期地应力和地运动。

自由场中某点所产生的地冲击状态是多种波动现象复杂的相互作用的结果如图 9 所示。现就防护结构关心的地冲击问题作简要介绍。

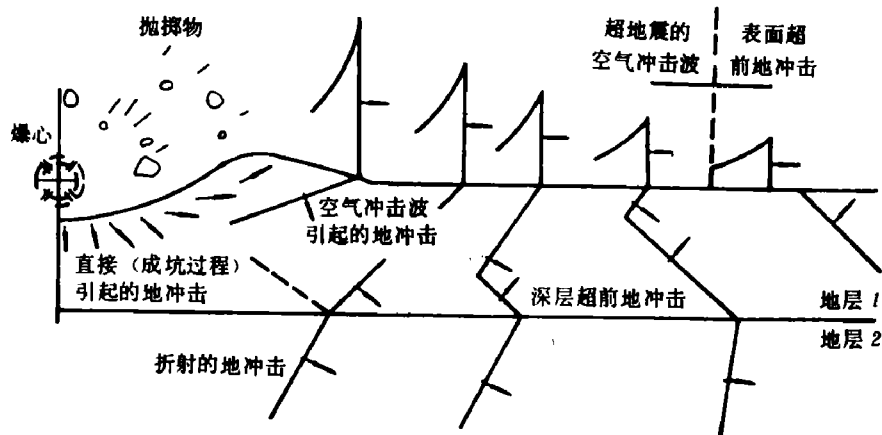


图 9 地冲击效应原理图

1. 关于岩土介质的特性

由图 9 可知，地冲击波在通过广大区域及大深度上的岩土中传播时，使岩土在复杂的三维应力状态下经历着加、卸载过程。因而地冲击效应与传播所经过的介质的特性有密切关系。用来获得地质

参数的主要手段应包括大面积大深度的野外勘察、实验室试验和现地测定三种。

野外勘察主要采用以地震折射法为主的，包括炮井速度测井、 γ 射线—中子测井及电测井在内的地球物理方法及钻孔法。以此查明地冲击可能的传播途径中大范围内的地层构造及岩土性状。

实验室试验除测定岩土的常规物理力学性能外，主要的工作是针对理论分析中为了建立岩土的力学模型所要求的应力应变关系（如动、静真假三轴试验）以及测定具有不同峰值压力的压缩波波速及剪切波波速。实验室试验资料的分析特别要注意由于取样过程所造成的土的特性发生了不可逆转的改变。例如地下水位以下的接近饱和状态的土，由于取样，即使对土中的含气量发生了微小的变化，也可能造成变形模量发生 1—2 个数量级的变化。对此应有所估计。

现场测定是利用炸药模拟技术（如 HEST、DIHEST 技术等）模拟核爆炸的地冲击效应或使用简单的柱状装药产生一个合适的震源，在具有典型的或特殊的地质条件的现场作现场测定。其目的是检验及修正实验室试验数据，检验及修正理论分析结果等。

2. 空气冲击波感生的地冲击

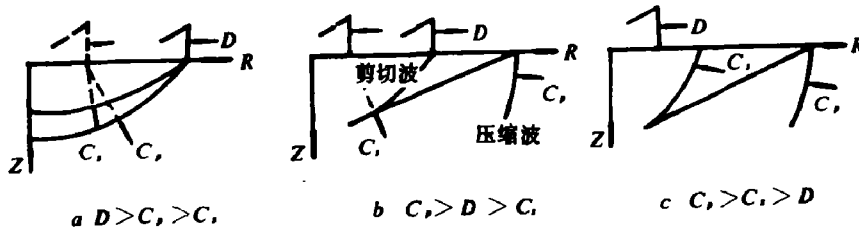


图 10 由空气冲击波引起的地运动形成的地下波系

根据空气冲击波及地冲击应力传播速度的差异，可分为三种情况如图 10 所示，图中 D 、 C_s 、 C_c 分别表示空气冲击波、岩土中压缩波及剪切波波速。

在土中发生的地冲击多数属图 10 中的情况 a。由于压缩波阵面与地面交角甚小，可简化为一维波分析。根据一维波理论，波的传播特性决定于介质的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。图 11 为土的典型单轴 $\sigma-\epsilon$ 曲线以及波在其中传播的效应。试验表明，由于土中实际存在的变形滞后现象等因素，压缩波在传播中峰值压力下降。对于 $\sigma-\epsilon$ 曲线保持 $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} < 0$ 的情况，峰值压力上升时间 t_c 随传播距离明显增长。但在对土样试验保持 $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} > 0$ 的现场试验中，尚未测得 $t_c \rightarrow 0$ 的结果。

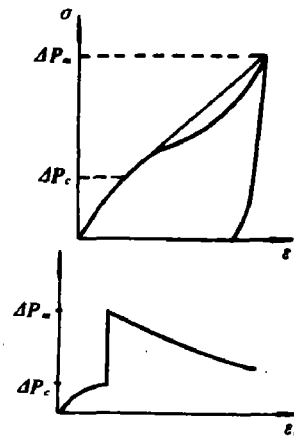


图 11 $\sigma-\epsilon$ 曲线对波在土中传播的影响

在理论分析中，对于 $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} < 0$ 的情况，可利用波动方程的特征线解用图解法或数值计算求解。

只是这种模型未考虑实际存在的粘性。故峰值压力的衰减计算值偏小。图 12 为实测的衰减系数 a 。深 Z 处的峰值压力 σ_z 按下式计算

$$\sigma_z = a \cdot \Delta P_+ \tag{10}$$

质点运动速度 V_z 及升压时间 t_c 由一维波理论按下式计算

$$V_z = \frac{\sigma_z}{\rho C_0} \quad (11)$$

$$t_c = \frac{Z}{C_0} (r_c - 1) \quad (12)$$

式中

ΔP_+ —地面冲击波峰值压力;

C_0 —土中弹性波速度;

r_c —波速比。 $r_c = C_0 / C_p$;

但是,对轴对称弹性问题的研究表明,在近地表的一定深度处的峰值压力可以超过地面峰值压力。因而在土中浅埋结构所涉及的深度范围内,一般均不考虑应力衰减。

对于 $\frac{d^2 \sigma}{d \varepsilon^2} > 0$ 的情况(如饱和土中),理论分析表明

应出现再生激波现象。实验室试验已获得明显的再生激波现象。但在有限的野外试验中,尚未发现。

对于超前的地冲击及成坑过程引起的地冲击情况很复杂。目前只能用试验方法确定,不再赘述。

3. 直接引起的地冲击

对于触地爆,试验表明可在一定范围内造成强烈的地运动和地应力。它对地下防护结构具有巨大的破坏力。由于它涉及大而深的范围内的地质条件,同时它又至少是一个二维的轴对称问题,故即使是近似的解析分析也相当困难。有限差分及有限元分析是当前分析这一领域广泛使用的手段。在通过仔细的野外勘察、实验室试验及实地测定后,从而适当选择岩土力学的模型后,可以得到一些重要的结论。这里需要强调的是单纯依靠岩土试件的实验室试验数据建立的模型直接用于数值计算是不行的。

有限次数的核爆炸现场试验资料及大型化爆试验资料是极为宝贵的。下面的公式归纳了这些试验的结果

$$V = A W^{2/3} R^{-2} \quad \pm (2 \sim 3) \text{ 倍} \quad (13)$$

$$d = B W^{5/6} R^{-3/2} \quad \pm (2 \sim 4) \text{ 倍} \quad (14)$$

$$a = C W R^{-4} \quad \pm (2.5 \sim 5) \text{ 倍} \quad (15)$$

式中: A, B, C —系数。查表 1; V —质点运动速度 [m/sec]; d —位移 [cm]; a —加速度 [g]; W —TNT 当量 [MT]; R —离爆心距离 [m]。地冲击产生的峰值压力近似按一维波理论计算,即

$$\sigma = \rho C_0 V$$

由封闭核爆炸引起的典型的地运动参数如图 13 所示。

研究触地爆的力学破坏效应还可以用直观的破坏现象作为指标的所谓“破坏分区”来描述。一般地说,自爆心向外,可分为 5 个区域:

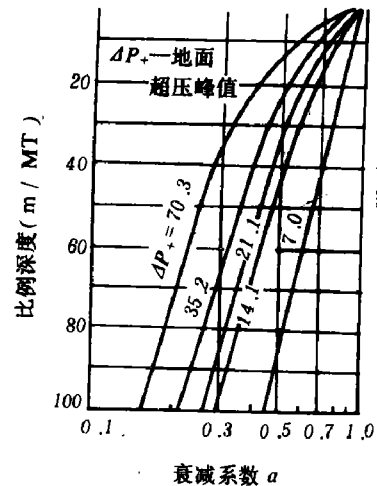


图 12 土中压缩波衰减系数

表 1 直接引起的地运动计算系数

岩 土	埋 深	A	B	C
坚 岩	全封闭	5.7	86	30
	触地面	0.71	1.9	1.2
软 岩	全封闭	2.3	68	5.2
	触地面	0.28	0.43	0.2
干 土	全封闭	0.57	43	1.0
	触地面	0.07	0.21	0.04

区域1为断裂区。该区内任何构筑物均难幸免于毁坏

区域2为剥离区。该区内毛洞会产生严重剥离。由于拉伸波的反复作用，剥离下来的岩体呈片状并多次发生。一般的喷锚支护不能阻止这种破坏发生。

区域3, $V_{max} > 15 \text{ m/s}$ 。该区域内能发生不稳定的大岩块崩落。毛洞的稳定性受岩层的地质构造影响较大。喷锚支护可以减少这种破坏。

区域4及5, $V_{max} < 15 \text{ m/s}$ 毛洞稳定。区域4及5已处于较深的地层内。由于经济上及使用上的原因，一般不在如此深的地层内构筑防护工程。然而置于区域2及3内的防护结构会受到强烈的地运动及地应力。需对防护结构采用特殊的结构体系（如带有软回垫层的钢壳砼圆形结构等）以及采用完善的减震措施。这就提出了抗触地爆的高抗力结构的研究课题。

由触地爆成坑过程引起的地冲击频率较低。它造成的自由场地运动主要发生在近地表面地区。其水平分量在某些地域内比空气冲击波感生的地冲击值要大得多。已有一些试验回归公式可用，但不确定范围有的公式高达 ± 6 倍。

地冲击由于受地层地质状态影响较大、爆炸试验条件受限及理论分析至少涉及二维非线性问题。故当前除空气冲击波感生的土中压缩波按一维波分析外，其他均处于直观的经验分析阶段。大力发展专用及多用的有限元及有限差分等大型程序是深入分析这一领域的有力手段。通过有目的的所谓“计算机实验”探索影响地冲击的诸因素间的定性规律，进而为建立在简化模型上的理论分析提供有用的资料。由于程序的编制及勘察试验（包括地冲击参数测试手段）具有相当明显的专业特征，例如从地冲击效应的角度出发，对地质条件进行分类；在一维及二维条件下，波在非线性分层介质中的传播及相互作用分析；高速变形条件下材料的特性及本构关系的研究；特高频及低频大量程地运动和地应力传感器的研制及动力匹配问题的分析等等，因而，提供给防护工程专业研究的领域正在逐步扩大和深入

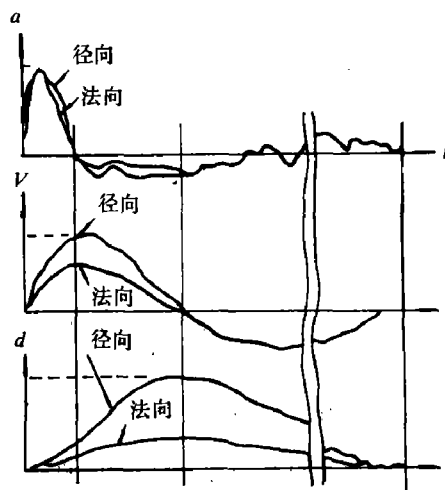


图 1.3 直接引起的地运动典型波形

参 考 文 献

- 〔1〕 Robert E. Crawford et al., AFWL-TR-74, 102.
- 〔2〕 钱伟长, 穿甲力学, 国防工业出版社 (1984).
- 〔3〕 乔登江, 爆炸与冲击, 5 (4) (1985), 78.

AN INTRODUCTION TO HARDENED STRUCTURES(1)

Yu Ruyi